



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

Saltillo, Coahuila a 27 de septiembre de 2022

### Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura

#### Coordinación de Posgrado

PRESENTE

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO titulado "Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo (Ficus carica L) 'Black Mission' bajo condiciones de malla sombra y sometido a riego salino controlado mediante división radicular" el cual fue presentado el día 20 de septiembre de 2022, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

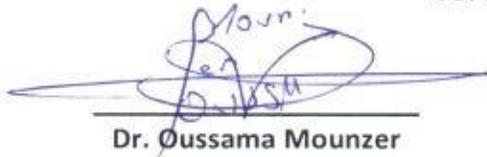
#### SINODALES

  
Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar  
Presidente

  
Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso  
Secretario

  
Dr. Eduardo Alfonso Treviño López  
Vocal

#### Vo. Bo. de los Asesores

  
Dr. Oussama Mounzer

  
Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros





GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN QUÍMICA APLICADA

Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura

Saltillo, Coah, a 20 de septiembre de 2022

Declaración de documento libre de plagio:

Mediante esta declaración manifestamos que el documento de tesis titulado "Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo (Ficus carica L) 'Black Mission' bajo condiciones de malla sombra y sometido a riego salino controlado mediante división radicular" redactado por JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO, y revisado por el Asesor/Director Dr. Oussama Mounzer y Co-asesor/Co-director Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros, está libre de plagio cumpliendo los siguientes aspectos:

Autenticidad y crédito a las fuentes	Revisado*
Los textos son originales	
El documento está libre de oraciones y párrafos copiados de otras fuentes bibliográficas, sitios de internet, etc.	
El documento está libre de traducciones literales emanadas de literatura en otro idioma	
Los textos están debidamente referenciados	
Las citas textuales (si las hay) están entrecomilladas y referenciadas	
Fotografías, esquemas, gráficas, tablas y otros materiales emanados de otras fuentes están referenciados.	
Se adjunta reporte de revisión realizado con el software _____ con un registro de _____ % de similitud	

\*Marque con una "X"

Jose Guadalupe Altamirano Pacheco

Nombre y firma del (de la) autor(a)

Dr. Oussama Mounzer  
Nombre y firma del (de la) Asesor(a)/director(a)

Francisco Marcelo Lara Viveros  
Nombre y firma del (de la) Co-asesor(a)/Co-director(a)



## TESIS CON CARACTER ABIERTO

PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

---

AUTOR: JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO FIRMA 

TITULO: Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo (Ficus carica L) 'Black Mission' bajo condiciones de malla sombra y sometido a riego salino controlado mediante división radicular.

ASESORES: Dr. Oussama Mounzer

FIRMA 

Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros FIRMA 

El Centro de Investigación en Química Aplicada clasifica el presente documento de tesis como ABIERTO.

Un documento clasificado como Abierto se expone en los estantes del Centro de Información para su consulta. Dicho documento no puede ser copiado en ninguna modalidad sin autorización por escrito del Titular del Centro de Información o del Director General del CIQA.

Saltillo, Coahuila, a 20 de Septiembre de 2022



---

Dr. Oliverio Santiago Rodríguez Fernández  
Director General del CIQA

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**TESIS**

**Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo (*Ficus carica* L)  
'Black Mission' bajo condiciones de malla sombra y sometido a riego salino  
controlado mediante división radicular**

*Presentada por:*

**JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO**

*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencias en Agroplasticultura**

*Asesorado por:*

**Dr. Oussama Mounzer**  
**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros.**

**SINODALES**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Ricardo Hugo Lira Saldivar**  
**Presidente**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso**  
**Secretario**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Eduardo Alfonso Treviño López**  
**Vocal**

**Saltillo, Coahuila. México**

**Septiembre, 2022**



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**  
**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

***TESIS***

**Respuestas eco-fisiológicas y productividad del agua de riego en higo  
(Ficus carica L) ‘Black Mission’ bajo condiciones de malla sombra y  
sometido a riego salino controlado mediante división radicular**

***Presentada por:***

**JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO**

***Para obtener el grado de:***

**Maestro en Ciencia en Agroplasticultura**

***Asesorado por:***

**Dr. Oussama Mounzer**  
**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros**

## DECLARACIÓN

Declaro que la información contenida en la Parte Experimental así como en la Parte de Resultados y Discusiones de este documento y que forman parte de las actividades de investigación y desarrollo realizadas durante el período que se me asignó para llevar a cabo mi trabajo de tesis, será propiedad del Centro de Investigación en Química Aplicada.

Saltillo, Coahuila a 20 de septiembre de 2022



JOSE GUADALUPE ALTAMIRANO PACHECO

Nombre y Firma

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca que me otorgó para la realización de mis estudios de la Maestría en Agroplasticultura.

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por darme la oportunidad de continuar con mis estudios y abrirme las puertas al Posgrado, para la realización de la Maestría en Agroplasticultura.

A mi asesor de tesis, el Dr. Oussama Mounzer, por haber contribuido de manera importante en mi formación académica y personal, por haberme permitido ser parte de su idea de investigación y compartir conmigo parte de su invaluable experiencia y conocimiento, siempre gracias a usted, Dr. Oussama Mounzer.

A mi co-asesor el Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros, por su invaluable apoyo para llevar a buen término el presente proyecto, gracias por sus consejos, recomendaciones, tiempo, dedicación y por compartir parte del gran cúmulo de conocimientos y experiencia muchas gracias Dr.

A la Dra. Nadia Landero Valenzuela por su apoyo en la gestión de apoyo para el desarrollo de actividades en campo, por sus palabras de motivación y por estar presente también en esta etapa de mi formación académica y personal.

A los doctores Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar, Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso y al Dr. Eduardo Alfonso Treviño López, por las revisiones tiempo y dedicación, por sus consejos, sugerencias, correcciones y comentarios que permitieron mejorar la realización del proyecto en todas sus etapas.

Al M.C. Jairo Vázquez Lee, por el apoyo técnico-científico requerido en diversas actividades del proyecto desarrollado, por sus recomendaciones y por su apoyo para la realización de labores y mediciones en campo.

A la Dra. Yolanda Ortega Ortega, por sus sugerencias, recomendaciones y su invaluable apoyo para la realización de las evaluaciones de laboratorio requeridas.

A los trabajadores del Campo Experimental del CIQA: especialmente al Sr. Francisco Prado Castañuela, por el apoyo brindado para la realización de labores de campo.

Con una enorme gratitud a mis maestros de la Maestría en Agroplasticultura del CIQA

A Grecia Daniela Ortiz Hernández por su amistad y apoyo en el desarrollo de actividades de la última parte del proyecto.

A Lizeth Chávez Cerón por su amistad por sus palabras de motivación y apoyo incondicional.

## ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	10
I.1 La higuera, <i>Ficus carica</i> L. ....	11
I.1.1 Cultivo de higo a <i>nivel mundial</i> .....	12
I.1.2 Cultivo de higo en México .....	13
I.2 Requerimientos edafoclimáticos.....	15
I.3 Importancia nutricional y medicinal del higo .....	16
I.4 Los recursos de las zonas áridas y semiáridas .....	16
I.5 Salinidad .....	17
I.6 Sistema de raíces divididas.....	18
I.7 Factores limitantes en la productividad del cultivo de higo en México .....	19
II. JUSTIFICACIÓN .....	22
III. HIPÓTESIS .....	23
IV. OBJETIVOS .....	23
IV.1 Objetivo general.....	23
IV.2 Objetivos específicos .....	23
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	24
V.1 Ubicación del área de estudio.....	24
V.2 Material vegetal.....	24
V.3 Nutrición del cultivo.....	25
V.4 Método de riego .....	26
V.5 Control de plagas y enfermedades .....	26
V.6 Tutorado .....	27
V.7 Diseño agronómico de la parcela.....	27

V.8 Tratamientos .....	27
V.9 Diseño experimental .....	28
V.10 Variables climáticas .....	28
V.11 Grados hora de crecimiento.....	29
V.12 Volumen de riego y drenaje .....	29
V.13 Caracterización de la solución de drenaje .....	29
V.14 Variables biométricas en las plantas.....	30
V.14.1 Crecimiento del diámetro del tallo y longitud de brotes.....	30
V.14.2 Crecimiento del fruto .....	30
V.14.3 Adquisición de imágenes del fruto .....	30
V.15 Procesamiento de imágenes.....	31
V.16 Numero de frutos .....	31
V.17 Intercambio gaseoso.....	31
V.18 Estado hídrico en las plantas .....	32
V.18.1 Potencial hídrico del tallo .....	32
V.18.2 Variaciones micro morfométricas del diámetro del tronco.....	32
V.19 Parámetros poscosecha .....	33
V.19.1 Calibre del fruto.....	33
V.19.2 Contenido de sólidos solubles totales (SST).....	33
V.19.3 pH en el jugo.....	33
V.19.4 Densidad del fruto .....	33
V.19.5 Daño por agrietamiento lateral de la piel y daño en el ostiolo .....	33
V.20 Análisis estadístico .....	34
VI. RESULTADOS.....	35
VI.1 Variables climáticas .....	35

VI.2 Balance hídrico por compartimento .....	37
VI.3 Conductividad eléctrica y pH de riego y drenaje .....	39
VI.4 Potencial hídrico .....	40
VI.5 Evolución del potencial hídrico.....	42
VI.6 Dinámica de crecimiento de brotes.....	43
VI.7 Crecimiento de frutos.....	45
VI.8 Variaciones del diámetro del tronco.....	46
VI.9 Grados hora de crecimiento del fruto.....	49
VI.10 Rendimiento.....	50
VI.11 Calidad de la cosecha.....	51
VI.12 Productividad del agua .....	53
VII. DISCUSIONES .....	55
VII.1 Variables del entorno ambiental.....	55
Estado hídrico de la planta.....	55
VII.2 Dinámica de crecimiento de la planta .....	57
VII.3 Calidad poscosecha y productividad del agua .....	59
VIII. CONCLUSIONES .....	62
IX. PERSPECTIVAS.....	63
X. REFERENCIAS.....	64

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> ) en los principales estados productores de higo en México. .....	14
<b>Cuadro 2.</b> Concentración de macronutrientes en solución nutritiva de referencia para cultivo de higo.....	25
<b>Cuadro 3.</b> Concentración de micronutrientes en solución nutritiva .....	25
<b>Cuadro 4.</b> Fertilizantes comerciales y aportes para formulación de solución madre. ...	26
<b>Cuadro 5.</b> Tratamientos evaluados en el experimento .....	28
<b>Cuadro 6.</b> Potencial hídrico del tallo en higuera, durante el ciclo de cultivo, como respuesta a 4 tratamientos de manejo del fertirriego con diferentes niveles de salinidad (T1 3dS m <sup>-1</sup> - 3dS m <sup>-1</sup> , T2 1.8dS m <sup>-1</sup> - 3dS m <sup>-1</sup> , T3 1.8dS m <sup>-1</sup> - 6dS m <sup>-1</sup> , T4 6dS m <sup>-1</sup> - 6dS m <sup>-1</sup> ) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. ....	41
<b>Cuadro 7.</b> Promedio en la temporada en parámetros de calidad en frutos de higuera bajo tratamientos de manejo de fertirriego establecidas en sistema de raíces divididas. SST = solidos solubles totales.....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Principales países productores de higo a nivel mundial en el año 2018.....	12
<b>Figura 2.</b> Volumen y valor de las importaciones (MDD) por parte de los principales países consumidores de higo a nivel mundial en el año 2018. ....	13
<b>Figura 3.</b> Área cosechada y producción de higo en México del año 2009 al 2019. ....	14
<b>Figura 4.</b> Separación del sistema radicular en dos compartimentos y establecimiento del cultivo bajo cubierta de malla sombra. ....	25
<b>Figura 5.</b> Evolución de las principales variables climáticas al interior y exterior de la casa de sombra ubicada en el Campo Experimental del DBA-CIQA en el ciclo 2021 en cultivo de higuera. A) Radiación solar, B) Temperatura del aire, C) Humedad Relativa y D) déficit de presión de vapor.....	37
<b>Figura 6.</b> Balance hídrico por compartimento (A) y tratamiento (B), considerando al periodo entre el 1 de abril y el 1 de noviembre del 2021. El patrón de color solido corresponde a los datos de evapotranspiración real y el patrón en trama representa a los datos de drenaje. El conjunto de ambas variables representa el total aportado de agua de riego.....	38
<b>Figura 7.</b> Evapotranspiración de referencia calculada mediante la fórmula FAO-Penman-Monteith al interior de la casa sombra, evapotranspiración real de cultivo y coeficiente de cultivo calculado para el tratamiento testigo, valores promedio a intervalo de 15 días.	39
<b>Figura 8.</b> Valores promedio de CE (A) (izquierda) Y pH (B) (derecha) en aguas de riego y drenaje registrados durante el ensayo, para los tratamientos de manejo de fertirriego. Los prefijos A y B corresponden a los dos compartimentos de raíces en cada planta. El agua de pozo de CE de 1.8 dS/m fue siempre aportada al compartimento B de los tratamientos T2 y T3.....	40
<b>Figura 9.</b> A) Evolución diaria del potencial hídrico del tallo en plantas de higuera. B) Relación entre potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{Tallos}}$ ) del tratamiento testigo y el déficit de presión de vapor de aire medio horario al exterior (DPV).....	43
<b>Figura 10.</b> Curva de crecimiento de brotes (A) y velocidad de crecimiento del brote por tratamiento (B) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. T1: fertirriego (CE=3 dS m <sup>-1</sup> ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento	

de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. .... 44

**Figura 11.** Efectos de tratamientos de manejo del fertirriego en la curva de crecimiento de frutos por tratamiento (A) y en la velocidad de crecimiento del fruto (B) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces..... 45

**Figura 12.** Curva de crecimiento y velocidad de crecimiento del diámetro ecuatorial del fruto de higuera cv Black Mission obtenida a partir de imágenes RGB. .... 46

**Figura 13.** Variaciones micromorfométricas del diámetro del tronco en plantas de higo (cv. Black misión) con raíces divididas en dos compartimentos sujetos a diferentes tratamientos de manejo del fertirriego. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces..... 47

**Figura 14.** Variación diaria del diámetro de tronco en higuera (cv. Black Mission) e indicadores derivados como el valor máximo (MxDT) y mínimo (MnDT) diario del diámetro del tronco y la tasa diaria de crecimiento del diámetro máximo ( $\Delta MxDT$ ) y mínimo ( $\Delta MnDT$ ). .... 48

**Figura 15.** A) distribución de la máxima contracción diaria registrada durante un ciclo de producción en plantas de higo (cv. Black Mission) con raíces divididas en dos compartimentos sujetos a diferentes tratamientos de manejo del fertirriego. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4:

fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. B) Relación entre la MCD y la conductividad eléctrica promedio aplicada a cada tratamiento. .... 49

**Figura 16.** Grados hora de crecimiento en frutos de higuera sometidas a 4 tratamientos de manejo del fertirriego en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. .... 50

**Figura 17.** Rendimiento alcanzado en higuera establecidas en sistema de raíces a divididas bajo cuatro tratamientos de manejo de fertirriego: **(A)** Rendimiento estimado en kilogramos por metro cuadrado, **(B)** Distribución de pesos de frutos cosechados. .... 51

**Figura 18.** Promedio de daño en frutos de higo cosechados en plantas sometidas a tratamientos salinos. .... 53

**Figura 19.** Productividad del agua aplicada y evapotranspirada en plantas de higuera establecidas en sistema de raíces divididas y sometidas a 4 tratamientos de manejo de fertirriego. .... 54

## RESUMEN

La baja disponibilidad y calidad de recursos hídricos y la presión provocada por la demanda progresiva y por actividades antropogénicas junto con las amenazas del cambio climático, condicionan el desarrollo y productividad de los cultivos agrícolas en zonas áridas y semiáridas y exigen la búsqueda y reconversión a cultivos tolerantes a condiciones climáticas adversas, así como la implementación de estrategias de manejo que permitan el uso eficiente de los recursos disponibles.

En este sentido se planteó el objetivo de desarrollar un paquete de manejo agronómico y de monitoreo de precisión en cultivo de higo para mejorar la productividad del fertirriego en zonas semiáridas y áridas. El ensayo se desarrolló sobre plantas de higo de la variedad Black Mission, de 1 año de edad, cultivadas bajo cubierta de malla sombra y establecidas en un sistema de raíces divididas sometidas a tratamientos de fertirriego con diferentes conductividades eléctricas, T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. Se realizó el seguimiento de variables meteorológicas al interior y exterior de la casa sombra, así como evaluaciones en planta relacionadas al estado hídrico del cultivo, crecimiento y desarrollo, estimación de rendimiento y seguimiento de parámetros de calidad en la cosecha.

De acuerdo con los datos obtenidos, el potencial hídrico del tallo presentó una relación inversa en relación a la CE media de los compartimentos, con los valores más bajos de potencial hídrico en T4 lo que se tradujo en una reducción en el consumo hídrico, reducción en la biomasa de ramas y diámetro basal del tronco además de generar un aumento en el número de frutos por planta, pero de un peso menor al de T1 y T2 a la cosecha, T3, que recibía salinidad alta en uno de sus compartimentos mostró efectos de la salinidad en la raíz, pero no redujo su consumo hídrico, alcanzó la longitud máxima de brotes y una ligera reducción en la biomasa de ramas, aunque la media del peso de frutos fue estadísticamente similar a la de T3, el número de frutos a la cosecha fue también

mayor al de T1 y T2. en el sistema de raíces divididas permitieron una reducción en el consumo hídrico en un 9% en el tratamiento salino en ambos compartimentos, respecto al tratamiento testigo.

Los rendimientos obtenidos fueron superiores a las 17.8 ton ha<sup>-1</sup> en todos los tratamientos evaluados, en comparación con la media nacional de 7.16 ton ha<sup>-1</sup> que se registran en sistemas convencionales. Aun cuando el uso de sistemas de raíces divididas en los que se manejan compartimentos de alta y baja salinidad no suprime el efecto negativo de las sales en la planta, ya que el crecimiento en términos generales sí presenta un impacto, este no fue significativo sobre el rendimiento al compararse con el tratamiento testigo, por lo que el sistema de raíces divididas permitiría implementar estrategias de manejo del fertirriego que incluyan el uso de aguas de baja calidad que en caso de aplicarse de manera homogénea en la raíz generarían efectos más severos en la planta.

## I. INTRODUCCIÓN

La higuera (*Ficus carica* L.), especie originaria del sureste de Asia, considerada una de las primeras especies cultivadas por el hombre y en la actualidad un importante cultivo en el mundo (Mawa *et al.*, 2013). Se caracteriza por su adaptación a una amplia variedad de climas y principalmente por su tolerancia a condiciones adversas como sequía y salinidad (El-Shazly *et al.*, 2014); presenta elevados potenciales productivos y un mercado en constante crecimiento, que para el año 2019 representó un valor de importación global superior a los 619 millones de dólares de los cuales 68.6 millones correspondieron a la importación registrada en conjunto por los dos principales socios comerciales de México; Estados Unidos y Canadá, (TRIDGE, 2020a).

Este potencial de mercado y nicho de oportunidad provocó un considerable incremento en la superficie sembrada en el país, pasando de 815 hectáreas en 2009 a 1,322 hectáreas en 2019, para colocar a México como el vigésimo productor de higo a nivel mundial para el año 2019, con una producción de 9500 toneladas, concentrada principalmente en los estados de Morelos, Veracruz y Michoacán (FAOSTAT, 2020; SIAP, 2022)

Sin embargo aun cuando el cultivo, dadas sus características de tolerancia a condiciones de sequía salinidad, presenta un elevado potencial como cultivo alternativo en zonas áridas y semiáridas, la información disponible sobre la fenología del cultivo y su respuesta a sistemas de producción intensiva, aún es muy limitada (Stover *et al.*, 2007) por lo que surge el reto de implementar estrategias de manejo eficiente y desarrollar paquetes tecnológicos sustentables que permitan maximizar la productividad de los escasos recursos hídricos, aplicando en todo momento fundamentos y herramientas científicas que brinden la optimización requerida.

En este sentido se han realizado múltiples investigaciones en las que se incluye el uso de sensores ambientales y en plantas, como herramientas en el manejo enfocadas al uso eficiente de los recursos hídricos, implementando técnicas como el riego deficitario controlado en cultivos de álamo, olivo, cítricos (Fernández *et al.*, 2011); o el secado parcial de raíces, técnica de riego en la que se reduce la cantidad de agua aplicada al

cultivo en un determinado periodo de crecimiento y desarrollo (Jovanovic y Stikic, 2018), esta técnica ha sido utilizada también en combinación con el uso de aguas salinas en vid, lo que permitió incrementar la productividad del agua y a su vez mejorar la calidad de las cosechas sin generar impactos negativos considerables en el rendimiento (Dry y Loveys, 1998); caso similar fue reportado por Khaleghi *et al.*, (2020) quienes evaluaron el secado parcial de raíces en combinación con riego empleando agua de mar diluida en alternancia con agua dulce, en cultivo de girasol obteniendo resultados prometedores en el uso de aguas salinas en combinación con técnicas de déficit hídrico controlado.

Además de lo antes señalado se han integrado también nuevas técnicas de análisis de imágenes, ofreciendo una amplia gama de aplicaciones prácticas, entre las que destacan el cálculo de índices que permiten detectar diferentes tipos y niveles de estrés en cultivos (Hu *et al.*, 2019; Lara *et al.*, 2016), realizar estimaciones de rendimiento en cultivos (Sumesh *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020); o el monitoreo de la acumulación de biomasa en cultivos como cebada (Ballesteros *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018).

Dado el potencial de mercado para el cultivo de higo, el interés nacional por promover su establecimiento en zonas áridas y semiáridas del país y dada la falta de conocimiento agronómico sobre el manejo hídrico y nutricional, se propone desarrollar un paquete tecnológico utilizando sensores ambientales en combinación con la información suministrada por análisis de imágenes RGB que permitan caracterizar el desarrollo y la producción de plantas de higo conducidas en sistema de espaldera vertical bajo diferentes opciones de manejo de fertirriego en raíces divididas, lo que permitiría emplear aguas salinas sin afectar del potencial productivo, permitiendo el aprovechamiento de los recursos disponibles y característicos de las zonas áridas y semiáridas.

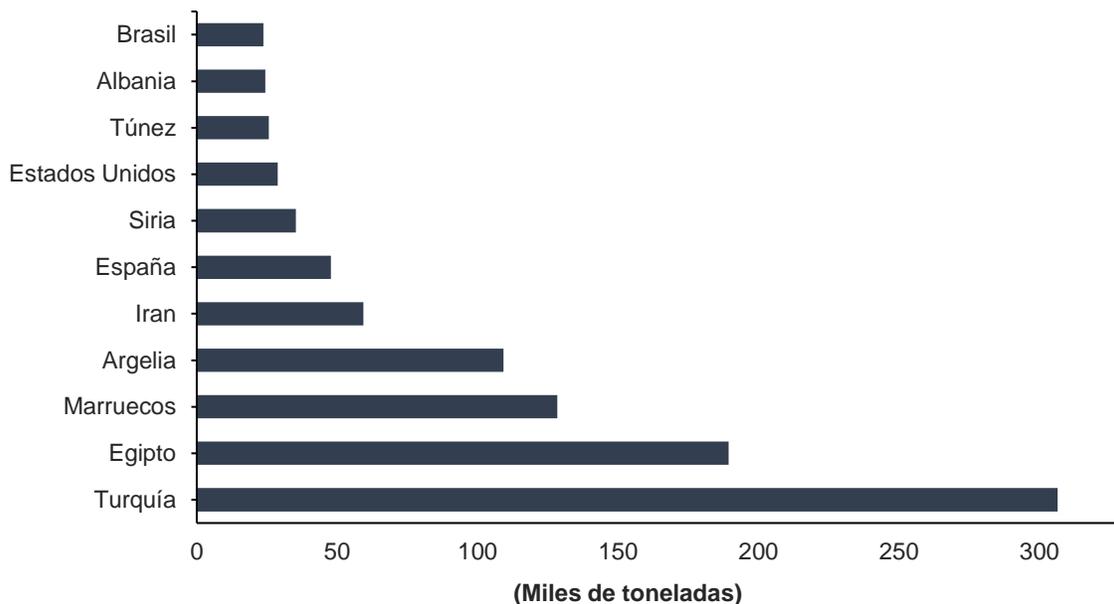
### **I.1 La higuera, *Ficus carica* L.**

La higuera (*Ficus carica* L.) especie perteneciente al género *Ficus* de la familia de las Moráceas (McGovern, 2002) es un arbusto o árbol de pequeño porte generalmente caducifolio que se caracteriza por presentar una corteza grisácea, ligeramente rugosa; hojas simples, alternas, estipuladas, pecioladas; raíces abundantes fibrosas con desarrollo superficial y ramas pubescentes (Flora of North America Association, 2002; Vázquez *et al.*, 1999). La especie es originaria del sureste de Asia, considerada como

una de las primeras plantas cultivadas por el hombre y en la actualidad un importante cultivo en el mundo (Mawa *et al.*, 2013).

### I.1.1 Cultivo de higo a *nivel mundial*

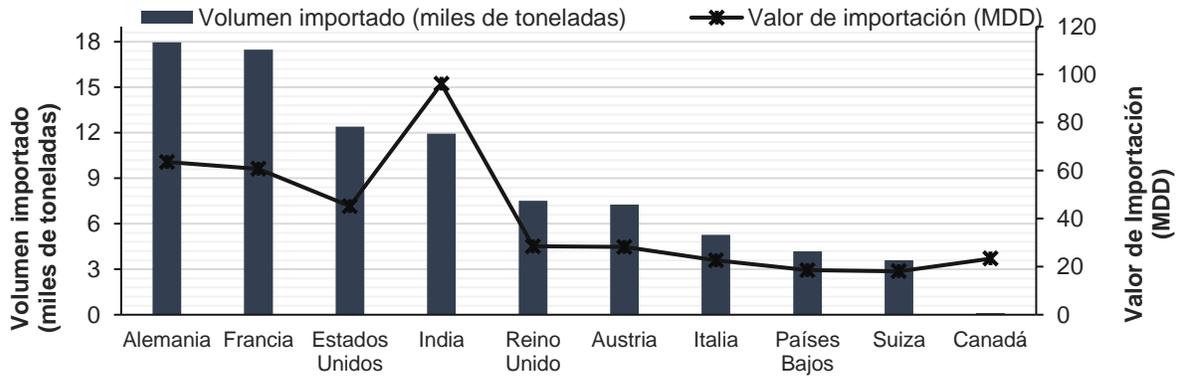
Su producción a nivel mundial en el año 2020 alcanzó un valor superior al 1.26 millones de toneladas en una superficie cosechada de 281,522 hectáreas (FAOSTAT, 2020); dicha producción se centró en países de la cuenca del mediterráneo principalmente Turquía, Egipto, Marruecos y Argelia (Figura 1) que ocupan los primeros 4 lugares en producción y que en conjunto aportaron el 70.7% de la misma, mientras que México con 7,705 toneladas se ubicó en el lugar 19 (TRIDGE, 2020b).



**Figura 1.** Principales países productores de higo a nivel mundial en el año 2018. Elaboración propia con datos de TRIDGE, (2020b).

Las importaciones se centran en países como Alemania, Francia, Estados Unidos y la India los cuales, en 2018 importaron un volumen cercano a las 60 mil toneladas con valor de 265.7 millones de dólares (Figura 2). Además, países como Estados Unidos y Canadá figuran entre los 10 principales importadores y comparten con México uno de los mercados más importantes del mundo; en ese mismo año importaron poco más de

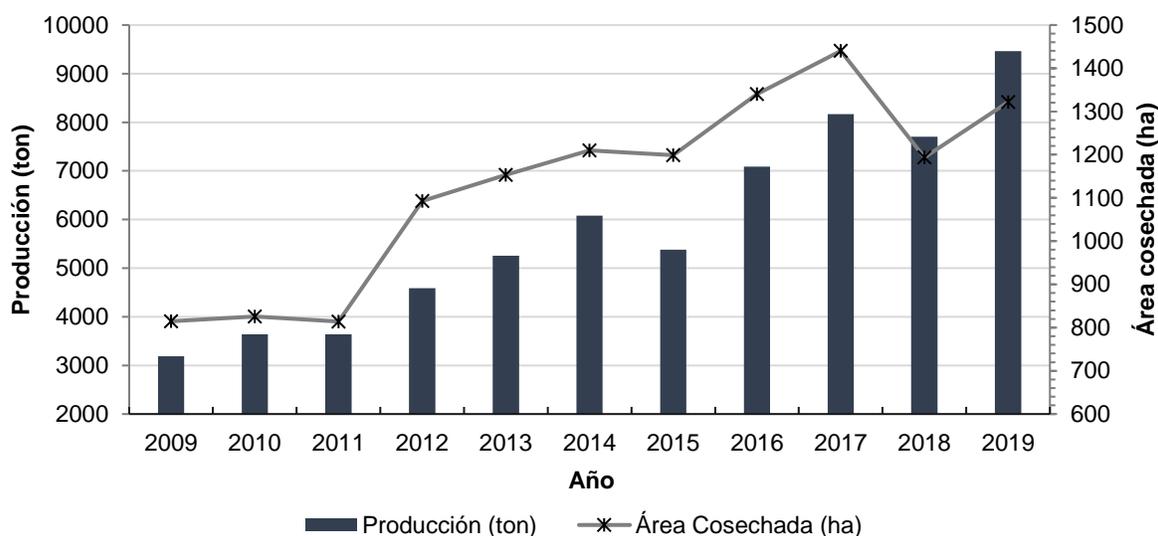
12,500 toneladas con valor de 68.6 millones de dólares, representando una importante área de oportunidad para México (TRIDGE, 2020a).



**Figura 2.** Volumen y valor de las importaciones (MDD) por parte de los principales países consumidores de higo a nivel mundial en el año 2018. Elaboración propia con datos de TRIDGE, (2020a).

### I.1.2 Cultivo de higo en México

En México, se considera que el higo fue introducido por misioneros franciscanos españoles a estados como, Hidalgo, Guanajuato, Morelos, San Luis Potosí o Zacatecas; sin embargo actualmente se encuentra en prácticamente todos los estados del país, pero solo en 15 se reporta producción comercial (SADER, 2020). Este cultivo ha venido cobrando importancia, lo cual queda de manifiesto con un 62.3% de incremento en la superficie cosechada, pasando de 815 a 1,322 hectáreas en el periodo del 2009 al 2019 (Figura 3), año en el que se registró una producción de 9,466 toneladas con un valor estimado superior a los 224 millones de pesos en una superficie cosechada de 1322.3 hectáreas (FAOSTAT, 2020).



**Figura 3.** Área cosechada y producción de higo en México del año 2009 al 2019. Elaboración propia con datos de SIAP, (2020).

Para el año 2019, el 73% de la producción se centró en los estados de Morelos, Baja California Sur y Veracruz, siendo este último, el estado que registra los rendimientos más altos en el país, alcanzando las 12 ton ha<sup>-1</sup>, muy por encima de la media nacional de 7.16 ton ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2022), (Cuadro 1). Sin embargo, estos rendimientos siguen siendo inferiores a los registrados en países como Uzbekistán y Colombia, países que centran su producción en variedades de higos negros y que reportan para el mismo año 2019, rendimientos de 24.8 y 23.7 t ha ha<sup>-1</sup> respectivamente (FAOSTAT, 2020) y también por debajo de los rendimientos potenciales alcanzados en ensayos bajo condiciones de agricultura protegida, en los que se han alcanzado producciones de hasta 109.5 ton ha<sup>-1</sup> año (Mendoza-Castillo *et al.*, 2017).

**Cuadro 1.** Rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) en los principales estados productores de higo en México.

Veracruz	Michoacán	Zacatecas	Puebla	Jalisco	Morelos	Hidalgo	Durango	Guanajuato
12	11.7	9.7	9.6	8.5	7.8	7.6	7.4	5.6

Fuente: SIAP, 2022.

Respecto a las variedades cultivadas en el país, de acuerdo con lo reportado por el SIAP (2020), predominan las variedades de “higo negro”, por ejemplo Black Mission y Brown Turkey, que ocupan el 78.2% de la superficie sembrada comparada con el 21.8% ocupada por variedades de “higo blanco” como son Calimyrna, Kadota, Tiger y Sierra; cuya producción se reporta principalmente en los estados de Baja California y Puebla. Cabe señalar que la mayoría de la producción se desarrolla en condiciones de campo abierto con bajas densidades de plantación; sin embargo ha comenzado el interés por establecer plantaciones en condiciones de agricultura protegida con sistemas de fertirriego y siembras en altas densidades (INTAGRI, 2020)

En el estado de Coahuila el cultivo ha venido cobrando importancia con proyectos impulsados por el gobierno del estado, que buscan la introducción del higo como un cultivo alternativo y con potencial productivo para la zona, estableciendo un programa piloto de 50 hectáreas (Gobierno de Coahuila, 2019) y con la meta de ampliar la superficie de plantación a 150 hectáreas para el año 2020 (El Heraldo de Saltillo, 2020).

## **I.2 Requerimientos edafoclimáticos**

La higuera presenta un ciclo de producción de entre 120-300 días (Ruiz-Corral *et al.*, 2013), se adapta bien a una amplia variedad de climas y suelos; siendo las mejores condiciones, las asociadas al clima mediterráneo, con verano cálido y seco e inviernos frescos y húmedos (El-Shazly *et al.*, 2014); la especie se desarrolla en un rango térmico de 4 – 38°C, con un óptimo de 18°C (Ruiz-Corral *et al.*, 2013) y aun cuando es un cultivo que presenta tolerancia a la sequía, el riego es necesario si lo que se busca son altos rendimientos, ya que deficiencias hídricas severas afectan de manera importante la producción e incluso puede hacer que la producción sea prácticamente nula; sin embargo, periodos prolongados de lluvia también pueden ser perjudiciales para la plantas, por lo que el manejo adecuado de dosis y frecuencia de riego son puntos cruciales en el manejo del cultivo (Melgarejo-Moreno, 1999).

En cuanto a suelos, la higuera se adapta bien a suelos profundos, de textura media, con buen drenaje y de buena fertilidad, tolera niveles de pH elevados hasta 8 - 8.5, con óptimo de 6.5; se trata de una especie moderadamente tolerante a salinidad lo que la vuelve atractiva y con potencial en zonas donde otras especies no pudieran ser

satisfactoriamente establecidas (Ruiz-Corral *et al.*, 2013); sin embargo, los conocimientos sobre el cultivo son escasos, especialmente si se trata de sistemas de cultivo intensivo (Melgarejo-Moreno, 1999; Mendoza-Castillo *et al.*, 2017).

### **I.3 Importancia nutricional y medicinal del higo**

Los frutos de *F. carica* han sido apreciados por su alto valor nutricional (Barolo *et al.*, 2014; Isa *et al.*, 2020) además de caracterizarse por presentar propiedades antioxidantes otorgadas por compuestos como polifenoles y antocianinas, presentes principalmente en variedades de piel oscura (Solomon *et al.*, 2006). Es importante señalar además que la piel del fruto se destaca por presentar gran potencial como fuente de aditivos alimentarios naturales como antioxidantes, conservantes, ingredientes funcionalizantes y nutraceuticos (Palmeira *et al.*, 2019).

Sin embargo, el fruto no es el único órgano de interés, ya que diferentes partes de la planta han sido empleados en la medicina tradicional en el tratamiento de enfermedades hepáticas, diabetes, asma, tos, úlceras, vómitos, dolores menstruales, enfermedades de la piel (Deepa *et al.*, 2018), lo que ha llevado a realizar múltiples estudios y ha confirmado la actividad antioxidante, anticancerígena, citotóxica, antiinflamatorias e hipolipidémicas de compuestos presentes en la planta como los flavonoles luteolina y quercetina (Badgujar *et al.*, 2014); esta última fue reportada con propiedades antioxidantes, neurológicas, antivirales, anticancerosas, antimicrobianas, antiinflamatorias, hepatoprotectoras, protectoras del sistema reproductivo y anti obesidad (Maalik *et al.*, 2014). En el látex que produce la planta se ha reportado también la presencia de diversos compuestos entre los que destacan fitoesteroles como  $\beta$ -sitosterol y lupeol; ácidos grasos principalmente saturados, pero también insaturados como el ácido linoleico y aminoácidos como la cisteína y la tirosina, todos con actividades farmacológicas potenciales (Oliveira *et al.*, 2010).

### **I.4 Los recursos de las zonas áridas y semiáridas**

Se estima que en el mundo las zonas secas cubren aproximadamente más de un tercio de la superficie terrestre y que hasta un 44 % de los sistemas de cultivo se encuentran establecidos en tierras secas, donde la falta de tecnología y una gestión de

riesgos inadecuada vuelve vulnerable tanto a la producción agrícola como a las poblaciones dependientes de dicha producción (FAO, 2020; UN, 2010).

Cuando por actividades humanas o medios naturales los recursos hídricos se ven contaminados se reduce la disponibilidad incrementando la presión sobre los recursos disponibles al intensificarse la demanda (Velmurugan *et al.*, 2020), aunado al efecto del cambio climático que se prevé impacte significativamente en los recursos disponibles en aguas superficiales y subterráneas intensificando la competencia por los recursos entre los distintos sectores (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2015) más aun considerando que la agricultura consume en promedio un 69% de las extracciones anuales de agua a nivel mundial, por lo que una inminente reducción de los recursos destinados al sector agrícola será necesaria para la reasignación a otros sectores de la sociedad (UNESCO, 2019).

Para el caso del estado de Coahuila, México, los recursos hídricos en el son destinados principalmente al sector agrícola y energético, que consumen el 43.7 y 42.7% de los recursos disponibles, respectivamente; mientras que los sectores público urbano e industrial consumen el 5.44% y 4.19%; la mayoría de dichos recursos se obtienen principalmente de acuíferos; en el estado de Coahuila se han definido 29 acuíferos, de los cuales en algunos casos presentan graves efectos de abatimiento y pérdida de la calidad del agua, como por ejemplo el acuífero denominado Saltillo-Ramos Arizpe (Gobierno de Coahuila, 2012).

## **I.5 Salinidad**

La salinidad refiere la presencia de altas concentraciones de sales solubles en un medio (Karan y Subudhi, 2012) ya sea en suelo o agua, con efectos negativos sobre el desarrollo de cultivos limitando de manera importante el rendimiento (Wang *et al.*, 2003); la presencia de sales solubles en la solución del suelo impacta en el potencial hídrico al modificar el potencial osmótico, acercando el potencial hídrico de la solución del suelo al potencial de las células de la raíz, dificultando y ralentizando la absorción de agua por las plantas y causando en casos graves un estrés por sequía , y obligando a la absorción de agua de manera activa, lo que implica un mayor gasto energético y un impacto en el crecimiento de la planta (Méndez-Espinoza y Vallejo Reyna, 2019; Munns, 2005) además del cambio en el componente osmótico del potencial hídrico, las sales pueden generar

deshidratación celular; toxicidad iónica; inhibición de la fotosíntesis (Taiz y Zeiger, 2002) y deficiencia de los nutrientes como N, Ca, K, P, Fe, Zn, etc. (Shrivastava y Kumar, 2015), además de efectos secundarios, especialmente estrés oxidativo que daña a los lípidos de las membranas, proteínas, ácidos nucleicos provocando fallas metabólicas (Yang y Guo, 2018; Zhu, 2016).

## **I.6 Sistema de raíces divididas**

La raíz es un componente fundamental que cumple múltiples funciones en la planta entre las que se incluyen principalmente la absorción de agua y nutrientes, la función de anclaje físico y órgano de almacenamiento además de estar involucrada en procesos de señalización para el ajuste de procesos en la parte aérea de la planta (Khan *et al.*, 2016) respondiendo de manera diferencial en función de las condiciones en las que se encuentre (Flores *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2007; Thomas *et al.*, 2020).

Bajo estas premisa se han realizado múltiples investigaciones de estrés de media raíz que implica la separación espacial de las raíces en dos o más segmentos, ya sea vertical u horizontalmente (Thomas *et al.*, 2020), los cuales reciben condiciones de manejo diferentes, entre las que destacan evaluaciones de estrés de media raíz por nutrientes, sequia o salinidad (Iqbal *et al.*, 2020) y en las que se reconocen características clave como por las citadas por Bazihizina *et al.*, (2012) quienes señalan puntos característicos del estrés por salinidad heterogénea, los potenciales hídricos en brotes son determinados por la salinidad de la zona de baja salinidad, así mismo, la absorción de agua se da principalmente en la zona con menores restricciones, es decir en la zona de baja salinidad y por último, el crecimiento de los brotes puede mantenerse incluso si una gran parte del sistema radicular está sometido a condiciones de alta salinidad, comparado con un sistema establecido en alta salinidad uniforme.

Diversos estudios en los que se expone a la planta a condiciones de estrés por sequía señalan que las técnicas como el secado parcial de raíces y el riego deficitario inician procesos de señalización que involucran principalmente ABA, causando una reducción de la conductancia estomática y transpiración, además de la disminución del área foliar y biomasa (Iqbal *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2013). Sin embargo, esta reducción en el

consumo hídrico no generaba una reducción del rendimiento, permitiendo incluso mejorar la calidad en la producción (Chamú *et al.*, 2011; López *et al.*, 2008).

Abbasov, (2013) reporta incrementos significativos en la productividad al utilizar un sistema de nutrición de raíz dividida en condiciones hidropónicas para cultivo de albahaca. Por otro lado los resultados obtenidos por (Flores *et al.*, 2002) al investigar la respuesta de plántulas de tomate en sistema de raíces divididas bajo condiciones de salinidad no uniforme, demuestran tolerancia a altos niveles de salinidad en una parte del sistema radical si la otra parte se encontraba expuesta a bajo nivel de salinidad, generando en la planta una respuesta compensatoria en la absorción de agua promoviendo una mayor absorción de agua en donde la raíz presentaba baja salinidad. En este sentido (Zhang *et al.*, 2019) señalaron incrementos en la expresión genética enfocada a la resistencia a la sal activados cuando se maneja salinidad heterogénea lo que deja de manifiesto la interacción entre las zonas de la raíz expuestas a alta y baja salinidad y la regulación conjunta de las respuestas de la raíz.

### **I.7 Factores limitantes en la productividad del cultivo de higo en México**

La producción de higo en México se lleva a cabo principalmente a campo abierto (SIAP, 2022) lo que conlleva problemas como alta incidencia de plagas y enfermedades, pudrición de frutos en época de lluvias, mal manejo de plantaciones y daños por heladas; condiciones que impactan directamente los rendimientos haciendo que estos se reduzcan y por consecuencia la rentabilidad del cultivo (Mendoza-Castillo *et al.*, 2017), esto aunado a la falta de información e investigación respecto a las demandas nutricionales que limitan el potencial productivo del cultivo (Mendoza-Castillo *et al.*, 2019).

Además otro aspecto importante es la elección adecuada de variedades en función de las condiciones edafoclimáticas y de mercado (Stover *et al.*, 2007). En cuanto a calidad, los higos son frutos frágiles y susceptibles a daño como agrietamiento lateral o al desgarre del extremo del ostiolo durante el desarrollo del fruto (Kong *et al.*, 2013; Stover *et al.*, 2007) por lo que el manejo pre y poscosecha son determinantes en la calidad del fruto producido; el uso de plaguicidas y los residuos de los mismos, son factores a considerar ya que impactan directamente en la calidad del fruto y genera limitantes si lo que se busca es un mercado extranjero (CESVMOR, 2015).

En términos generales la producción de higo en México, representa un enorme potencial como cultivo alternativo principalmente en zonas áridas y semiáridas del país en las que la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos, así como las condiciones climáticas pudieran ser factores limitantes para otros cultivos. No obstante, aún existe falta de información y conocimientos sobre la fenología, producción intensiva y respuesta eco fisiológica del cultivo de higo bajo las condiciones de zonas áridas y semiáridas, como las que caracterizan a los estados del norte del país; por lo que se precisa de información que permita realizar una adecuada elección de los cultivares a establecer en función de las características edafoclimáticas de la zona y de las características buscadas en el fruto (Stover *et al.*, 2007), así como de la elección de sistemas de producción adecuados que permitan el aumento de la productividad y calidad, que a su vez genere oportunidad comercial (Mendoza-Castillo *et al.*, 2017) siempre ligado a medidas de sanidad e inocuidad, aspectos fundamentales en cualquier sistemas de producción (CESVMOR, 2015).

En este sentido, la comprensión de la interacción entre factores ambientales y procesos fisiológicos de los cultivos facilita el mejoramiento de las prácticas agrícolas (riego, manejo de la luz, nutrición mineral, diseño de infraestructuras, etc.) con el objetivo de incrementar la productividad de los cultivos (Ammar *et al.*, 2020; Melgar y Lombardini, 2010) y establecer estrategias adicionales de manejo así como la incorporación de nuevas tecnologías, orientadas a un uso más eficiente de los recursos y mejoras en la eficiencia de los sistemas productivos (García-Mateos *et al.*, 2015).

En este contexto se destacan técnicas en las que se busca una reducción en el consumo hídrico, las cuales han permitido incrementar la productividad del agua sin generar impactos severos en el rendimiento (Geerts y Raes, 2009); con resultados favorables en diversos cultivos (Kong *et al.*, 2013; Sadras, 2009); sin embargo, la técnica de RDC se basa en la reducción de los aportes en fases de crecimiento de la planta que no sean considerados críticas y que pudieran afectar la producción y calidad de la cosecha.

Por otro lado, además de las técnicas de manejo de RDC en olivo (*Olea europaea* L.) en el que el secado parcial de raíces en combinación con el uso de agua salina impactó de manera positiva el rendimiento y calidad de las aceitunas, planteando de esta manera

estrategias de producción sostenibles a largo plazo evitando la acumulación excesiva de sal en el suelo (Ghrab *et al.* 2014); resultados similares a los obtenidos por Khaleghi *et al.*, (2020) quienes evaluaron en girasol la aplicación alterna de agua dulce y agua de mar diluida, en combinación con el secado parcial de raíces, permitiendo ahorro de hasta un 20% de agua dulce, mejorando la calidad del cultivo y reduciendo la acumulación de sales en la zona de raíces. En cultivo de vid su uso ha permitido reducir el vigor vegetativo excesivo en los brotes y el consumo de agua, manteniendo el rendimiento y mejorando la calidad de la fruta, con base en que las señalización originada en la raíz es la principal responsables de control de crecimiento y transpiración de la parte aérea (Dry y Loveys, 1998);

Las técnicas de manejo que emplean el sistema de raíces divididas se orientan a la búsqueda de generar una respuesta en la planta promovida por procesos de señalización dependientes de las condiciones a las que se encuentra sometida cada parte de la raíz, buscando promover un uso más eficiente del agua y nutrientes (Redwan *et al.*, 2017). Por otra parte la integración de datos obtenidos acerca de condiciones climáticas y del propio cultivo, en conjunto con la evaluación de variables eco fisiológicas permitirían establecer estrategias de manejo específicas para zonas agrícolas en particular (Melgar y Lombardini, 2010); en este sentido destacan herramientas como los dendrómetros, que brindan información que permiten realizar seguimiento y monitoreo del estado hídrico a fin de generar estrategias de manejo más adecuadas en función de los requerimientos hídricos, resultado de la demanda evapotranspirativa (Li *et al.*, 2020), por ejemplo en la programación de riegos en álamo (*Populus tomentosa*); en la detención de la aparición y gravedad de estrés hídrico en olivos maduros (Cuevas *et al.*, 2010; Fernández *et al.*, 2011).

El análisis de imágenes en agricultura cada día cobra más importancia en la agricultura de precisión continuando con la búsqueda de hacer un uso más eficiente de los recursos e incrementar la eficiencia de los sistemas productivos (García-Mateos *et al.*, 2015) esto gracias a las múltiples aplicaciones, como la estimación de rendimiento, del estado hídrico de las plantas (Lee *et al.*, 2010) o la obtención de información detallada sobre el crecimiento, salud del dosel vegetal y cobertura del suelo, etc., (Cai *et al.*, 2018; García-

Mateos *et al.*, 2015). Por ejemplo la estimación del rendimiento en cultivo de caña de azúcar (Sumesh *et al.*, 2021), maíz (Zhang *et al.*, 2020), monitoreo de biomasa en cebolla (Ballesteros *et al.*, 2018). La estimación del contenido de clorofila y carotenoides en cultivo de soya con base en el análisis de imágenes tomadas por teléfonos inteligentes (Rigon *et al.*, 2016) y la simulación del crecimiento de cultivos, que permitirían programar las prácticas agrícolas, administrar temporalmente los insumos, y al mismo tiempo incrementar la eficiencia en el sistema de producción (Lak *et al.*, 2019).

## II. JUSTIFICACIÓN

En este contexto, dado el potencial de mercado para el consumo nacional y exportación de frutos de higo, el interés regional y estatal por incrementar la superficie cultivada con higueras y la falta de conocimiento sobre el manejo hídrico y nutricional, en la presente propuesta, se pretende implementar un paquete tecnológico que permita mejorar la productividad del agua de riego y de los fertilizantes así como paliar el impacto negativo que podría generar el uso de aguas de calidad reducida por altos niveles de sal.

Por tanto se emplearon sensores ambientales e imágenes RGB con fines de caracterizar el desarrollo y la producción de plantas de higo conducidas en sistema de espaldera vertical bajo diferentes opciones de manejo de fertirriego considerando la división radical de la planta en dos compartimientos. En comparación con los cultivos establecidos en suelo o en sustratos para hidroponía, dicha propuesta facilitaría la opción de utilizar aguas con alto contenido en sales sin perjudicar al potencial productivo de la planta y ofrecería mayor flexibilidad de manejo de fertirriego para corregir desviaciones en la calidad de frutos para mercado de exportación.

### **III. HIPÓTESIS**

La división de raíces en dos compartimentos y su exposición a una solución de fertirriego con diferentes concentraciones de sal permite satisfacer las necesidades hídricas y nutricionales de la planta sin perjudicar su crecimiento, desarrollo y producción.

### **IV. OBJETIVOS**

#### **IV.1 Objetivo general**

Establecer y validar un nuevo paquete de manejo agronómico y de monitoreo de precisión en cultivo de higo para mejorar la productividad del fertirriego en las zonas semiáridas y áridas.

#### **IV.2 Objetivos específicos**

1. Caracterizar el desarrollo vegetativo y reproductivo del higo conducido en estructura de espaldera vertical.
2. Establecer un modelo de manejo preciso del fertirriego a partir de los términos del balance hídrico y la calidad del agua de drenaje.
3. Generar un modelo para dar seguimiento a la velocidad de crecimiento de la planta a partir de datos obtenidos de la evaluación de brotes y variables climáticas.
4. Generar un modelo para dar seguimiento a la velocidad de crecimiento del fruto a partir de mediciones del fruto y variables climáticas.

## **V. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **V.1 Ubicación del área de estudio**

El ensayo se llevó a cabo en una casa de malla sombra de 561 m<sup>2</sup> de superficie en las instalaciones del Departamento de Biociencias y Agrotecnología del CIQA-CONACYT, ubicado en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México; Coordenadas GPS: 25° 27' 38.458" N; 101° 58'08.00' O, a una elevación de 1500 msnm.

El clima en el sitio experimental se clasifica como BS0h el cual es un clima árido, semicálido (COPERES, 2020); de acuerdo con datos históricos del Servicio Meteorológico Nacional, (2020) se registra una temperatura media anual de 18.3°C y una precipitación media anual de 364.4 mm; vientos predominantes en dirección noreste a 22.5 km/h; la frecuencia de heladas es de 20 a 40 días en la parte norte-noreste y suroeste y de 40 a 60 días en el resto; los eventos de granizadas son escasos con un máximo de 2 días al año (Gobierno de Coahuila, 2020).

### **V.2 Material vegetal**

Los estudios se desarrollaron sobre cultivo de higo de la variedad 'Black Mission' de un año de edad con sistema radical dividido en dos compartimentos desde abril 2020, cada uno en una bolsa de polietileno negro de 45 litros, con mezcla de sustratos de zeolita, perlita y peatmoss en proporción volumen/volumen 1:1:3 respectivamente. El 18 de febrero de 2021 se realizó una poda de formación en la que se dejó un tallo principal de 1.75 m de altura.



**Figura 4.** Separación del sistema radicular en dos compartimentos y establecimiento del cultivo bajo cubierta de malla sombra.

### V.3 Nutrición del cultivo

La solución nutritiva utilizada fue la propuesta por (Melgarejo *et al.*, 2007) tal como viene detallado en los cuadros 2, junto con las concentraciones de micronutrientes reportadas en el cuadro 3.

**Cuadro 2.** Concentración de macronutrientes en solución nutritiva de referencia para cultivo de higo.

Aniones (mmol/l)					Cationes (mmol/l)					pH
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	
12	2	2	0.5	0	0.5	7.5	4	2	0	--

**Cuadro 3.** Concentración de micronutrientes en solución nutritiva

Micronutrientes (μmol/l)					
Fe	Zinc	Mn	Cu	Boro	Mo
12.50	0.62	3.63	0.34	11.82	0.06

Los fertilizantes comerciales utilizados para preparar una solución madre concentrada 20 veces se listan en el cuadro 4. Se ajustó la tasa de inyección a 50 l/m<sup>3</sup> y se utilizó ácido

sulfúrico como fuente para regular el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva a valores de 6.0 y 3.0 dS m<sup>-1</sup> respectivamente.

**Cuadro 4.** Fertilizantes comerciales y aportes para formulación de solución madre.

Tanque No.	Volumen	Fertilizante	Grado comercial	g L <sup>-1</sup>
#1	1000 L	Nitrato de calcio	(15.5-0-0 26CaO)	3.83
#2	1000 L	Nitrato potásico	(13.5-0-45)	10.36
		Nitrato amónico	(31-4-0 16MgO)	1.16
		Nitrato de magnesio	(11-0-0- 16MgO)	1.15
		Fosfato monoamónico	(12-61-0)	3.00
		Fosfato mono potásico	(0-52-34)	1.94
		Micronutrientes		0.37
Tanque	Volumen	Fertilizante	Pureza y densidad	mL L <sup>-1</sup>
#3	500 L	Ácido sulfúrico	93%; 1.84 g cm <sup>-3</sup>	4.55

#### V.4 Método de riego

La lamina de riego se definió considerando la capacidad de retención de agua del sustrato y la evapotranspiración real del cultivo, teniendo en cuenta una fracción de lavado, para mantener las condiciones de pH y CE requeridas en los tratamientos, aplicando en promedio 3 riegos al día. Los aportes de riegos se realizaron mediante el equipo Netajet y el programador NMC-PROL marca NETAFIM.

La estimación de la ETo se realizó a partir de los datos de variables climáticas (temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento) registrados mediante estación meteorológica de la marca Davis Vantage Vue que fue instalada al interior de la casa de malla sombra.

#### V.5 Control de plagas y enfermedades

Para la prevención de enfermedades fúngicas se realizaron aplicaciones semanales de hidróxido cúprico al 23.46% a dosis de 3 ml L<sup>-1</sup> entre el 15 de mayo y el 25 de agosto del 2021. Para el control de hongos del género *Alternaria* se realizaron dos aplicaciones de Boscalid 25.2% pyraclostrobin 12.8% a dosis de 3 g L<sup>-1</sup>, a intervalo de 15

días entre una y otra aplicación. Para control de cochinilla harinosa se realizaron 2 aplicaciones de spirotetramat 15%, al inicio y mitad del experimento a dosis de 0.75 L ha<sup>-1</sup>. El control de ácaros se realizó una aplicación de cipermetrina 21.4% . Se realizaron aplicaciones de aminoácidos a intervalos de 15 días a partir de 15 de mayo del 2021 al 15 de julio del 2021 a dosis de 3 g L<sup>-1</sup>.

## **V.6 Tutorado**

El crecimiento de la planta se limitó en los primeros 25 cm desde la base del tronco y los brotes emitidos sobre esta altura fueron guiados mediante cuatro hilos de rafia por planta y anillos plásticos a fin de evitar que las ramas crecieran en dirección al suelo .

## **V.7 Diseño agronómico de la parcela**

El ensayo constó de 56 plantas repartidas en 4 filas de 14 plantas cada una. El marco de plantación es de 3.66 m entre filas y 2 m entre plantas de la misma fila para 7.32 m<sup>2</sup> por planta. El manejo de fertirriego se realizó mediante un autómata de inyección de fertilizantes “Netajet” equipado con sistema de control de pH y conductividad eléctrica. La distribución del agua se realizó mediante tuberías de PVC y mangueras de polietileno con emisores por goteo sobre línea con caudal nominal de 4 l/h, considerando un gotero en cada compartimento de raíces. El día 22 de junio de 2021 se añadió un gotero adicional de 4 lph en cada compartimento a fin de reducir el intervalo de tiempo entre el riego aplicado entre tratamientos.

## **V.8 Tratamientos**

La consideración de 2 niveles de conductividad eléctrica (3 y 6 dS m<sup>-1</sup>) en la solución de riego y su aplicación por separado a 2 compartimentos receptores del sistema radicular de la planta permitió diferenciar 4 tratamientos que fueron definidos como sigue:

- T1: La planta recibe el 100% de sus necesidades hídricas como solución estándar de fertirriego (CE = 3 dS/m) que alimenta ambos compartimentos de raíces.
- T2: La planta recibe el 50% de sus necesidades hídricas solución estándar de fertirriego (CE = 3 dS/m) que alimenta el primer compartimento de raíces y el otro 50% como agua de pozo (CE = 1.8 dS/m) que alimenta el segundo compartimento.

- T3: La planta recibe el 50% de sus necesidades hídricas como solución de fertirriego concentrada 2 veces (CE = 6 dS/m) que alimenta el primer compartimento de raíces y el otro 50% como agua de pozo (CE = 1.8 dS/m) que alimenta el segundo compartimento.
- T4: La planta recibe el 100% de sus necesidades hídricas como solución de fertirriego concentrada 2 veces (CE = 6 dS/m) que alimenta a ambos compartimentos de raíces.

Cada tratamiento fue un grupo de 12 plantas repartidas en 3 repeticiones distribuidas según un diseño experimental de bloques al azar. Cada unidad experimental constó de 4 plantas de los cuales las 2 centrales fueron consideradas para monitoreo y colecta de datos.

**Cuadro 5.** Tratamientos evaluados en el experimento

Tratamiento	Conductividad eléctrica de la solución de riego	
	Compartimento A	Compartimento B
T1	3 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>	3 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>
T2	1.8 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>	3 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>
T3	1.8 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>	6 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>
T4	6 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>	6 dS m <sup>-1</sup> ± 0.2 dS m <sup>-1</sup>

## V.9 Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar en el que se consideraron 3 bloques con 4 repeticiones por bloque dando como resultado 12 unidades experimentales por tratamiento de las cuales 6 unidades experimentales, correspondientes a filas centrales, fueron consideradas para realizar sobre estas las evaluaciones.

## V.10 Variables climáticas

Se realizó el registro de variables climáticas al interior y exterior de la casa de malla sombra, mediante estaciones meteorológicas de la marca Davis-Vantage Vue y Campbell

Scientifique, respectivamente. Los datos fueron procesados y seleccionadas las variables requeridas para la estimación de la evapotranspiración potencial y para dar seguimiento a la acumulación de grados de horas de crecimiento.

### **V.11 Grados hora de crecimiento**

Para determinar la acumulación de Grados hora de crecimiento se utilizó la fórmula planteada por (Anderson *et al.*, 1986) con la modificación en la temperatura base de crecimiento considerando 8°C para higuera, óptima de 25°C y temperatura crítica de 36°C (Souza *et al.*, 2009).

Fórmula utilizada para temperaturas base y óptima:

$$GDH = [(25^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C})/2](1 + \cos(\pi + \pi(\text{temperatura horaria} - 8^{\circ}\text{C})/(25^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C})))$$

Para temperaturas por encima de la temperatura óptima, se aplicó una fórmula que considera además una temperatura crítica (36°C).

$$GDH = (25^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C})(1 + \cos(\pi/2 + \pi/2(\text{temperatura horaria} - 25^{\circ}\text{C})/(36^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})))$$

### **V.12 Volumen de riego y drenaje**

Para la determinación del volumen de riego y drenaje se instalaron cuatro caudalímetros de pulsos por planta, dos dedicados al registro de la entrada de agua por riego y dos para registrar las pérdidas de agua por drenaje, en tres plantas por tratamiento. Se emplearon un total de 48 pluviómetros, conectados a dos dataloggers de la marca Campbell Scientific, que almacenaban cada 5 minutos el número total de pulsos registrados en el intervalo de tiempo, para la determinación del volumen de riego y drenaje se utilizó el coeficiente calculado en la calibración para cada uno de los pluviómetros.

### **V.13 Caracterización de la solución de drenaje**

Para la caracterización de la composición química de la solución de drenaje se colectaron muestras para cada compartimento, en tres plantas por tratamiento desde bandejas de drenaje, en las que se determinó pH y conductividad eléctrica con un equipo

HANNA Combo pH y EC, así como la concentración de los iones  $\text{NO}_3$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , utilizando medidores LAQUA twin Horiba a intervalos de 15 días.

## **V.14 Variables biométricas en las plantas**

### **V.14.1 Crecimiento del diámetro del tallo y longitud de brotes**

Se realizaron mediciones semanales en 3 plantas por tratamiento del diámetro del tronco, a 20 cm de su base utilizando un vernier Digital, en puntos donde no existiera interferencia de ramas, hinchazones nodales o protuberancias corticales que pudieran interferir con las mediciones. Se generaron además registros de las variaciones micro morfométricas del tronco a 20 cm de altura partiendo desde la base del tronco, mediante sensores de desplazamiento lineal e inducción diferencial (LVDT, Solartron Metrology, Bognor Regis, UK, modelo DF  $\pm 2.5$  mm, precisión  $\pm 10$   $\mu\text{m}$ ), ubicados en portasensores contruidos con Invar (aleación de Ni y Fe de coeficiente de dilatación térmica cercano a cero) y aluminio (Requena Co., España, modelo R-150 mm).

La longitud de brote se determinó semanalmente en 6 plantas por tratamiento, a partir de que el brote registró una longitud de 5 cm y hasta que se realizó el despunte de brotes, la medición se realizó manualmente utilizando cinta métrica considerando la longitud del brote como la distancia desde la base del mismo a la yema terminal.

### **V.14.2 Crecimiento del fruto**

Se realizaron 3 determinaciones por semana del diámetro ecuatorial (anchura) y polar (longitud) del fruto, en 12 frutos de 3 plantas diferentes por tratamiento utilizando un vernier Digital, a partir de que los frutos registraron un diámetro ecuatorial de  $5 \pm 0.9$  mm y hasta la cosecha.

### **V.14.3 Adquisición de imágenes del fruto**

Para la adquisición de las imágenes se utilizó un módulo de cámara Raspberry Pi V2 8 megapíxeles 1080P para Raspberry Pi 4, instalada a una distancia de 15 cm del fruto monitoreado en el tratamiento testigo, del cual se tomaron 3 fotografías por día, a

intervalo de 3 h entre las 7:00 h y las 19:00 h, las cuales eran almacenadas en una tarjeta micro SD.

### **V.15 Procesamiento de imágenes**

Las imágenes fueron procesadas en el software R 4.0 (R Core Team, 2021) utilizando las librerías “EBImage” (Pau *et al.*, 2010) y “tidyverse” (Wickham *et al.*, 2019) para segmentación y obtención de parámetros de las imágenes. Los datos obtenidos para la estimación del crecimiento del fruto se contrastaron con los valores reales obtenidos de mediciones en el fruto monitoreado.

### **V.16 Numero de frutos**

Se realizó un conteo semanal en 3 plantas por tratamiento del incremento en el número de frutos por planta; los frutos considerados debían registrar un diámetro ecuatorial superior a los 5 mm.

Se realizó además el conteo del número de frutos cosechados por planta, en los que se determinó el peso empleando una balanza digital. La recolección se realizó tres veces por semana entre el 5 de julio y el 26 de noviembre de 2021.

### **V.17 Intercambio gaseoso**

Como parámetros de intercambio gaseoso que se midieron fueron: tasa fotosintética, tasa de transpiración y conductancia estomática. Las mediciones se realizaron con un aparato portátil para medición de intercambios gaseosos de la marca LiCor modelo Li6400XT (LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, E. U.), en hojas de la parte intermedia del brote, sanas, bien desarrolladas y expuestas al sol. Se consideraron 5 hojas por tratamiento, evaluadas en plantas diferentes. Las mediciones se realizaron al medio día solar entre las 12:00 y 14:00 h del día. El procedimiento a seguir fue: colocar la hoja dentro de la cámara y una vez cerrada esperar el tiempo necesario para estabilizar las tasas de intercambio para luego registrar los datos de conductancia estomática ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y tasa fotosintética ( $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Las determinaciones para intercambio gaseoso se realizarán en 4 fechas y una para evolución durante el día 27 de octubre del 2021.

## **V.18 Estado hídrico en las plantas**

### **V.18.1 Potencial hídrico del tallo**

Para la determinación del potencial hídrico del tallo al medio día se evaluaron 4 hojas por tratamiento, entre las 13:00 – 14:00h, momento de la máxima demanda de agua por evapotranspiración en una cámara de presión tipo Scholander (Plant Water Status Console, Model 3115). Se consideraron hojas sanas, completamente desarrolladas, sin daños físicos y sin deficiencias nutricionales aparentes, las cuales fueron encerradas en bolsas herméticas de aluminio durante un mínimo de 90 minutos antes de tomar la lectura. Posteriormente, se retiró la hoja con ayuda de una cuchilla afilada y el látex que exuda resultado de la escisión fue secado con papel absorbente, se procedió a colocar la hoja dentro de la cámara y a presurizar a una velocidad de  $0.02 \text{ MPa s}^{-1}$  hasta observar un flujo constante y sin coloración blanquecina en los vasos del xilema.

### **V.18.2 Variaciones micro morfométricas del diámetro del tronco**

Para la determinación de las variaciones micro morfométricas del tronco se utilizaron sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal (LVDT) de alta precisión, dendrómetros, instalados en 3 plantas por tratamiento a 20 cm del nivel del suelo en el tallo principal. Los sensores LVDT se montaron en porta sensores construidos de "invar", una aleación de hierro y níquel con mínima expansión térmica (Lamacque *et al.*, 2019). Orientados en dirección norte y unidos al tallo de las plantas mediante bandas elásticas y la aguja del sensor será fijada al tallo de la planta. Las lecturas de las variaciones del diámetro del troco se realizarán cada 5 segundos, recopilando promedios cada 5 minutos en un datalogger CR1000 Campbell Scientific. A partir de los datos obtenidos se calcularon los índices tradicionales sobre estado hídrico, la contracción máxima diaria (MDS) tasa de crecimiento del tallo (SGR), diámetro máximo del tallo (MXSD) y diámetro mínimo del tallo (MNSD) y la intensidad de señal de la MDS.

## **V.19 Parámetros poscosecha**

### **V.19.1 Calibre del fruto**

Se tomaron medidas del diámetro ecuatorial y polar en 12 frutos por tratamiento utilizando un vernier digital, las mediciones se realizaron a intervalo semanal desde la tercera semana del inicio de la cosecha y hasta el final del experimento.

### **V.19.2 Contenido de sólidos solubles totales (SST)**

El contenido de sólidos solubles totales se determinó a partir del jugo obtenido para tres muestras compuestas en la que se emplearon 5 frutos por muestra, colocando una gota del jugo en un refractómetro digital marca Hanna (mod. HI 96801) calibrado previamente con agua destilada, el resultado se reportó como grados Brix.

### **V.19.3 pH en el jugo**

Para determinar el pH en el jugo de frutos se molieron en procesador de alimentos 5 frutos para formar una muestra compuesta de la cual se filtró el jugo, el cual se transfirió a un vaso de precipitados y se le colocó el electrodo del potenciómetro (Thermo Fisher Scientific), calibrado previamente con soluciones estándar de pH en 4.7 y 10.

### **V.19.4 Densidad del fruto**

Para determinar densidad de frutos se evaluó peso y se midió volumen en 15 frutos por tratamiento. El peso fresco se determinó mediante una balanza digital (OHAUS® CS Series) y la determinación de volumen del fruto se midió con base en la cantidad de agua desplazada por el fruto empleando una probeta graduada de 500 mL.

### **V.19.5 Daño por agrietamiento lateral de la piel y daño en el ostiolo**

Se realizó la evaluación semanal de 15 frutos por tratamiento en los que se evaluó la escala de daño en el agrietamiento de la piel y daño en el ostiolo del fruto. Las escalas de daño consideradas para la evaluación son las utilizadas por en Kong *et al.*, (2013).

## **V.20 Análisis estadístico**

Los datos obtenidos de las variables evaluadas se sometieron a análisis de varianza y comparación de medias LSD ( $P \leq 0.05$ ), el análisis de datos de tipo ordinal se sometió a la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ( $\alpha = 0.05$ ) el análisis estadístico se realizó mediante el software estadístico Infostat versión 2020, (Di Rienzo *et al.*, 2020) considerando un diseño experimental de bloques al azar.

## VI. RESULTADOS

### VI.1 Variables climáticas

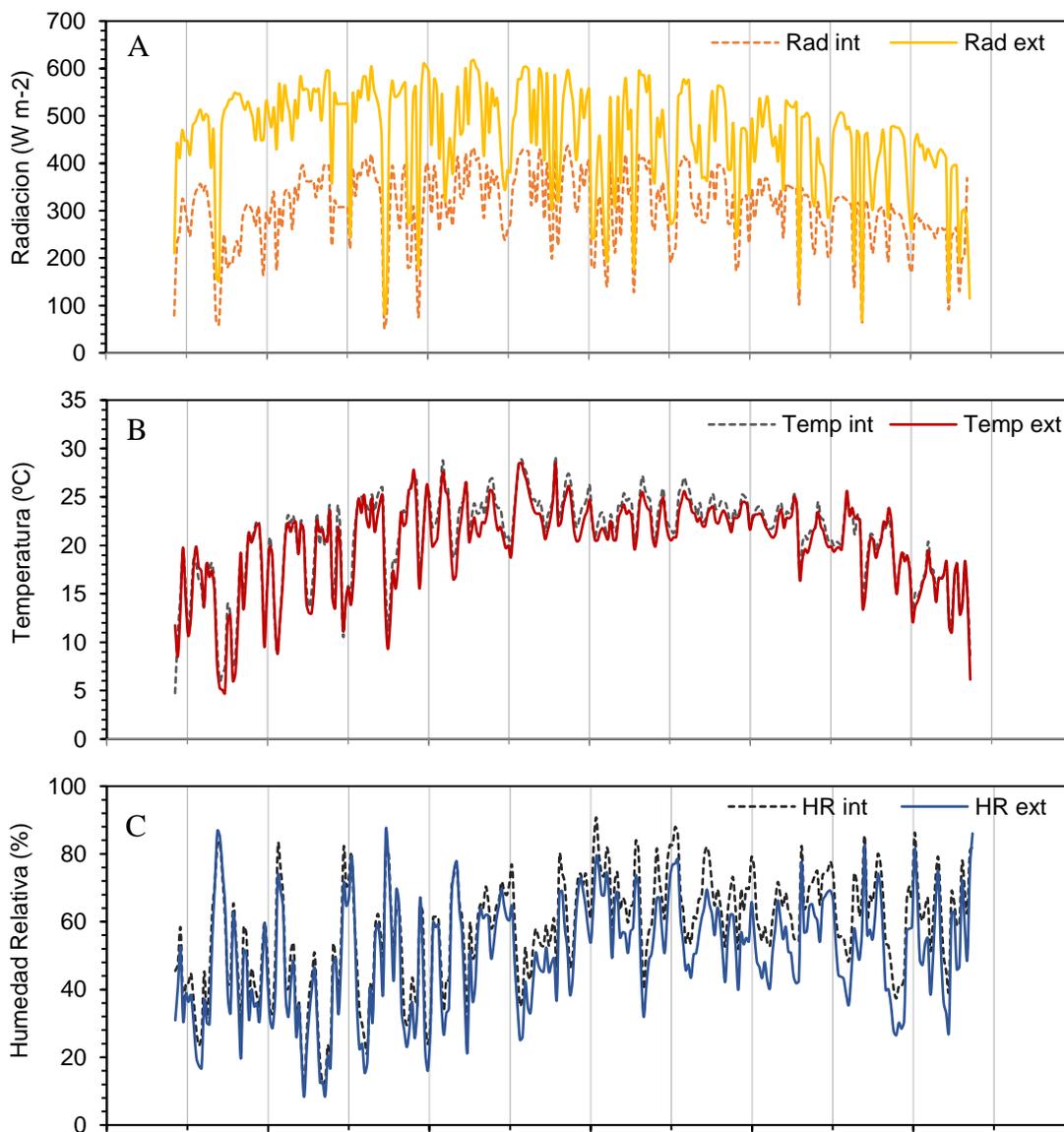
La Figura 5 presenta los valores promedio diarios de las principales variables climáticas registradas al interior y exterior de la casa de malla sombra o “CMS” para el periodo comprendiendo entre el 1 de febrero y el 26 de noviembre del año 2021. Los valores de máxima radiación estacional se presentaron el día 20 de mayo con un valor promedio diario de  $458.1 \text{ W m}^{-2}$  al exterior y de  $304.3 \text{ W m}^{-2}$  al interior de la CMS con lo cual resulta que la cubierta de malla interceptó un 34% de la radiación incidente (Figura 5A).

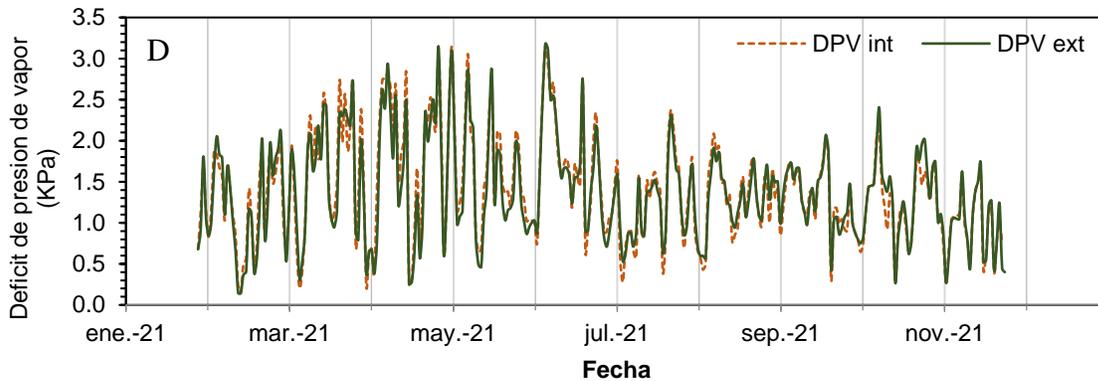
Los valores de temperatura promedio diario mostraron un incremento progresivo desde enero hasta junio llegando a marcar valores máximos de  $29.1$  y  $28.5^{\circ}\text{C}$  al interior y exterior de la CMS respectivamente. A partir de julio los valores de temperatura mostraron un descenso gradual hasta principios de octubre para luego sufrir un descenso acentuado entre octubre y noviembre. Las temperaturas mínimas fueron registradas en la segunda semana del mes de febrero con valores de  $4.8$  y  $4.7^{\circ}\text{C}$  al interior y exterior de la CMS respectivamente. En este mismo contexto la malla sombra permitió mantener la temperatura al interior por encima de los valores registrados al exterior de la CMS en más de un 17.7% cuando las temperaturas fueron inferiores o iguales a los  $12^{\circ}\text{C}$  (Figura 5B).

La humedad relativa (HR) presentó un comportamiento característico inversamente proporcional a la temperatura con valores máximos de 90.8% y 86.7% al interior y exterior de la CMS, respectivamente; en contraste los valores mínimos de 8.3% fueron similares tanto para interior como para exterior tal como se observó a partir de los datos colectados en la segunda quincena del mes de marzo. Los valores registrados al exterior de la CMS fueron en promedio 15% inferiores a los valores registrados al interior (Figura 5C).

Los valores de déficit de presión de vapor “DPV” registraron un incremento progresivo desde el inicio de la temporada hasta registrar los valores máximo en el mes de junio, posteriormente se registra un descenso brusco en los valores en el mes de julio con una ligera recuperación en el mes de agosto, sin embargo, a partir de este mes los valores tienden a ser cada vez menores como consecuencia de una disminución en los valores de temperatura y un incremento en la humedad relativa.

Los valores máximos de déficit de presión de vapor se registraron en la cuarta semana del mes de abril y segunda semana del mes de junio, con 3.4 y 3.2 KPa al interior y exterior de la casa sombra, respectivamente. En este contexto considerando el periodo de registro, únicamente en 21 días se registraron valores promedio diarios de DPV superiores a los 2.5 KPa y en 19 días valores inferiores a los 0.5 KPa al interior de la casa sombra (Figura 5D).





**Figura 5.** Evolución de las principales variables climáticas al interior y exterior de la casa de sombra ubicada en el Campo Experimental del DBA-CIQA en el ciclo 2021 en cultivo de higuera. A) Radiación solar, B) Temperatura del aire, C) Humedad Relativa y D) déficit de presión de vapor.

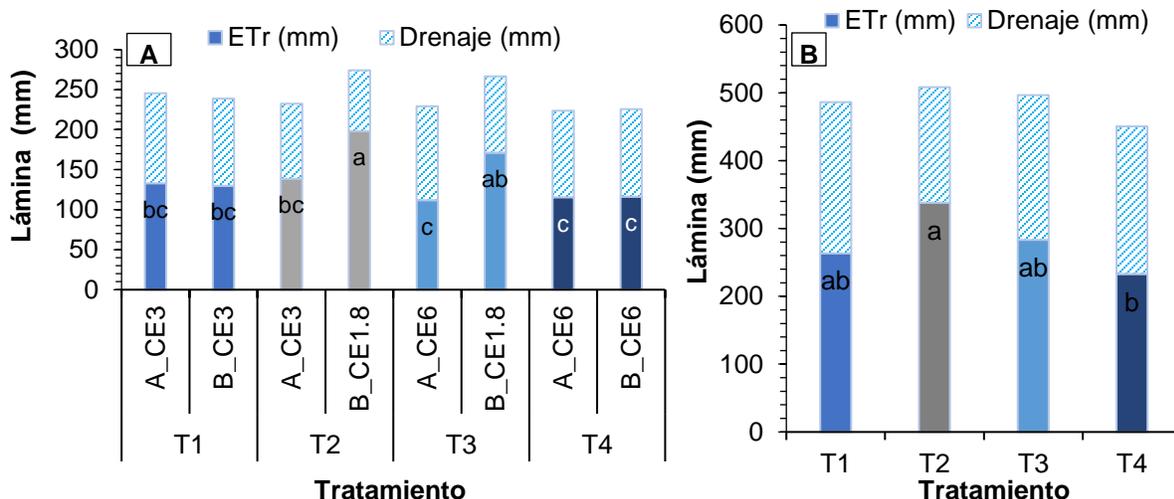
## VI.2 Balance hídrico por compartimento

La Figura 6 presenta los datos de balance hídrico por tratamiento y compartimento, en donde el patrón de color sólido corresponde a los datos de evapotranspiración real y el patrón en trama representa a los datos de drenaje. El conjunto de ambas variables representa el total de agua aportada entre el primero de abril y el primero de noviembre de 2021.

En la figura 6A podemos apreciar un gasto de agua (ETr + drenaje) similar entre los compartimentos de todos los tratamientos a excepción de los compartimentos “B” de los tratamientos T2 y T3 en los cuales se registró un mayor consumo de agua por evapotranspiración con valores significativamente superiores en un 17.9% y 16.4% a los valores colectados bajo riego con solución nutritiva cuya CE fue siempre superior a la CEa. En términos de ETr los valores más altos se registraron en el compartimento de baja CE en el T2, y los valores mínimos de ETr se presentaron en los compartimentos salinos del T3 y T4. La contribución del consumo de agua a la ETr de la planta fue superior desde el compartimento B (baja salinidad) respecto al compartimento A con un 42.7% y un 53.0% para los tratamientos T2 y T3 respectivamente.

En términos de balance hídrico por tratamiento, la máxima lámina de evapotranspiración real producida entre abril y noviembre se registró en el tratamiento T2, seguido por el T3, T1 y T4 con valores de 337.9, 283.3, 263.7 y 232.8 mm respectivamente (Figura 6B) . No

obstante, la diferencia estadísticamente significativa se detectó solo entre los tratamientos T2 y T4.

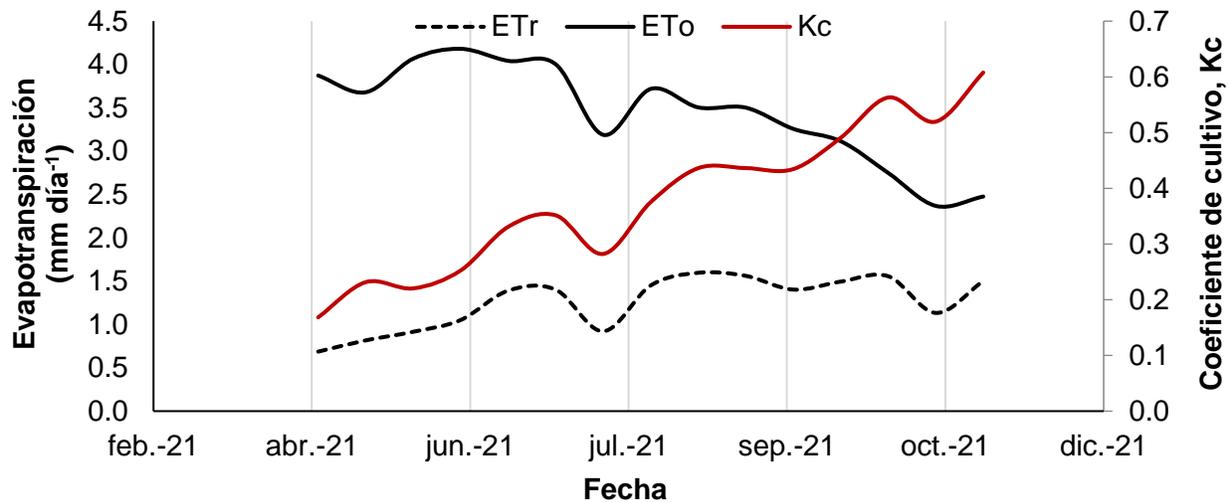


**Figura 6.** Balance hídrico por compartimento (A) y tratamiento (B), considerando al periodo entre el 1 de abril y el 1 de noviembre del 2021. El patrón de color sólido corresponde a los datos de evapotranspiración real y el patrón en trama representa a los datos de drenaje. El conjunto de ambas variables representa el total aportado de agua de riego.

Los registros de la evapotranspiración real del cultivo “ETr” junto con la estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) por medio de la ecuación de FAO-Penman-Monteith permitió determinar la evolución del coeficiente de cultivo (Kc) calculado para el tratamiento testigo entre el 1 de abril y 12 de noviembre de 2021 (Figura 7). La ETo registró valores máximos en la segunda quincena del mes de mayo, con valor promedio de 4.18 mm día<sup>-1</sup>, posteriormente la tendencia fue a disminuir hasta registrar el valor mínimo de 2.37 mm día<sup>-1</sup> en la segunda quincena del mes de octubre.

La ETr presentó un incremento constante hasta la segunda quincena del mes de junio, para luego registrar un descenso considerable del orden de un 34.24% respecto a la quincena anterior. Este cambio fue provocado por el incremento en la humedad relativa y una disminución en los valores de la radiación y del DPV. Los valores mínimos y máximos de la ETr de 0.6 y 1.6 mm día<sup>-1</sup> se registraron en abril y agosto respectivamente. El coeficiente de cultivo presentó un patrón de comportamiento similar al de la ETc con

un incremento constante debido no solo al aumento en la demanda hídrica por el cultivo, sino también al descenso en valores de la ETo. El valor máximo calculado para Kc fue de 0.61 en la primera quincena del mes de noviembre y el mínimo de 0.17 en los primeros 15 días del mes de abril.

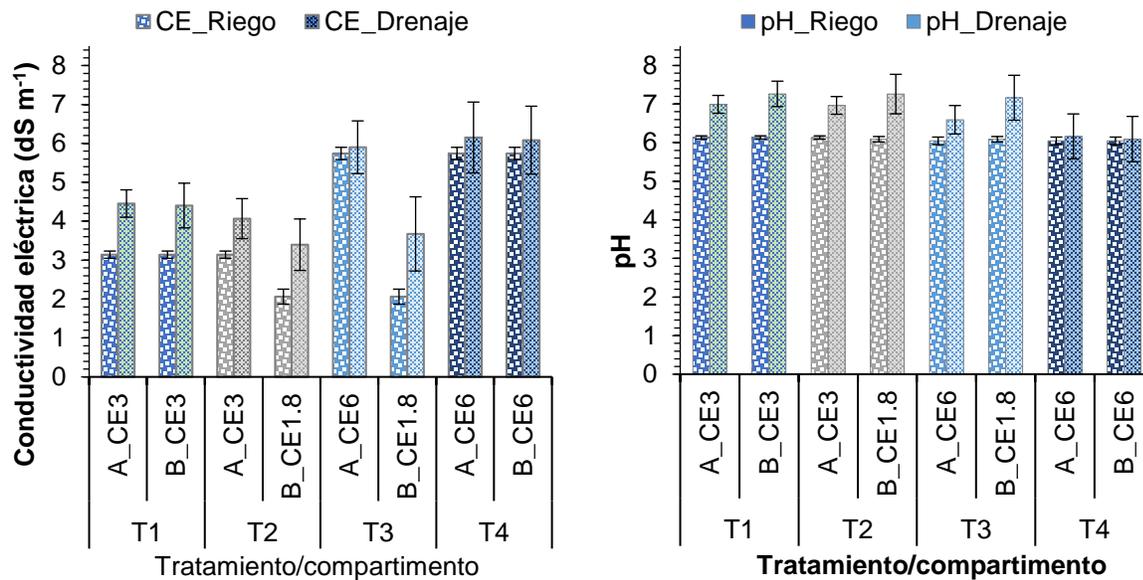


**Figura 7.** Evapotranspiración de referencia calculada mediante la fórmula FAO-Penman-Monteith al interior de la casa sombra, evapotranspiración real de cultivo y coeficiente de cultivo calculado para el tratamiento testigo, valores promedio a intervalo de 15 días.

### VI.3 Conductividad eléctrica y pH de riego y drenaje

La figura 8 muestra los valores promedio de conductividad eléctrica (CE) y de pH en agua de riego y drenaje por compartimento y tratamiento durante el periodo experimental. Los valores de pH y CE en la solución de riego se mantuvieron alrededor de los valores esperados en función de la mezcla de fertilizantes con el agua de riego. La conductividad eléctrica del agua de drenaje “CEd” en el tratamiento T1 supero la CE del agua de riego “CEa” por 1.3 dS m<sup>-1</sup> en promedio para ambos compartimentos; para T2 los incrementos promedio en la CEd fueron de 0.9 y 1.3 dS m<sup>-1</sup> superiores a la CEa para los compartimentos que recibían 3 y 1.8 dS m<sup>-1</sup> respectivamente.

En el T3 el incremento “ $\Delta$ CE” fue de 1.6 dS m<sup>-1</sup> en el compartimento que recibía 1.8 dS m<sup>-1</sup> de CE y 0.2 dS m<sup>-1</sup> en el compartimento salino “A\_CE3”.



**Figura 8.** Valores promedio de CE (A) (izquierda) Y pH (B) (derecha) en aguas de riego y drenaje registrados durante el ensayo, para los tratamientos de manejo de fertirriego. Los prefijos A y B corresponden a los dos compartimentos de raíces en cada planta. El agua de pozo de CE de 1.8 dS/m fue siempre aportada al compartimento B de los tratamientos T2 y T3.

#### VI.4 Potencial hídrico

Se realizaron 12 evaluaciones de potencial hídrico del tallo al medio día entre el 4 de mayo y el 27 de octubre del 2021, en 5 de las cuales no se presentaron diferencias estadísticamente significativas; sin embargo, en el resto de las evaluaciones estas diferencias si se detectaron, lo que demuestra una respuesta de las plantas a los tratamientos aplicados reflejada en los cambios en el potencial hídrico de la planta, con una tendencia inversamente proporcional a la CE media de compartimentos de la solución nutritiva.

Los valores máximos de potencial hídrico del tallo se registraron el día 5 de agosto para todos los tratamientos y sin diferencia estadísticamente significativa entre tratamientos, un incremento en los valores de potencial asociada a condiciones climáticas, un descenso en la temperatura respecto a los días previos, un incremento en la HR y

disminución en el DPV. Los valores mínimos para la mayoría de los tratamientos se presentaron el día 8 de junio, con diferencias estadísticamente significativas cuando se compara a T2 con los tratamientos T3 y T4. Sin embargo; los valores mínimos registrados no se encuentran por debajo de los límites en los que se consideraría a una planta de higo como estresada por una deficiencia hídrica.

Las diferencias estadísticamente significativas se presentaron principalmente entre los tratamientos 2 y 4 de la misma manera que ocurrió con la evapotranspiración, registrando los valores mínimos en T4 y los máximos en T2 esta tendencia se mantuvo en las fechas que se registraron diferencias estadísticamente significativas. Las diferencias entre una fecha y otra estuvieron principalmente en dependencia de las condiciones climáticas que prevalecían el día y momento de la medición.

**Cuadro 6.** Potencial hídrico del tallo en higuera, durante el ciclo de cultivo, como respuesta a 4 tratamientos de manejo del fertirriego con diferentes niveles de salinidad (T1 3dS m<sup>-1</sup> - 3dS m<sup>-1</sup>, T2 1.8dS m<sup>-1</sup> - 3dS m<sup>-1</sup>, T3 1.8dS m<sup>-1</sup> - 6dS m<sup>-1</sup>, T4 6dS m<sup>-1</sup> - 6dS m<sup>-1</sup>) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas.

Fecha	Potencial hídrico del tallo al medio día (MPa)			
	Tratamientos			
	T1	T2	T3	T4
<b>4-may.-21</b>	-0.69 ab	-0.68 a	-0.66 a	-0.89 b
<b>12-may.-21</b>	-0.60 ab	-0.52 a	-0.54 a	-0.68 b
<b>27-may.-21</b>	-0.70 a	-0.71 a	-0.74 a	-0.73 a
<b>8-jun.-21</b>	-0.74 ab	-0.58 a	-0.94 b	-0.93 b
<b>24-jun.-21</b>	-0.58 a	-0.57 a	-0.58 a	-0.62 a
<b>15-jul.-21</b>	-0.70 a	-0.59 a	-0.64 a	-0.65 a
<b>5-ago.-21</b>	-0.44 a	-0.42 a	-0.45 a	-0.50 a
<b>12-ago.-21</b>	-0.54 a	-0.52 a	-0.55 ab	-0.67 b
<b>1-sep.-21</b>	-0.76 bc	-0.62 a	-0.66 ab	-0.81 c
<b>7-oct.-21</b>	-0.59 ab	-0.54 a	-0.64 bc	-0.66 c
<b>22-oct.-21</b>	-0.63 b	-0.56 a	-0.60 b	-0.69 c

**27-oct.-21**

-0.62 a

-0.58 a

-0.60 a

-0.61 a

---

## **VI.5 Evolución del potencial hídrico**

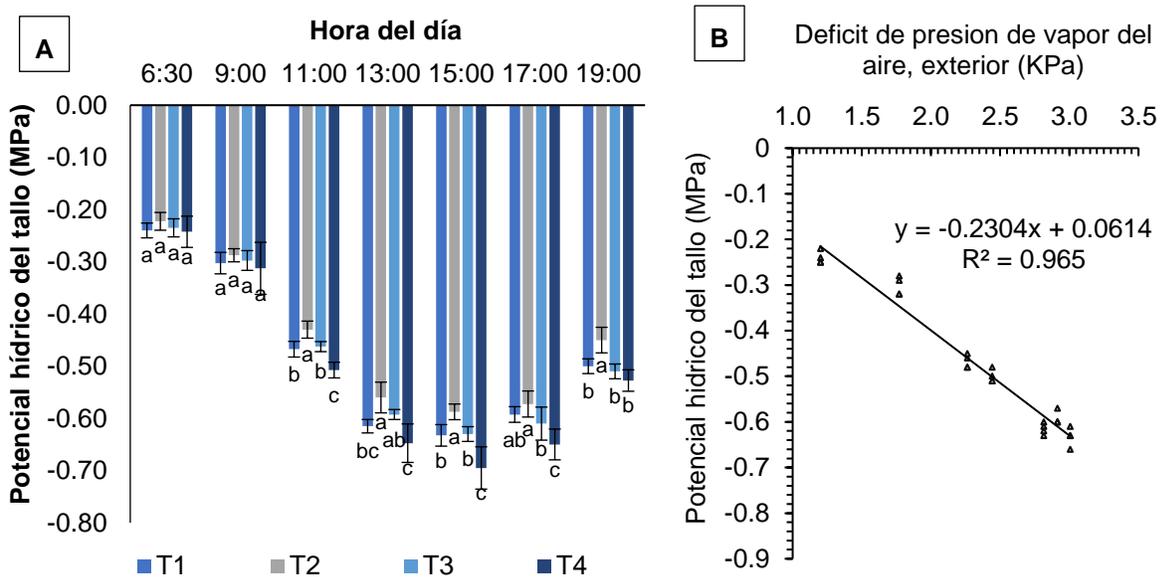
La figura 9A presenta la evolución del potencial hídrico del tallo durante el día 27 de octubre del 2021, en la cual se muestra el comportamiento del estado hídrico de las plantas de higuera a lo largo del día; con los valores máximos de potencial al alba y una disminución conforme se incrementaba la demanda evapotranspirativa, hasta alcanzar valores mínimos alrededor de las 15:00 h, para un posterior incremento en los valores hacia la última evaluación pero sin llegar a registrar valores como los obtenidos en la primera o segunda lectura del día. Encontrando una estrecha relación entre el estado hídrico de la planta y el déficit de presión de vapor del aire, variable que mejor correlaciono, como lo muestra la figura 9B para el tratamiento testigo.

De acuerdo con los datos en la evaluación de potencial al alba y segunda medición, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, registrando valores promedio de potencial para el tratamiento testigo de -0.24 MPa y -0.30 MPa, para primera y segunda evaluación respectivamente.

Las diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y los efectos de los mismos en el estado hídrico de la planta se registraron a partir de la evaluación realizada a las 11:00 h, en la que los tratamientos T2 y T4 registraron los valores mínimos y máximos de -0.46 MPa y -0.51 MPa, respectivamente y con diferencias estadísticamente significativas siendo los valores de T4 10.8% inferiores, respecto a T2; por otra parte, T1 y T3 presentaron valores intermedios, sin diferencias entre sí pero estadísticamente diferentes de los valores registrados por T2 y T4.

En la cuarta evaluación de las 13:00 h se mantuvo la diferencia estadística entre T2 y T4 esta vez con valores 16.07% superiores en T4 respecto a T2, mostrando un efecto acentuado en el estado hídrico de la planta debido al efecto del tratamiento salino, sin embargo, la división de raíces permitió que en el caso de T3, este presentara valores inferiores de potencial hídrico a los registrados en T4 en un 13.8%.

La evaluación realizada a las 15:00 presentó el mismo patrón de la tercera evaluación, con T1 y T3 sin diferencias estadísticas entre sí y valores intermedios respecto a T2 y T4, que registraron los valores mínimo y máximo de -0.59 y -0.70 MPa respectivamente, valores en T4 un 18.64% inferiores respecto a lo registrado por T2. La última evaluación del día muestra una recuperación más rápida del potencial en tratamiento 4 alcanzando valores estadísticamente similares comparado con T3 y T1, pero manteniendo la diferencia significativa respecto a T2 con valores 17.78% superiores.



**Figura 9.** A) Evolución diaria del potencial hídrico del tallo en plantas de higuera. B) Relación entre potencial hídrico del tallo ( $\Psi_{\text{Talio}}$ ) del tratamiento testigo y el déficit de presión de vapor de aire medio horario al exterior (DPV). Medias con una letra común no son significativamente diferentes LSD de Fisher ( $p > 0.05$ )

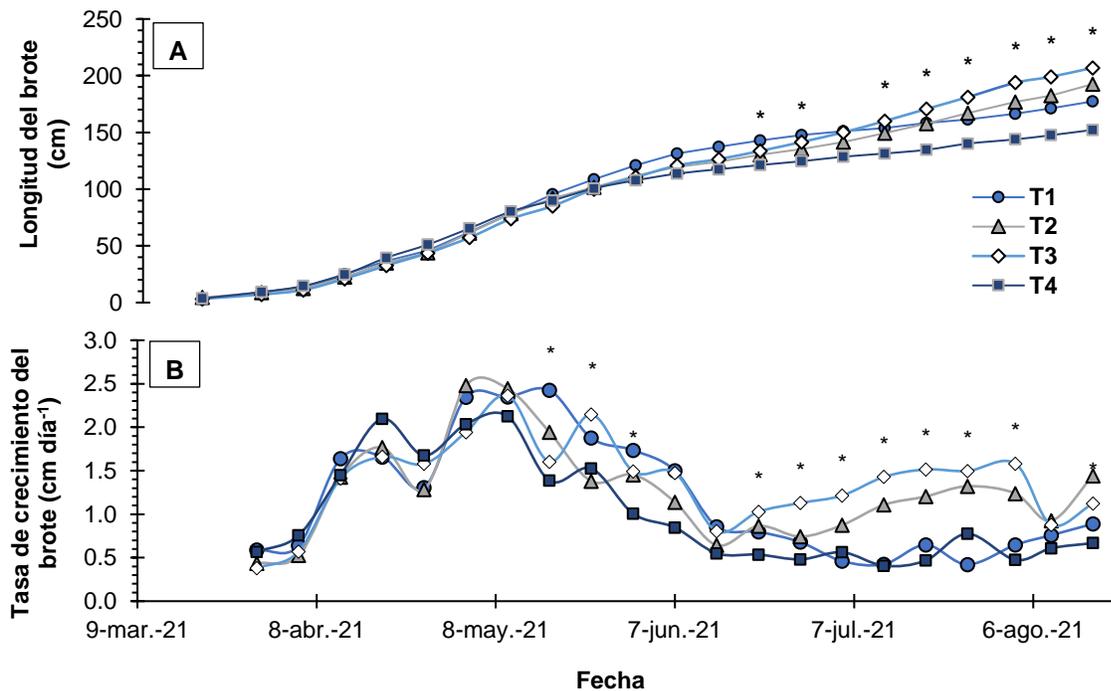
## VI.6 Dinámica de crecimiento de brotes

La evolución de la longitud de brotes siguió el patrón de curva sigmoide en plantas del T1 y T4, y curva de doble sigmoide en plantas del T2 y T3. La primera fase de rápido crecimiento vegetativo se extendió durante un periodo de 60 días (5-abr al 14-jun) (Figura 10A) de los cuales, los primeros 35 días manifestaron una aceleración del crecimiento seguidos por 25 días de deceleración de crecimiento (Figura 10B). Solo los tratamientos

T1 y T4 manifestaron diferencia estadísticamente significativa en la velocidad de crecimiento en deceleración.

La segunda fase de rápido crecimiento se manifestó solo en las plantas del T2 y T3 (Figura 10A) y ocupó un periodo de 43 días (21-jun al 3-ago) con velocidad de crecimiento ascendente, pero con magnitud inferior a la registrada en la fase 1 (Figura 10B). En esta segunda fase, ambos tratamientos manifestaron diferencias significativas principalmente entre T3 y T4 en cuanto a longitud de brote y velocidad de crecimiento.

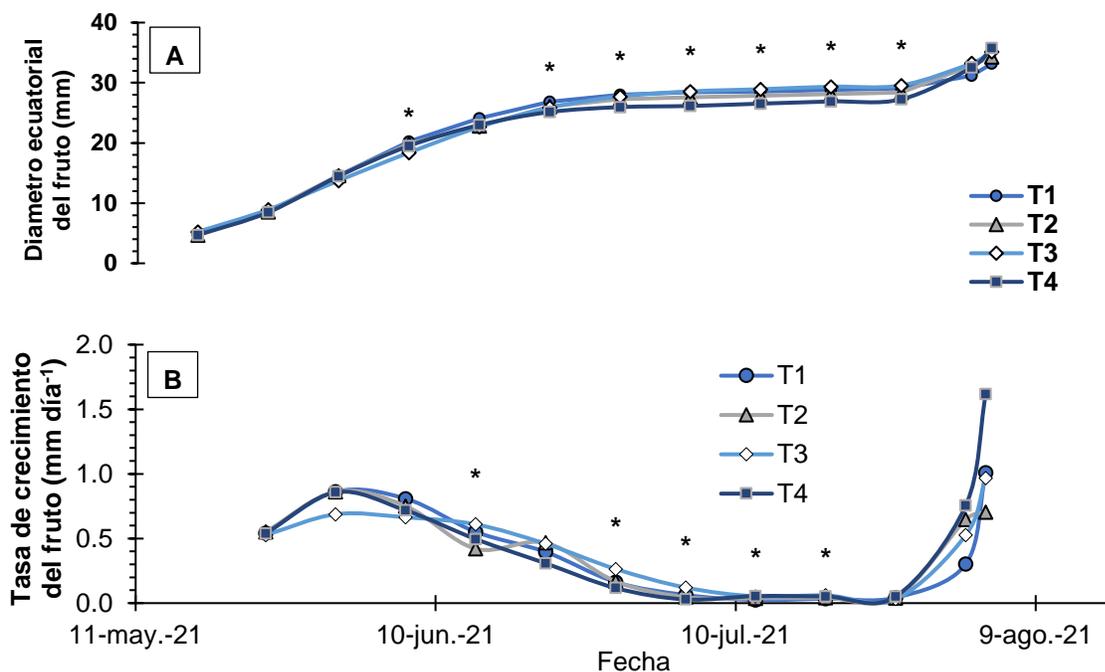
La velocidad de crecimiento del brote inicio con un valor mínimo de  $0.38 \text{ cm día}^{-1}$  en el T3 y alcanzó su máximo de  $2.48 \text{ cm día}^{-1}$ , entre el 26 de abril y el 3 de mayo.



**Figura 10.** Curva de crecimiento de brotes (A) y velocidad de crecimiento del brote por tratamiento (B) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas, LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

## VI.7 Crecimiento de frutos

El número de días para el crecimiento y maduración de frutos de higuera, a partir de que el fruto registra un diámetro de 5 mm, varió entre 79 y 84 días. La Figura 11 muestra la curva de crecimiento y tasa de crecimiento del fruto, en plantas de higuera en la que pueden diferenciarse las tres fases de crecimiento del fruto, una fase inicial de rápido crecimiento (I), una segunda fase, caracterizada por un crecimiento lento (II); seguida de una fase en la que el crecimiento del fruto se dispara como consecuencia de la maduración del fruto, siendo en esta última etapa en la que se registraron las tasas de crecimiento más altas, de hasta  $0.97 \text{ mm día}^{-1}$ ; sin embargo, sin que se registraran diferencias significativas entre tratamientos, las cuales se presentaron principalmente en la segunda fase de crecimiento del fruto principalmente entre los tratamientos T3 y T4 con una diferencia en el diámetro de hasta un 8.5% en T4 por debajo de los valores registrados en T3 y de 8.0% cuando se le comparo con el tratamiento testigo.

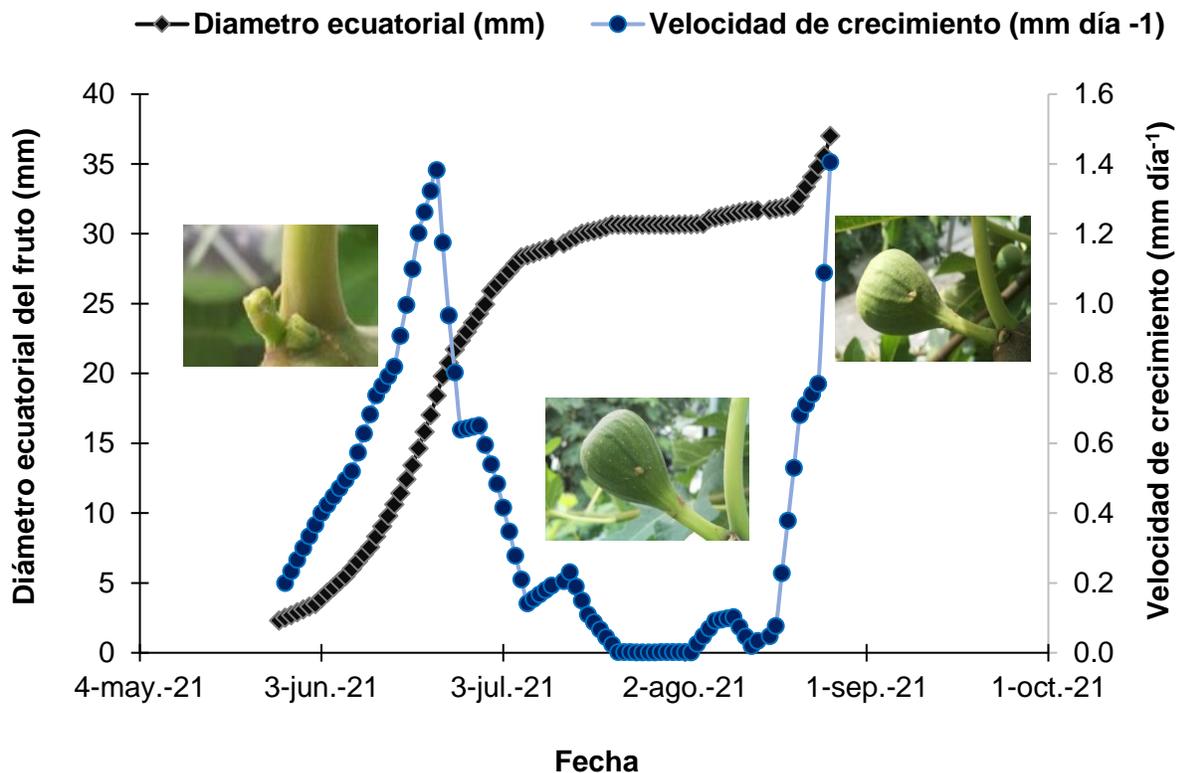


**Figura 11.** Efectos de tratamientos de manejo del fertirriego en la curva de crecimiento de frutos por tratamiento (A) y en la velocidad de crecimiento del fruto (B) en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8$

dS m<sup>-1</sup>) y fertirriego en el otro (CE=6 dS m<sup>-1</sup>), T4: fertirriego (CE=6 dS m<sup>-1</sup>) en ambos compartimentos de las raíces.

Los asteriscos indican diferencias estadísticamente significativas, LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

La Figura 12 muestra la curva de crecimiento del fruto y velocidad de crecimiento del mismo a partir de imágenes RGB, en la cual se muestra el rápido incremento en la tasa de crecimiento del fruto hasta alcanzar los 1.38 cm día<sup>-1</sup>, para registrar posteriormente una reducción constante hasta valores por debajo de los 0.0028 cm día<sup>-1</sup> durante la fase de lento crecimiento, para registrar un incremento rápido en la última fase de crecimiento.

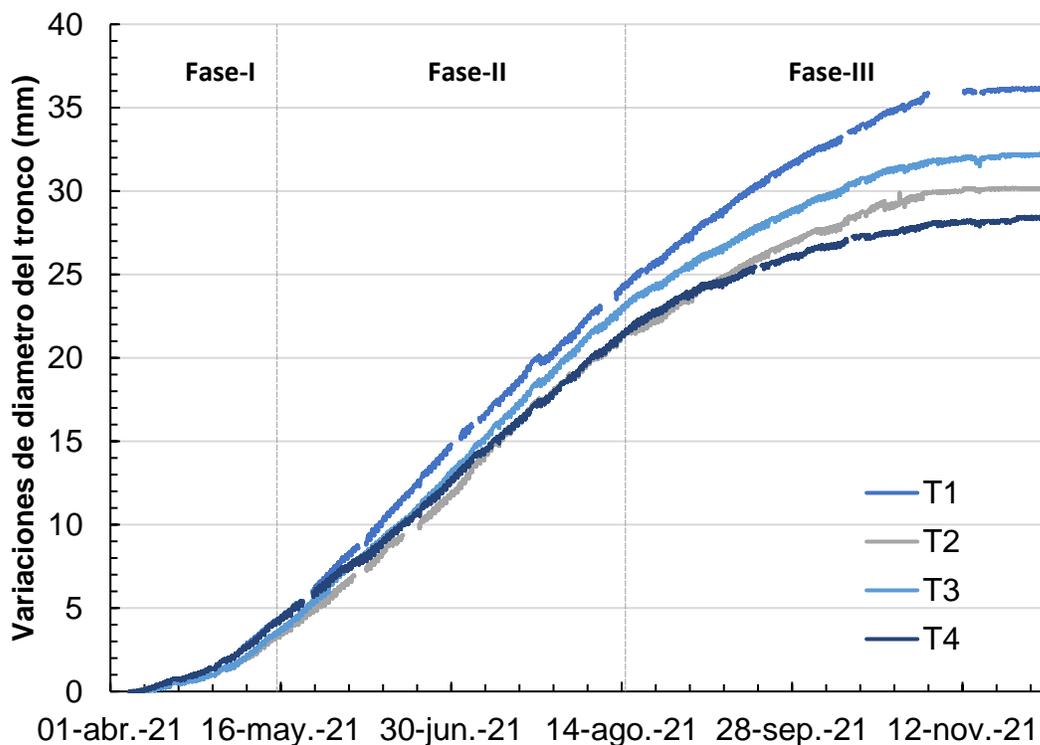


**Figura 12.** Curva de crecimiento y velocidad de crecimiento del diámetro ecuatorial del fruto de higuera cv Black Mission obtenida a partir de imágenes RGB.

### VI.8 Variaciones del diámetro del tronco

Las variaciones estacionales del diámetro del tronco evolucionaron desde abril hasta finales de noviembre siguiendo el patrón de una curva sigmoidea cuya primera fase “fase-

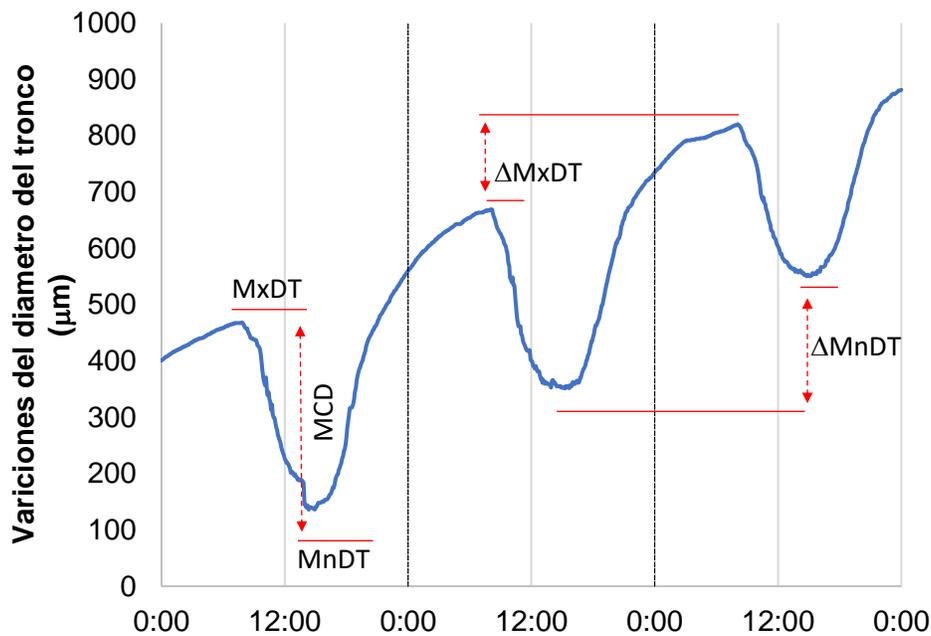
I” de crecimiento exponencial se desarrolló entre abril y mayo, la segunda fase “fase-II” de crecimiento rápido y lineal se extendió desde mayo hasta mediados de agosto y la tercera fase “fase-III” de crecimiento ralentizado tuvo lugar entre mediados de agosto y finales de octubre (Figura 13). La pendiente de crecimiento durante cada fase se vio afectada por los tratamientos de manejo del fertirriego y la diferencia entre tratamientos fue creciendo conforme pasaba el tiempo para llegar al final de la fase-III con diferencias significativas y promedio de crecimiento anual de 36.2, 32.2, 30.1 y 28.4 mm para los tratamientos T1, T3, T2 y T4 respectivamente.



**Figura 13.** Variaciones micromorfométricas del diámetro del tronco en plantas de higo (cv. Black misión) con raíces divididas en dos compartimentos sujetos a diferentes tratamientos de manejo del fertirriego. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces.

La variación diaria del diámetro del tronco manifestó un patrón circadiano típico de árboles leñosos similar a lo reportado en durazno (Simonneau *et al.*, 1993), cítrico (Ortuño

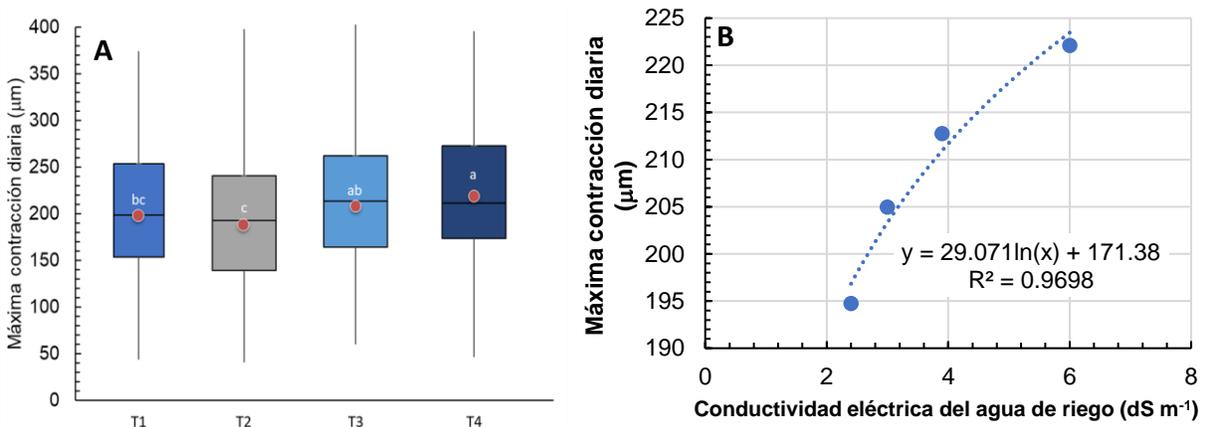
et al., 2004), almendros (Egea et al., 2009) olivo (Fernández et al., 2011) e uva (Montoro et al., 2012) entre otros. Por consecuencia del gradiente de potencial hídrico que se desarrolla en el sistema suelo-planta-atmosfera, el diámetro del tronco sufre una contracción desde la primera hora del día, alcanza su valor mínimo (MnDT) hacia el medio solar para luego entrar en la fase de recuperación progresiva y alcanzar su valor máximo (MxDT) a primera hora del día siguiente (Figura 14). La máxima contracción diaria “MCD” corresponde a la diferencia entre el MxDT y el MnDT y la tasa de crecimiento diario puede deducirse de la diferencia entre dos valores máximos ( $\Delta MxDT$ ) o mínimos ( $\Delta MnDT$ ) consecutivos.



**Figura 14.** Variación diaria del diámetro de tronco en higuera (cv. Black Mission) e indicadores derivados como el valor máximo (MxDT) y mínimo (MnDT) diario del diámetro del tronco y la tasa diaria de crecimiento del diámetro máximo ( $\Delta MxDT$ ) y mínimo ( $\Delta MnDT$ ).

La MCD en los diferentes tratamientos registró un promedio de 200 micrómetros entre un mínimo y un máximo de 41 y 401 micrómetros respectivamente. El T2 registró el valor promedio más bajo marcando una diferencia estadísticamente significativa con el T3 y

T4. El T1 se posiciono entre el T2 y T3 y presentó diferencia estadísticamente significativa con T4 (Figura 15A). La media de la MCD estuvo ligeramente por debajo de la mediana en plantas del T2 y ligeramente por encima de la mediana en plantas del T4. La representación de los valores promedios de la MCD frente a los valores promedios de la conductividad eléctrica en la solución de riego aportada en ambos compartimentos permite apreciar una correlación logarítmica entre ambas variables con un alto valor del coeficiente de determinación  $R^2 = 0.96$  (Figura 15B)



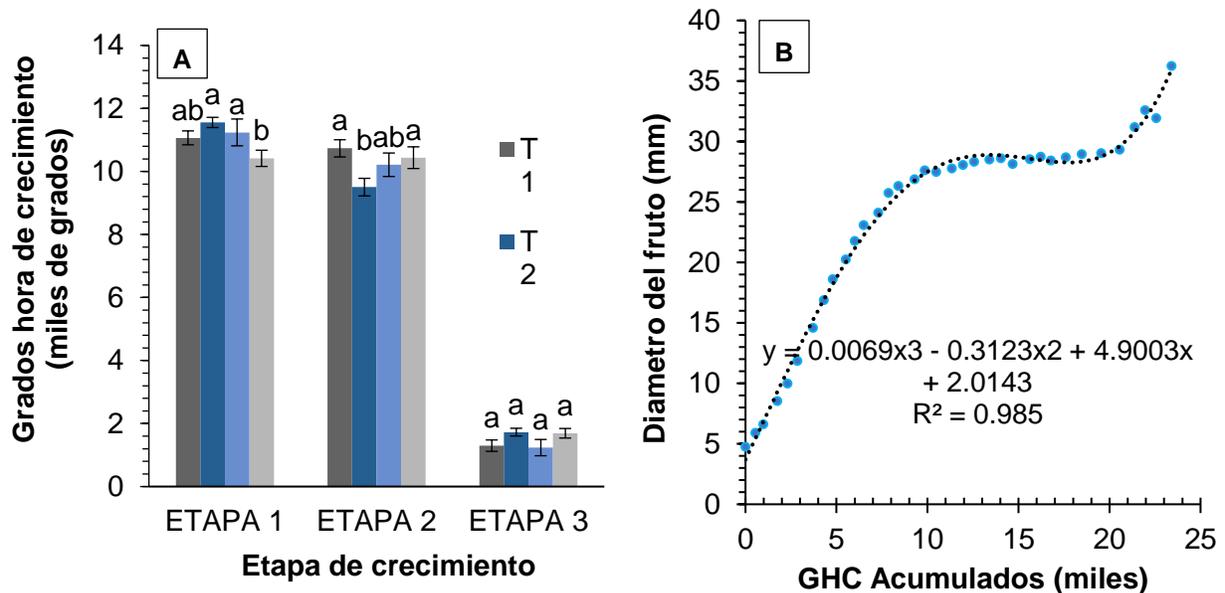
**Figura 15.** A) distribución de la máxima contracción diaria registrada durante un ciclo de producción en plantas de higo (cv. Black Mission) con raíces divididas en dos compartimentos sujetos a diferentes tratamientos de manejo del fertirriego. T1: fertirriego ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces, T2: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=3 \text{ dS m}^{-1}$ ), T3: riego en un compartimento de raíces ( $CE=1.8 \text{ dS m}^{-1}$ ) y fertirriego en el otro ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ), T4: fertirriego ( $CE=6 \text{ dS m}^{-1}$ ) en ambos compartimentos de las raíces. B) Relación entre la MCD y la conductividad eléctrica promedio aplicada a cada tratamiento.

Las medias con letras diferentes representan una diferencia estadísticamente significativa ( $\alpha = 0.05$ ).

### VI.9 Grados hora de crecimiento del fruto

La Figura 16B presenta el aumento en el diámetro del fruto como una función de los grados hora de crecimiento (GHC) acumulados, describiendo una curva doble sigmoidea en todos los tratamientos sin embargo aun cuando la cantidad de GHC a madurez de cosecha del fruto no presentó diferencias significativas, la primera y segunda etapa si registraron diferencias significativas entre los tratamientos. En la etapa 1 los frutos de T4 requirieron de un menor número de GHC, los que indica una fase de crecimiento más

corta, con diferencia significativa respecto a T2 y T3 en los cuales el requerimiento fue 10.9 y 7.9% superior comparado con los requerimientos en T4. La segunda fase caracterizada por un crecimiento lento del fruto, se acorto en T2, que presentó un requerimiento 11.5% inferior a T1 y 8.9% respecto a T4, pero sin diferencia comparada con T3.

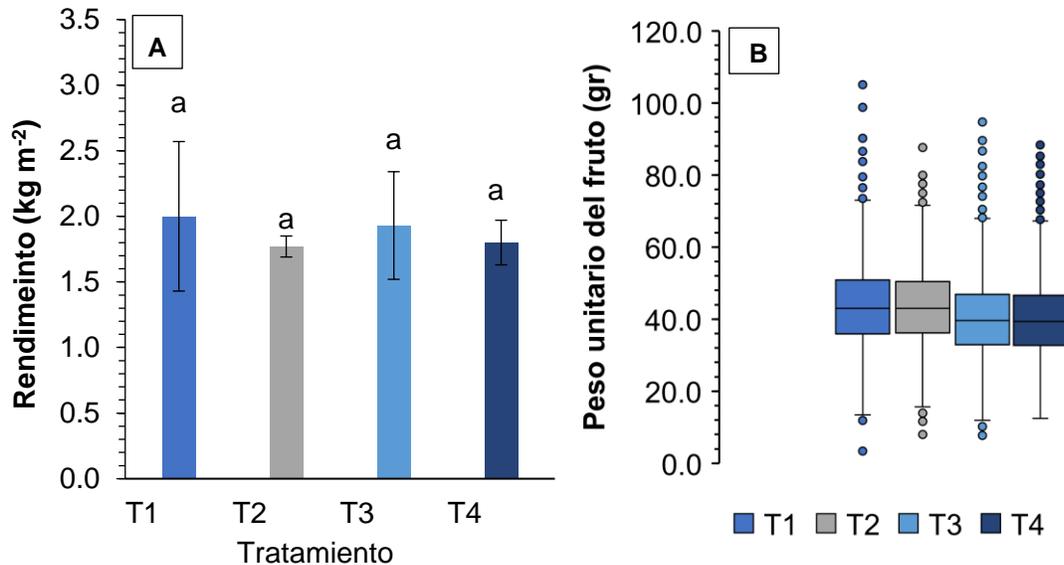


**Figura 16.** Grados hora de crecimiento en frutos de higuera sometidas a 4 tratamientos de manejo del fertirriego en plantas establecidas en sistema de raíces divididas. Medias con una letra común no son significativamente diferentes LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

### VI.10 Rendimiento

La figura 17 muestra el efecto de cuatro tratamientos evaluados sobre el rendimiento estimado en kilogramos por metro cuadrado en cultivo de higuera; el análisis de comparación de medias no indica diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos por lo que la aplicación de soluciones de fertirriego con diferentes concentraciones salinas en sistema de raíces divididas no causo un efecto sobre el rendimiento, que se mantuvo en todos los casos por encima de los 1.8 kg m<sup>-2</sup> y alcanzando valores de 2 kg m<sup>-2</sup> y numero de frutos cosechados por metro cuadrado

registrando en promedio 44 2 frutos  $m^{-2}$  para el tratamiento testigo; considerando lo anterior, el peso unitario del fruto es un factor de importancia a tener en cuenta, ya que este influye de manera directa en el rendimiento final.



**Figura 17.** Rendimiento alcanzado en higuera establecidas en sistema de raíces a divididas bajo cuatro tratamientos de manejo de fertirriego: **(A)** Rendimiento estimado en kilogramos por metro cuadrado, **(B)** Distribución de pesos de frutos cosechados. Medias con una letra común no son significativamente diferentes LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ )

### VI.11 Calidad de la cosecha

El peso unitario del fruto en conjunto con el número de frutos cosechados son dos de los componentes que impactan de manera directa en el rendimiento del cultivo y calidad de la cosecha y por tanto en la rentabilidad del sistema de producción. El Cuadro 7 presenta los valores de peso unitario del fruto en el cual se observan diferencias significativas entre frutos de T1 y T2 cuando se le compara con los tratamientos 3 y 4 los cuales presentaron un peso unitario 8.32% y 8.21% respectivamente.

El diámetro ecuatorial del fruto no presentó diferencias significativas; sin embargo, la longitud si se vio afectada por efecto de los tratamientos aplicados, con diferencias entre los tratamientos T1 y T3, el cual registró una longitud 2.03% inferior respecto al tratamiento T1. El promedio en la temporada de solidos solubles totales no presentó

diferencias significativas registrando valores superiores a los 20°Brix en todos los tratamientos.

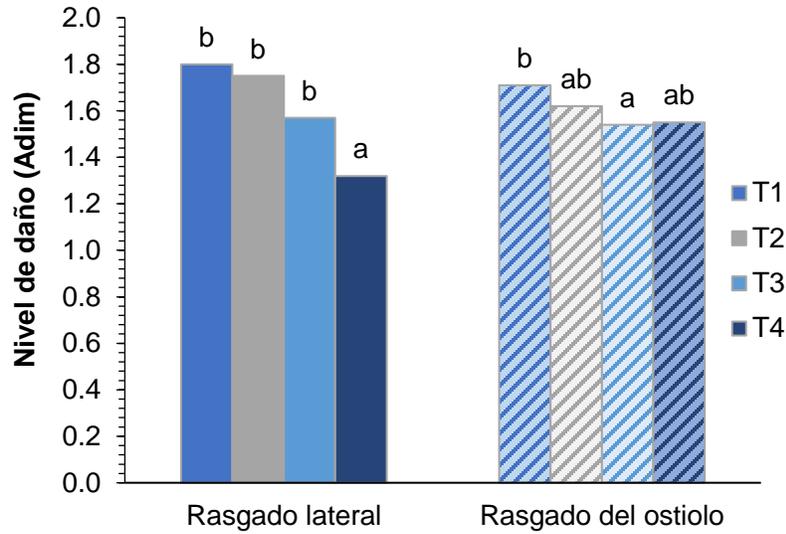
Los valores mínimos de pH del jugo del fruto se registraron en el tratamiento 2 con un pH de 5.11, un valor inferior a los registrados en frutos de T1 y T4 en un 2.85% y 4.31% respectivamente. Los valores de acidez titulable considerando como ácido mayoritario al ácido cítrico, alcanzaron valores máximos en el tratamiento testigo, con diferencias significativas respecto a los tratamientos que recibían salinidad en uno de los dos compartimentos (T2 y T3) con valores 10.34% por debajo de los registrados en T1.

**Cuadro 7.** Promedio en la temporada en parámetros de calidad en frutos de higuera bajo tratamientos de manejo de fertirriego establecidas en sistema de raíces divididas. SST = sólidos solubles totales.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ ).

Tratamiento	Peso (g)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	SST (%)	pH	Acidez titulable (%)
T1	43.74 a	42.87 a	54.29 a	0.93 a	20.43 a	5.26 a	0.29 a
T2	43.58 a	43.02 a	53.53 ab	0.94 a	20.47 a	5.11 b	0.26 b
T3	40.10 b	42.38 a	53.19 b	0.93 a	20.72 a	5.22 ab	0.26 b
T4	40.15 b	42.27 a	53.88 ab	0.91 b	21.00 a	5.33 a	0.27 ab

El agrietamiento lateral y el rasgado del ostiolo en frutos de higo son dos de los daños más comuna y que promueven el desarrollo de pudriciones y pérdidas en la calidad poscosecha, reduciendo además el porcentaje de frutos sanos y por tanto la rentabilidad del sistema de producción. El grado de daño en frutos de higo presentó diferencias significativas entre tratamientos con una reducción importante en el rasgado lateral en el tratamiento con salinidad alta (T4) que presentó una mayor proporción de frutos sin daño, 78.5% comparado con el 58.2% en T1.

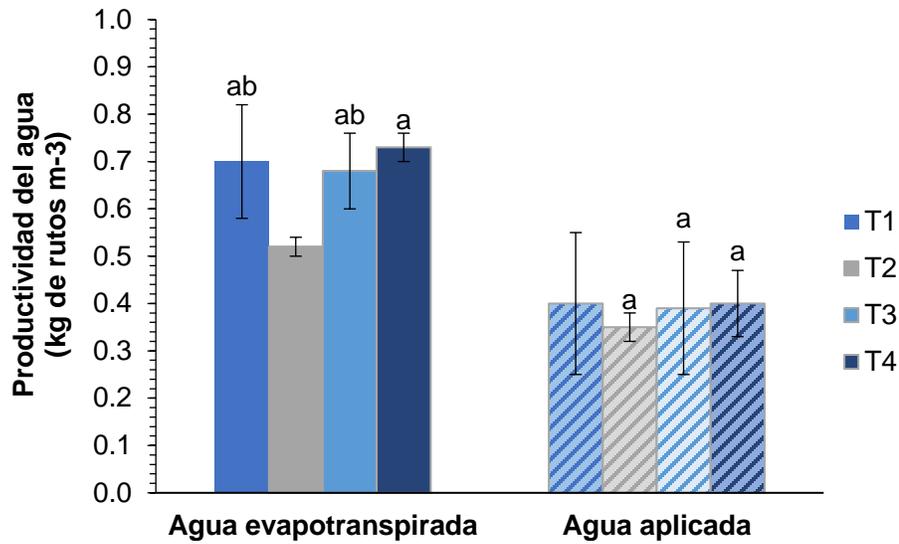


**Figura 18.** Promedio de daño en frutos de higo cosechados en plantas sometidas a tratamientos salinos.

Kruskal Wallis  $p < 0.05$ ; Literales distintas muestran diferencia estadística significativa.

### VI.12 Productividad del agua

La figura 19 presenta la productividad del agua registrada en plantas de higuera bajo los tratamientos de manejo de fertirriego evaluados, dichos valores no presentaron diferencias estadísticas significativas para el agua de riego aplicada; sin embargo, la productividad considerando el agua de riego evapotranspirada presentó una reducción de un 28.8% en T2 el tratamiento con la salinidad media de compartimentos ( $CE_{mc}$ ) más baja, con respecto a T4, el tratamiento salino con la  $CE_{mc}$  más alta; un comportamiento que va en concordancia principalmente con los resultados de evapotranspiración, considerando que el rendimiento en los tratamientos no presentó diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo aun cuando la productividad del agua evapotranspirada no presentó diferencia significativas en la cantidad de fertilizantes aplicada en T2 corresponde a un 13% de la cantidad aplicada en T4.



**Figura 19.** Productividad del agua aplicada y evaporada en plantas de higuera establecidas en sistema de raíces divididas y sometidas a 4 tratamientos de manejo de fertirriego.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes LSD de Fisher ( $\alpha = 0.05$ )

## VII. DISCUSIONES

### VII.1 Variables del entorno ambiental

La interacción entre los organismos y las condiciones del medio físico y biológico en que se desarrollan, determinan y condicionan las respuestas generadas y su efecto sobre la fisiología de las plantas (Nature, 2022). Estas respuestas y la integración de las misma pueden variar entre plantas de un mismo cultivar sometidas a un microambiente (Gruda *et al.*, 2019).

En este sentido las condiciones de microclima en el que se desarrollaron las plantas de higuera fueron determinadas en parte por estructura de casa sombra en la que se establecieron, al interior de la cual se presentaron condiciones de radiación promedio al día de  $1225.19 \mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , valores por debajo de los  $1300 \mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$  reportados por Mlinarić *et al.*, (2016), los que en conjunto con temperaturas elevadas ( $>35^{\circ}\text{C}$ ) inducían cambios bioquímicos y fotoquímicos con impacto directo en la actividad fotosintética de la planta; sin embargo, el valor promedio de temperatura fue inferior a los  $22^{\circ}\text{C}$ . Higgins *et al.*, (1992) reportan para plantas del cv Black Mission establecidas en contenedores bajo condiciones de invernadero  $26^{\circ}\text{C}$  como temperatura óptima para fotosíntesis; un rango térmico de  $8$  a  $35^{\circ}\text{C}$  (Sumner, 2000), ya que temperaturas superiores a los  $39^{\circ}\text{C}$  impactan de manera directa en la calidad de los frutos (Hiwale, 2015) y combinación con baja humedad relativa se incrementan los valores de déficit de presión de vapor generando mayores pérdidas de agua por transpiración (Grossiord *et al.*, 2020).

### Estado hídrico de la planta

Al incrementarse la concentración de solutos en una solución se genera un impacto sobre el componente osmótico del potencial hídrico causando entre otros efectos, una reducción en la absorción de agua por parte de las plantas (Clark, 1990). Los resultados del presente trabajo muestran una regulación a la baja del potencial hídrico del tallo al incrementarse el contenido de sales solubles en la solución de riego, mostrando una relación inversa entre la CEa media de compartimentos y el potencial hídrico del tallo. Los valores más bajos de potencial con la consecuente reducción en la ETr se presentaron en el tratamiento T4, en contraste con T2 que presentaba la CEa media más

baja y valores de potencial más altos lo que se tradujo en un mayor consumo hídrico el cual se dio principalmente en el compartimento de baja salinidad, al igual que en el tratamiento T3 el cual presentó valores de potencial ligeramente superiores a los registrados en T1 e inferiores a los registrados en T4.

En este sentido Caruso *et al.*, (2017) reportan en cultivo de higuera, un descenso en la valores de potencial hídrico del tallo al incrementarse la concentración salina en la solución de riego de los tratamientos evaluados y en los trabajos desarrollados en plantas de alfalfa por Kong *et al.*, (2016) y en plantas de tomate (Tzohar, 2021), en los que se evaluó salinidad heterogénea, se reportan efectos compensatorios en la absorción en los compartimentos con baja salinidad como respuesta a la disminución en el consumo de los campamientos salinos; sin embargo, los datos del experimento desarrollado en higuera, no mostraron una reducción significativa en el consumo en el compartimento salino, aunque si un incremento en el consumo en los compartimentos de baja salinidad. Este comportamiento ha sido observado en plantas tolerantes a salinidad como el mangle (*Avicennia marina*), con sistema de raíces divididas y tratamientos de salinidad heterogénea, en las cuales no se mostró una restricción en el consumo hídrico en el compartimento con alta concentración de sales (Reef *et al.*, 2015) por otro lado Kong *et al.*, (2012) reportan un aumentó significativamente en el uso de agua en plantas de algodón sometidas a la salinidad no uniforme, Zhang *et al.*, (2019) en cultivo de sorgo bajo sistema de raíces divididas, reporta un incremento en el consumo de agua en el compartimento no salino en comparación con el lado salino de la raíz; reafirmando el hecho de que el consumo hídrico se da en las zonas en las que el agua se encuentra más accesible, cuando se imponen limitaciones debidas al efecto de salinidad variable en el tiempo y el espacio (Valenzuela *et al.*, 2022).

Se considera que la sanidad no uniforme podría inducir mayor expresión de genes relacionados con la tolerancia a la sal en hojas y genes relacionados con la absorción de agua y nutrientes en las regiones no salinas de la raíz (Kong *et al.*, 2017) los cuales pueden generar respuestas que tienen un efecto sistémico a nivel de la planta (Wu *et al.*, 2012) lo que justificaría que en el lado salino no se haya presentado una reducción en el consumo hídrico en comparación con los tratamientos que reciben salinidad uniforme, no

solamente debido al efecto osmótico provocado por la salinidad sino a las respuestas simultáneas ante la limitación en la absorción de agua en un lado de la raíz y de nutrientes en el otro compartimento.

Los indicadores del estado hídrico en planta son susceptibles de ser monitoreados mediante técnicas como la dendrometría la cual proporciona información basada en los procesos de crecimiento, deshidratación y rehidratación del tejido que dan lugar a fluctuaciones del diámetro del tronco a partir de las cuales pueden calcularse diversos índices (Daudet *et al.*, 2005; Ortuño *et al.*, 2010) como la máxima contracción diaria del tronco (MCD). Los valores de la MCD colectados en este estudio concuerdan con los datos de potencial del tallo, con la CEa y con la ETr del cultivo, y demuestran que este indicador permitió detectar niveles de estrés hídrico en las plantas de higuera, aun cuando el estrés al que se sometieron las plantas no fue suficiente para generar una reducción en el potencial hídrico del tallo por debajo de niveles considerados como severos en cultivo de higuera (Caruso *et al.*, 2017).

Los datos presentados concuerdan con lo reportado previamente en plantas de manzano, en las que la MCD en condiciones de estrés hídrico moderado se considera un indicador sensible del estado hídrico de la planta aun cuando las plantas presentaban tasas de crecimiento del tronco elevadas, (Doltra *et al.*, 2007) en contraste con lo reportado por Ortuño *et al.*, (2004).

## **VII.2 Dinámica de crecimiento de la planta**

El estrés por salinidad no solo ejerce un efecto sobre el componente osmótico del potencial hídrico (Méndez-Espinoza y Vallejo Reyna, 2019) sino que puede afectar también la absorción de nutrientes (Shrivastava y Kumar, 2015), causar deshidratación celular; toxicidad iónica; inhibición de la fotosíntesis, (Taiz y Zeiger, 2002) y estrés oxidativo (Yang y Guo, 2018; Zhu, 2016) generando un conjunto de limitaciones en el crecimiento de las plantas, afectando la expansión de hojas, el crecimiento de brotes y el tamaño de los frutos, entre otros (Lombardini y Rossi, 2019); las plantas, al desarrollarse en condiciones naturales con alta heterogeneidad en la distribución de sales aún en cortas distancias, pueden sobrevivir al tener acceso a zonas de baja salinidad que compensan y permiten el desarrollo de la planta aun con una parte de la raíz sometida a

condiciones estresantes que en caso de ser uniformes podrían llegar a ser incluso letales (Bazihizina *et al.*, 2012; Yakir y Yechieli, 1995).

En este contexto la combinación de compartimentos salinos y no salinos favoreció el consumo hídrico total en T2 y T3 gracias a la mayor contribución desde la parte de raíces que recibía agua sin ningún fertilizante añadido. Bajo altos niveles de salinidad en ambos compartimentos del sistema radicular como en T4, la absorción de agua fue limitada (Figura 6) por ajuste en el potencial hídrico de la planta (Figura 9) el cual ocurre de acuerdo con a la par del ajuste osmótico y procesos de adaptación (Vangelisti *et al.*, 2019).

Las condiciones de salinidad y su distribución en la zona radicular generaron diferencias en el crecimiento de la planta principalmente en la segunda fase de crecimiento del brote (Figura 10) durante la cual se promovió la elongación de brotes en los tratamientos con salinidad heterogénea (T3 y T2) y registró los valores más bajos en T4; en este sentido, Vangelisti *et al.*, (2019) en un experimento con cultivo de higuera sometido a estrés salino señala una desaceleración en el crecimiento de brotes de higo en tratamientos salinos y en un experimento con plantas de higo sometido a estrés salino uniforme los tratamientos salinos intermedios promovieron un ligero efecto benéfico en la longitud del tallo, pero al incrementar la salinidad si resultó afectada la longitud del tallo (Sadder *et al.*, 2021).

Por otro lado (Mascellani *et al.*, 2021) reporta que la longitud del tallo en plantas de higo no se vieron afectadas por efecto de tratamientos salinos. En un experimento realizado con plantas de *Lycium chinense* , no se presentó inhibición del crecimiento de las plantas tratadas, excepto en aquellas que recibían niveles altos de salinidad en alguno de los compartimentos (Feng *et al.*, 2017).

La biomasa final de ramas y el diámetro basal del tronco presentaron los valores más bajos en T4 y T2 y los más altos en T1, seguido por T3. En este sentido Bazihizina *et al.*, (2012) reportaron incremento en la biomasa del brote en tratamientos con salinidad heterogénea baja, comparado con tratamientos que recibieron salinidad heterogénea elevada.

Munns, (2005) indica que las señales químicas sistémicas son las que regulan el crecimiento de la planta en condiciones de salinidad y no solamente se atribuyen a las relaciones hídricas, lo que estaría relacionado con la respuesta integrada de señales tanto del compartimento salino como del no salino ya que bajo salinidad uniforme, al incrementarse la salinidad, se limita el crecimiento debido al efecto sobre la división y elongación celular, en este sentido, Zarei *et al.*, (2016) reportan una reducción en la biomasa de brotes de plantas de higuera en el tratamiento de alta salinidad.

Los datos obtenidos de mediciones del diámetro ecuatorial del fruto muestran curva doble sigmoideal de crecimiento, lo cual es característico en frutos de higo (Marei y Crane, 1971; Sadler, 2010) mostrando dos fases de crecimiento acelerado y una fase de crecimiento lento, siendo esta en la que se presentaron principalmente los efectos de los tratamientos, al encontrar frutos con diámetros superiores en el tratamiento T3 en comparación con el tratamiento de salinidad uniforme alta, el cual registró los valores más bajos. El crecimiento en el fruto se atribuye principalmente a los procesos de división y expansión celular (Jacobs, 1997), pero se considera al proceso de división celular que se da principalmente en el desarrollo temprano del fruto, como la etapa más crítica en el tamaño final (Albacete *et al.*, 2014; Sarma *et al.*, 2020).

### **VII.3 Calidad poscosecha y productividad del agua**

El contenido de sólidos solubles totales (SST) no presentó diferencias significativas. Mascellani *et al.*, (2021) reportan que en frutos de higo, no se presentó un aumento en el contenido de D-glucosa y D-fructosa a pesar del aumento en transcritos que codifican las enzimas implicadas en la síntesis de glucosa y fructosa bajo condiciones de estrés por salinidad. Los valores alcanzados de SST en el tratamiento T1 fueron de 20.43%, los cuales se encuentran por encima de los reportados previamente para el cultivar de higo Black Mission, con valores alrededor del 16% (Crisosto *et al.*, 2010; Jokar *et al.*, 2021). Por otro lado, la densidad del fruto se vio afectada en el tratamiento con la salinidad más alta, además de detectar una correlación negativa entre la salinidad media de compartimentos y la densidad del fruto.

El presente estudio muestra como la acidez titulable (AT) se vio afectada por los tratamientos aplicados con una tendencia a presentar valores más bajos en los

tratamientos de salinidad heterogénea; sin embargo, el contenido más alto se registró en T1 que presentaba una CEa media de  $3 \text{ dS m}^{-1}$ , por lo que el incremento en la salinidad no favoreció el contenido de acidez titulable en el fruto, contrario a lo reportado en cultivo de tomate por Zhang *et al.*, (2016), quienes señalan un aumento en el contenido de AT en el fruto, al incrementarse los niveles de salinidad. Los valores obtenidos de AT fueron inferiores al 0.44% reportados por Crisosto *et al.*, (2010) para el mismo cultivar.

Khalil *et al.*, (2011) señalaron una respuesta negativa sobre los parámetros de crecimiento en plantas de higuera al incrementarse los niveles de salinidad, por lo que la reducción en el peso final de los frutos de plantas que estuvieron sometidas a salinidad alta, incluido T3, puede ser atribuido al efecto osmótico en el desarrollo temprano del fruto principalmente durante los procesos de división celular (Jacobs, 1997). Esto considerando que aun cuando el diámetro del fruto no presentó diferencias significativas, se mantenía la relación directa entre el diámetro del fruto y el peso del mismo, en este sentido Vangelisti *et al.*, (2019), reportan una regulación a la baja de genes implicados en los procesos metabólicos como división celular y biosíntesis de hormonas en plantas de higuera.

Sin embargo, el rendimiento final no presentó diferencias significativas por lo que ante la reducción en el peso medio del fruto el rendimiento fue compensado con el número de frutos cosechados, alcanzando las  $19.9 \text{ ton ha}^{-1}$  al 1 de noviembre de 2021 o  $14.4 \text{ Kg planta}^{-1}$ , comparado con la media nacional de  $7.16 \text{ ton ha}^{-1}$  (SIAP, 2022) a partir de cultivos desarrollados en condiciones de campo abierto y no en condiciones de agricultura protegida; en contraste los máximos rendimientos reportados se han obtenidos bajo condiciones de invernadero que en 2017 por Mendoza-Castillo *et al.*, en plantaciones de alta densidad ( $1.25 \text{ plantas m}^{-2}$ ) con un rendimiento de hasta  $109.9 \text{ ton ha}^{-1}$  o  $13.75 \text{ Kg planta}^{-1}$ .

La productividad del agua evapotranspirada presentó diferencias significativas alcanzando los valores máximos en el tratamiento salino y considerando que el rendimiento no presentó una reducción significativa, este incremento en la productividad del agua consumida puede ser atribuida a la reducción en el consumo hídrico, lo cual se atribuye del impacto de la concentración de sales sobre el potencial hídrico, lo que implica

una limitación en la absorción de agua y un retraso en el crecimiento de las plantas expuestas a este tipo de estrés (Munns, 2005) pero que finalmente no redujo el rendimiento de manera significativa.

Esta disminución en el consumo hídrico resultado de potenciales hídricos más bajos los tratamientos salinos se vio reflejado también en la reducción del porcentaje de frutos que presentaban rasgado lateral del fruto, asociados a problemas de pudriciones y reducción en la calidad poscosecha, como consecuencia de potenciales hídricos altos, en este sentido Kong *et al.*, (2013) señalan que cambios en el manejo del riego pueden utilizarse a fin de reducir el uso de agua y la incidencia de agrietamiento lateral en los frutos de higo.

## VIII. CONCLUSIONES

La exposición de raíces divididas a diferentes niveles de salinidad incrementa la absorción de agua a partir del compartimento regados con agua de menor conductividad eléctrica.

La exposición de raíces divididas a diferentes niveles de salinidad amortigua el efecto negativo de las sales sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo en plantas de higuera.

La magnitud de la máxima contracción del tronco responde positivamente a los niveles de sales en la solución del riego y pone de manifiesto el papel del potencial osmótico sobre las variaciones micromorfométricas del tronco.

El desarrollo del cultivo de higo en sistema de producción en semi-hidroponía con manejo de fertirriego y control de pH y conductividad eléctrica bajo cubierta de malla sombra permite alcanzar niveles de producción cercanos a 15 Kg por planta con un mínimo de mermas producidas por incidencia de insectos o deformaciones en la piel del fruto.

## IX. PERSPECTIVAS

Se sugiere que para futuras investigaciones, se realice la evaluación del efecto de diferentes concentraciones de iones específicos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ , etc.) y su impacto en la fisiología de las plantas de higuera bajo el sistema de raíces divididas, considerando que el efecto de los tratamientos, asociado incremento en la concentración de sales nutritivas no generó un impacto significativo en la productividad del cultivo

Considerando que la recirculación de nutrientes es considerada como una técnica que permite incrementar de manera importante la productividad del agua, el establecimiento del cultivo en el sistema de raíces divididas en combinación con sistemas de recirculación y la evaluación de la salinización progresiva del agua utilizada se considera como un área de oportunidad a evaluar, tomando en cuenta la tolerancia de la higuera a la salinidad y al efecto a nivel de la planta al someterla a la distribución de altas y bajas concentraciones en distintos compartimentos del sistema radicular.

Se recomienda realizar el seguimiento del impacto de los tratamientos en ciclos posteriores de producción, a fin de determinar las consecuencias a largo plazo de las condiciones a las que las plantas fueron sometidas en función de los tratamientos aplicados.

## X. REFERENCIAS

- Abbasov, G. D. (2013). Evaluation of a Split-Root Nutrition System to Optimize Nutrition of Basil. <https://doi.org/https://doi.org/10.7275/6ecv-1m74>  
[https://scholarworks.umass.edu/open\\_access\\_dissertations/833](https://scholarworks.umass.edu/open_access_dissertations/833)
- Albacete, A., Cantero-Navarro, E., Balibrea, M. E., Großkinsky, D. K., De La Cruz González, M., Martínez-Andújar, C., Smigocki, A. C., Roitsch, T., y Pérez-Alfocea, F. (2014). Hormonal and metabolic regulation of tomato fruit sink activity and yield under salinity. *Journal of Experimental Botany*, 65(20), 6081-6095. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru347>
- Ammar, A., Aissa, I. BEN, Mars, M., y Gouiaa, M. (2020). Seasonal variation of fig tree (*Ficus carica* L.) physiological characteristics reveals its adaptation performance. *South African Journal of Botany*, 132, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.04.020>
- Anderson, J. L., Richardson, E. ., y Kesner, C. D. (1986). Validation of chill unit and flower bud phenology models for 'Montmorency' sour cherry. *Acta Hort*, (184), 7178.
- Badgujar, S. B., Patel, V. V., Bandivdekar, A. H., y Mahajan, R. T. (2014). Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of *Ficus carica*: A review. *Pharmaceutical Biology*, 52(11), 1487-1503. <https://doi.org/10.3109/13880209.2014.892515>
- Ballesteros, R., Ortega, J. F., Hernandez, D., y Moreno, M. A. (2018). Onion biomass monitoring using UAV-based RGB imaging. *Precision Agriculture*, 19(5), 840-857. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9560-y>
- Barolo, M. I., Ruiz Mostacero, N., y López, S. N. (2014). *Ficus carica* L. (Moraceae): An ancient source of food and health. *Food Chemistry*, 164, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.112>
- Bazihizina, N., Barrett-Lennard, E. G., y Colmer, T. D. (2012). Plant growth and physiology under heterogeneous salinity. *Plant and Soil*, 354(1-2), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1193-8>

- Cai, J., Kumar, P., Chopin, J., y Miklavcic, S. J. (2018). Land-based crop phenotyping by image analysis: Accurate estimation of canopy height distributions using stereo images. *PLoS ONE*, 13(5), 1-21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196671>
- Caruso, G., Gennai, C., Ugolini, F., Marchini, F., Quartacci, M. F., y Gucci, R. (2017). Tolerance and physiological response of young *Ficus carica* L. plants irrigated with saline water. *Acta Horticulturae*, 1173, 137-141. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1173.23>
- CESVMOR. (2015). Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de Morelos. Buen uso y manejo de agroquímicos en el cultivo de higo en el estado de Morelos (p. 30). Aguascalientes.
- Chamú, J., López, A., Ramírez, C., Trejo, C., y Martínez, E. (2011). Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de la raíz en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 97-110.
- Chen, D., Shi, R., Pape, J. M., Neumann, K., Arend, D., Graner, A., Chen, M., y Klukas, C. (2018). Predicting plant biomass accumulation from image-derived parameters. *GigaScience*, 7(2), 1-13. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giy001>
- Clark, G. A. (1990). Measurement of Soil Water Potential. *HortScience*, 25(12), 1548-1551. <https://doi.org/10.21273/hortsci.25.12.1548>
- COPERES, C. para la P. E. de L. P. de la R. S. del E. de C. (2020). Prontuario climático de los municipios de la región sureste del estado de Coahuila 2020.
- Crisosto, C. H., Bremer, V., Ferguson, L., y Crisosto, G. M. (2010). Evaluating quality attributes of four fresh fig (*Ficus carica* L.) cultivars harvested at two maturity stages. *HortScience*, 45(4), 707-710. <https://doi.org/10.21273/hortsci.45.4.707>
- Cuevas, M. V., Torres-Ruiz, J. M., Álvarez, R., Jiménez, M. D., Cuerva, J., y Fernández, J. E. (2010). Assessment of trunk diameter variation derived indices as water stress indicators in mature olive trees. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1293-1302. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.011>
- Daudet, F. A., Améglío, T., Cochard, H., Archilla, O., y Lacoïnte, A. (2005). Experimental

- analysis of the role of water and carbon in tree stem diameter variations. *Journal of Experimental Botany*, 56(409), 135-144. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri026>
- Deepa, P., Sowndhararajan, K., Kim, S., y Park, S. J. (2018). A role of *Ficus* species in the management of diabetes mellitus: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, 215(January 2018), 210-232. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.12.045>
- Di Rienzo, J. ., Casanove, F., Balzarini, M. ., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. Argentina: Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado a partir de <http://www.infostat.com.ar>
- Doltra, J., Oncins, J. A., Bonany, J., y Cohen, M. (2007). Evaluation of plant-based water status indicators in mature apple trees under field conditions. *Irrigation Science*, 25(4), 351-359. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0051-y>
- Dry, P. R., y Loveys, B. R. (1998). Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4(3), 140-148. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.1998.tb00143.x>
- Egea, G., Pagán, E., Baille, A., Domingo, R., Nortés, P. A., y Pérez-Pastor, A. (2009). Usefulness of establishing trunk diameter based reference lines for irrigation scheduling in almond trees. *Irrigation Science*, 27(6), 431-441. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0157-0>
- El-Shazly, S. M., Mustafa, N. S., y El-berry, I. M. (2014). Evaluation of some fig cultivars grown under water stress conditions in newly reclaimed soils. *Middle East Journal of Scientific Research*, 21(8), 1167-1179. <https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2014.21.08.21680>
- El Heraldo de Saltillo. (2020, marzo 16). Amplía Coahuila el programa de plantación de higo a 150 hectáreas. Recuperado 20 de diciembre de 2020, a partir de <https://www.elheraldodesaltillo.mx/2020/03/16/amplia-coahuila-el-programa-de-plantacion-de-higo-a-150-hectareas/>
- FAO. (2020). Towards a Global Programme on Sustainable Dryland Agriculture.

- FAOSTAT. (2020). Cultivos. Recuperado 18 de diciembre de 2020, a partir de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Feng, X., An, P., Guo, K., Li, X., Liu, X., y Zhang, X. (2017). Growth , root compensation and ion distribution in *Lycium chinense* under heterogeneous salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 226(April), 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.011>
- Fernández, J. E., Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Montero, A., Álvarez, R., Jiménez, M. D., Cuerva, J., y Cuevas, M. V. (2011). Use of maximum trunk diameter measurements to detect water stress in mature «Arbequina» olive trees under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 98(12), 1813-1821. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.011>
- Fernández, José Enrique., Moreno, F., Martín-Palomo, M. J., Cuevas, M. V., Torres-Ruiz, J. M., y Moriana, A. (2011). Combining sap flow and trunk diameter measurements to assess water needs in mature olive orchards. *Environmental and Experimental Botany*, 72(2), 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.04.004>
- Flora of North America Association. (2002). *Ficus Carica* L. Recuperado 18 de diciembre de 2020, a partir de [http://beta.floranorthamerica.org/Ficus\\_carica](http://beta.floranorthamerica.org/Ficus_carica)
- Flores, P., Angeles Botella, M., Martínez, V., y Cerdá, A. (2002). Response to salinity of tomato seedlings with a split-root system: Nitrate uptake and reduction. *Journal of Plant Nutrition*, 25(1), 177-187. <https://doi.org/10.1081/PLN-100108789>
- García-Mateos, G., Hernández-Hernández, J. L., Escarabajal-Henarejos, D., Jaén-Terrones, S., y Molina-Martínez, J. M. (2015). Study and comparison of color models for automatic image analysis in irrigation management applications. *Agricultural Water Management*, 151, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.010>
- Geerts, S., y Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), 1275-1284. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>
- Ghrab, M., Ayadi, M., Gargouri, K., Chartzoulakis, K., Gharsallaoui, M., Bentaher, H., Psarras, G., Ben Mimoun, M., Masmoudi, M. M., y Ben Mechlia, N. (2014). Long-term

- effects of partial root-zone drying (PRD) on yield, oil composition and quality of olive tree (cv. Chemlali) irrigated with saline water in arid land. *Journal of Food Composition and Analysis*, 36(1-2), 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2014.05.005>
- Gobierno de Coahuila. (2012). Agua potable, drenaje y saneamiento. Recuperado a partir de <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Gobierno de Coahuila. (2019, marzo 19). Coahuila promueve producción de higo. Recuperado 20 de diciembre de 2020, a partir de <https://coahuila.gob.mx/noticias/index/coahuila-promueve-produccion-de-higo-29-03-19>
- Gobierno de Coahuila. (2020). Datos Municipios. Recuperado 30 de diciembre de 2020, a partir de <https://coahuila.gob.mx/micrositios/index/datos-municipios>
- Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf, R. T. W., Sperry, J. S., y McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566. <https://doi.org/10.1111/nph.16485>
- Gruda, N., Bisbis, M., y Tanny, J. (2019). Influence of climate change on protected cultivation: Impacts and sustainable adaptation strategies - A review. *Journal of Cleaner Production*, 225, 481-495. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.210>
- Guo, S., Shen, Q., y Brueck, H. (2007). Effects of local nitrogen supply on water uptake of bean plants in a split root system. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(4), 472-480. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00436.x>
- Higgins, S. S., Larsen, F. E., Bendel, R. B., Rademaker, G. K., Bassman, J. H., Bidlake, W. R., y Al Wir, A. (1992). Comparative gas exchange characteristics of potted, glasshouse-grown almond, apple, fig, grape, olive, peach and Asian pear. *Scientia Horticulturae*, 52, 313-329.
- Hiwale, S. (2015). Sustainable horticulture in semiarid dry lands. *Sustainable Horticulture in Semiarid Dry Lands*, 1-393. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2244-6>
- Hu, J., Peng, J., Zhou, Y., Xu, D., Zhao, R., Jiang, Q., Fu, T., Wang, F., y Shi, Z. (2019). Quantitative estimation of soil salinity using UAV-borne hyperspectral and satellite

- multispectral images. *Remote Sensing*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/rs11070736>
- INTAGRI. (2020). Producción Higo en México. Serie Frutales. Artículos Técnicos de INTAGR, (60), 4. Recuperado a partir de <https://www.intagri.com/articulos/frutales/produccion-de-higo-en-mexico>
- Iqbal, N., Hussain, S., Raza, M. A., Safdar, M. E., Hayyat, M. S., Shafiq, I., Yang, W. Y., y Liu, J. (2020). Exploring half root-stress approach: current knowledge and future prospects. *Plant Production Science*, 23(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1604145>
- Isa, M. M., Jaafar, M. N., Kasim, K. F., y Mutalib, M. F. A. (2020). Cultivation of Fig (*Ficus carica* L.) As An Alternative High Value Crop in Malaysia: A Brief Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 864(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012134>
- Jacobs, T. (1997). Why do plant cells divide. *Plant Cell*, 9(7), 1021-1029.
- Jiménez-Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S. S., Kundzewicz, Z., y Nishijima, A. (2015). Freshwater resources. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*, 229-270. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.008>
- Jokar, A., Zare, H., Zakerin, A., y Jahromi, A. A. (2021). The Influence of Photo-selective Netting on Tree Physiology and Fruit Quality of Fig (*Ficus carica* L.) Under Rain-fed Conditions. *International Journal of Fruit Science*, 21(1), 896-910. <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1936345>
- Jovanovic, Z., y Stikic, R. (2018). Partial Root-Zone Drying Technique: from Water Saving to the Improvement of a Fruit Quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 1(January), 1-9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2017.00003>
- Karan, y Subudhi, P. K. (2012). Understanding and exploiting the impact of drought stress on plant physiology. (P. Ahmad & M. N. V. Prasad, Eds.), *Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism, Productivity and Sustainability*. [https://doi.org/10.1007/9781461406341\\_5](https://doi.org/10.1007/9781461406341_5)

- Khaleghi, M., Hassanpour, F., Karandish, F., y Shahnazari, A. (2020). Integrating partial root-zone drying and saline water irrigation to sustain sunflower production in freshwater-scarce regions. *Agricultural Water Management*, 234(February), 106094. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106094>
- Khalil, H. A., Eissa, A. M., El-Shazly, S. M., y Aboul Nasr, A. M. (2011). Improved growth of salinity-stressed citrus after inoculation with mycorrhizal fungi. *Scientia Horticulturae*, 130(3), 624-632. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.08.019>
- Khan, M. A., Gemenet, D. C., y Villordon, A. (2016). Root system architecture and abiotic stress tolerance: Current knowledge in root and tuber crops. *Frontiers in Plant Science*, 7(NOVEMBER2016), 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01584>
- Kong, M., Lampinen, B., Shackel, K., y Crisosto, C. H. (2013). Fruit skin side cracking and ostiole-end splitting shorten postharvest life in fresh figs (*Ficus carica* L.), but are reduced by deficit irrigation. *Postharvest Biology and Technology*, 85, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.06.004>
- Kong, X., Luo, Z., Dong, H., Eneji, A. E., y Li, W. (2012). Effects of non-uniform root zone salinity on water use, Na<sup>+</sup> recirculation, and Na<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> flux in cotton. *Journal of Experimental Botany*, 63(5), 2105-2116. <https://doi.org/10.1093/jxb/err420>
- Kong, X., Luo, Z., Dong, H., Eneji, A. E., y Li, W. (2016). H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and ABA signaling are responsible for the increased Na<sup>+</sup> efflux and water uptake in *Gossypium hirsutum* L. roots in the non-saline side under non-uniform root zone salinity. *Journal of Experimental Botany*, 67(8), 2247-2261. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw026>
- Kong, X., Luo, Z., Dong, H., Li, W., y Chen, Y. (2017). Non-uniform salinity in the root zone alleviates salt damage by increasing sodium, water and nutrient transport genes expression in cotton. *Scientific Reports*, 7(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03302-x>
- Lak, M., Minaei, S., y Rafiei, A. (2019). Temporal and Spatial Field Management Using Crop Growth. *Journal of Agronomy*, 2(1), 138-152.
- Lamacque, L., Charrier, G., Santos Farnese, F. dos, Lemaire, B., Améglio, T., y Herbette,

- S. (2019). Drought-induced mortality: Stem diameter variation reveals a point of no return in lavender species. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/848879>
- Lara, M. Á., Diezma, B., Lleó, L., Roger, J. M., Garrido, Y., Gil, M. I., y Ruiz-Altisent, M. (2016). Hyperspectral imaging to evaluate the effect of irrigation water salinity in lettuce. *Applied Sciences (Switzerland)*, 6(12). <https://doi.org/10.3390/app6120412>
- Lee, W. S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., y Li, C. (2010). Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1), 2-33. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.005>
- Li, D., Fernández, J. E., Li, X., Xi, B., Jia, L., y Hernandez-Santana, V. (2020). Tree growth patterns and diagnosis of water status based on trunk diameter fluctuations in fast-growing *Populus tomentosa* plantations. *Agricultural Water Management*, 241(November), 106348. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106348>
- Lombardini, L., y Rossi, L. (2019). Ecophysiology of Plants in Dry Environments. *Dryland Ecohydrology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23269-6>
- López, A., López, C., Peña, C., Ramírez, C., Tijerina, L., y Carrillo, J. (2008). Secado parcial de la raíz de jitomate: efectos en la fisiología de la planta y calidad de fruto. *Agricultura Técnica en México*, 34(3), 297-302.
- Maalik, A., Khan, F. A., Mumtaz, A., Mehmood, A., Azhar, S., Atif, M., Karim, S., Altaf, Y., y Tariq, I. (2014). Pharmacological applications of quercetin and its derivatives: A short review. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 13(9), 1561-1566. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v13i9.26>
- Marei, N., y Crane, J. C. (1971). Growth and Respiratory Response of Fig ( *Ficus carica* L. cv. Mission) Fruits to Ethylene. *Plant Physiology*, 48(3), 249-254. <https://doi.org/10.1104/pp.48.3.249>
- Mascellani, A., Natali, L., Cavallini, A., Mascagni, F., Caruso, G., Gucci, R., Havlik, J., y Bernardi, R. (2021). Moderate salinity stress affects expression of main sugar metabolism and transport genes and soluble carbohydrate content in ripe fig fruits (*Ficus carica* L. cv. dottato). *Plants*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/plants10091861>

- Mawa, S., Husain, K., y Jantan, I. (2013). *Ficus carica* L. (Moraceae): Phytochemistry, Traditional Uses and Biological Activities. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2013/974256>
- McGovern, T. W. (2002). Botanical briefs: The fig - *Ficus carica* L. *Cutis*, 69(5), 339-340.
- Melgar, J. C., y Lombardini, L. (2010). Ecophysiology of horticultural crops an overview. *Agronomía Colombiana*, 28(1), 71-79.
- Melgarejo-Moreno, P. (1999). El cultivo de la higuera (*Ficus carica* L.). Madrid. Recuperado a partir de [www.stnet.es/amadrid](http://www.stnet.es/amadrid)
- Melgarejo, P., Martínez, J. J., Hernández, F., Salazar, D. M., y Martínez, R. (2007). Preliminary results on fig soil-less culture. *Scientia Horticulturae*, 111(3), 255-259. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.10.032>
- Méndez-Espinoza, C., y Vallejo Reyna, Á. M. (2019). Mecanismos de respuesta al estrés abiótico: hacia una perspectiva de las especies forestales Response. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(56).
- Mendoza-Castillo, V. M., Pineda-Pineda, J., Vargas-Canales, J. M., y Hernández-Arguello, E. (2019). Nutrition of fig (*Ficus carica* L.) under hydroponics and greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 42(11-12), 1350-1365. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609510>
- Mendoza-Castillo, V. M., Vargas-Canales, J. M., Calderón-Zavala, G., Mendoza-Castillo, M. D. C., y Santacruz-Varela, A. (2017). Intensive production systems of fig (*Ficus carica* L.) under greenhouse conditions. *Experimental Agriculture*, 53(3), 339-350. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000405>
- Mlinarić, S., Antunović Dunić, J., Štolfa, I., Cesar, V., y Lepeduš, H. (2016). High irradiation and increased temperature induce different strategies for competent photosynthesis in young and mature fig leaves. *South African Journal of Botany*, 103, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.08.010>
- Montoro, A., Fereres, E., López-Urrea, R., Mañas, F., y López-Fuster, P. (2012). Sensitivity of trunk diameter fluctuations in *Vitis vinifera* L. Tempranillo and Cabernet

- Sauvignon cultivars. *American Journal of Enology and Viticulture*, 63(1), 85-93.  
<https://doi.org/10.5344/ajev.2011.11010>
- Munns, R. (2005, septiembre). Genes and salt tolerance: Bringing them together. *New Phytologist*. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01487.x>
- Nature. (2022). *Ecophysiology*. Recuperado 7 de julio de 2022, a partir de <https://www.nature.com/subjects/ecophysiology>
- Oliveira, A. P., Silva, L. R., Andrade, P. B., Valentao, P., Silva, B. M., Gonc-Alves, R. F., Pereira, J. A., y Guedes de Pinho, P. (2010). Further insight into the latex metabolite profile of *Ficus carica*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(20), 10855-10863. <https://doi.org/10.1021/jf1031185>
- Ortuño, J. A., Hernández, J., y Sánchez-Pedreño, C. (2004). Flow-injection amperometric detection with solvent polymeric membrane ion sensors. *Electroanalysis*, 16(10), 827-831. <https://doi.org/10.1002/elan.200302886>
- Ortuño, M. F., Alarcón, J. J., Nicolás, E., y Torrecillas, A. (2004). Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167(2), 275-280. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.03.023>
- Ortuño, M. F., Conejero, W., Moreno, F., Moriana, A., Intrigliolo, D. S., Biel, C., Mellisho, C. D., Pérez-Pastor, A., Domingo, R., Ruiz-Sánchez, M. C., Casadesus, J., Bonany, J., y Torrecillas, A. (2010). Could trunk diameter sensors be used in woody crops for irrigation scheduling? A review of current knowledge and future perspectives. *Agricultural Water Management*, 97(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.008>
- Palmeira, L., Pereira, C., Dias, M. I., Abreu, R. M. V., Corrêa, R. C. G., Pires, T. C. S. P., Alves, M. J., Barros, L., y Ferreira, I. C. F. R. (2019). Nutritional, chemical and bioactive profiles of different parts of a Portuguese common fig (*Ficus carica* L.) variety. *Food Research International*, 126, 10. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108572>
- Pau, G., Fuchs, F., Sklyar, O., Boutros, M., y Huber, W. (2010). *EImage--an R package*

- for image processing with applications to cellular phenotypes. *Bioinformatics*, 26(7), 979-981. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq046>
- R Core Team. (2021). A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Recuperado a partir de <https://www.r-project.org/>.
- Redwan, M., Spinelli, F., Marti, L., Bazihizina, N., Azzarello, E., Mancuso, S., y Masi, E. (2017). Investigation of root signaling under heterogeneous salt stress: A case study for *Cucumis sativus* L. *Environmental and Experimental Botany*, 143, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.08.001>
- Reef, R., Markham, H. L., Santini, N. S., y Lovelock, C. E. (2015). The response of the mangrove *Avicennia marina* to heterogeneous salinity measured using a split-root approach. *Plant and Soil*, 393(1-2), 297-305. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2489-2>
- Rigon, J. P. G., Capuani, S., Fernandes, D. M., y Guimarães, T. M. (2016). A novel method for the estimation of soybean chlorophyll content using a smartphone and image analysis. *Photosynthetica*, 54(4), 559-566. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0214-x>
- Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., González-Acuña, I. J., Flores-López, H. E., Ramírez-Ojeda, G., Ortiz-Trejo, C., Byerly-Murphy, K. F., y Martínez-Parra, R. A. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos (Segunda Ed)*. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México: INIFAP Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco.
- Sadder, M. T. (2010). Growth Pattern and Fruit Characteristics of Six Common Fig (*Ficus carica* L.) Cultivars in Jordan. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 2(2).
- Sadder, M. T., Alshomali, I., Ateyyeh, A., y Musallam, A. (2021). Physiological and molecular responses for long term salinity stress in common fig (*Ficus carica* L.). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 27(1), 107-117. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00921-z>

- SADER. (2020). Higo, fruto de gran historia presente en nuestra canasta de dulces tradicionales. Recuperado 20 de diciembre de 2020, a partir de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/higo-fruto-de-gran-historia-presente-en-nuestra-canasta-de-dulces-tradicionales?idiom=es>
- Sadras, V. O. (2009). Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. *Irrigation Science*, 27(3), 183-190. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0141-0>
- Sarma, B., Das, K., y Bora, S. S. (2020). Physiology of Fruit Development. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(6), 504-521. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.906.066>
- Servicio Meteorológico Nacional. (2020). Información Estadística Climatológica. Recuperado 30 de diciembre de 2020, a partir de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales5110/NORMAL05048.TXT>
- Shrivastava, P., y Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*. King Saud University. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- SIAP. (2022). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola. Recuperado 20 de diciembre de 2020, a partir de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Simonneau, T., Habib, R., Goutouly, J., y Huguet, J. (1993). Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content: direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44(3), 615-621.
- Solomon, A., Golubowicz, S., Yablowicz, Z., Grossman, S., Bergman, M., Gottlieb, H. E., Altman, A., Kerem, Z., y Flaishman, M. A. (2006). Antioxidant activities and anthocyanin content of fresh fruits of common fig (*Ficus carica* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(20), 7717-7723. <https://doi.org/10.1021/jf060497h>

- Souza, A. P. de, Silva, A. C. da, Leonel, S., y Escobedo, J. F. (2009). Temperaturas basais e soma térmica para a figueira podada em diferentes épocas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 31(2), 314-322. <https://doi.org/10.1590/s0100-29452009000200005>
- Stover, E., Aradhya, M., Ferguson, L., y Crisosto, C. H. (2007). The fig: Overview of an ancient fruit. *HortScience*, 42(5), 1083-1087. <https://doi.org/10.21273/hortsci.42.5.1083>
- Sumesh, K. C., Ninsawat, S., y Som-ard, J. (2021). Integration of RGB-based vegetation index, crop surface model and object-based image analysis approach for sugarcane yield estimation using unmanned aerial vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180(November 2020), 105903. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105903>
- Sumner, M. (2000). Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Presentado en el VIII Congreso Argentino de Siembra Directa, AAPRESID. Mar del Plata, 17. Recuperado a partir de [http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/2549DCC5177210A303257967007E015C/\\$FILE/AA 5.pdf](http://lacs.ipni.net/ipniweb/region/lacs.nsf/0/2549DCC5177210A303257967007E015C/$FILE/AA%205.pdf)
- Sun, Y., Feng, H., y Liu, F. (2013). Comparative effect of partial root-zone drying and deficit irrigation on incidence of blossom-end rot in tomato under varied calcium rates. *Journal of Experimental Botany*, 64(7), 2107-2116. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert067>
- Taiz, L., y Zeiger, E. (2002). Plant physiology. En *Plant Physiology* (3.<sup>a</sup> ed., p. 690). Sinauer Associates.
- Thomas, A., Yadav, B. K., y Šimůnek, J. (2020). Root water uptake under heterogeneous soil moisture conditions: an experimental study for unraveling compensatory root water uptake and hydraulic redistribution. *Plant and Soil*, 457(1-2), 421-435. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04738-3>
- TRIDGE. (2020a). Importación global, tendencias de importación y principales países importadores de Fig. Recuperado 18 de diciembre de 2020, a partir de <https://www.tridge.com/trades/080420-080420-fruit-edible-figs-fresh-or-dried/import>

- TRIDGE. (2020b). Tendencias globales de producción. Recuperado 17 de diciembre de 2021, a partir de <https://www.tridge.com/production/0569>
- Tzohar, D. (2021). Compensatory hydraulic uptake of water by tomato due to variable root-zone salinity. *Vadose Zone Journal*, (May), 1-14. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20161>
- UN. (2010). UN. Recuperado 17 de marzo de 2022, a partir de [https://www.un.org/en/events/desertification\\_decade/whynow.shtml](https://www.un.org/en/events/desertification_decade/whynow.shtml)
- UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019, 2-12. Recuperado a partir de [www.unesco.org/water/wwap](http://www.unesco.org/water/wwap).
- Valenzuela, F. J., Reineke, D., Leventini, D., Cody, C., Chen, L., Barrett-lennard, E. G., Colmer, T. D., Dodd, I. C., Shabala, S., y Brown, P. (2022). Plant responses to heterogeneous salinity: agronomic relevance and research priorities. *Annals of Botany*, 1(19). <https://doi.org/10.1093/aob/mcac022>
- Vangelisti, A., Zambrano, L. S., Caruso, G., Macheda, D., Bernardi, R., Usai, G., Mascagni, F., Giordani, T., Gucci, R., Cavallini, A., y Natali, L. (2019). How an ancient, salt-tolerant fruit crop, *Ficus carica* L., copes with salinity: a transcriptome analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39114-4>
- Vázquez, C., Batis Muñoz, A. I., Alcocer Silva, M. I., M., G. D., y C, S. D. (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO. Recuperado a partir de [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/50-morac5m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/50-morac5m.pdf)
- Velmurugan, A., Swarnam, P., Subramani, T., Meena, B., y Kaledhonkar, M. J. (2020). Water Demand and Salinity. *Desalination - Challenges and Opportunities*, 1-11. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88095>
- Wang, W., Vinocur, B., y Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. *Planta*, 218(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5>

- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T., Miller, E., Bache, S., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K., y Yutani, H. (2019, noviembre 21). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wu, T., Zhang, H. T., Wang, Y., Jia, W. S., Xu, X. F., Zhang, X. Z., y Han, Z. H. (2012). Induction of root Fe(III) reductase activity and proton extrusion by iron deficiency is mediated by auxin-based systemic signalling in *Malus xiaojinensis*. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 859-870. <https://doi.org/10.1093/jxb/err314>
- Yakir, D., y Yechieli, Y. (1995). Plant invasion of newly exposed hypersaline Dead Sea shores. *Nature*, 374, 803–805.
- Yang, Y., y Guo, Y. (2018). Unraveling salt stress signaling in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 60(9), 796-804. <https://doi.org/10.1111/jipb.12689>
- Zarei, M., Azizi, M., y Tehranifar, A. (2016). Evaluation of NaCl Salinity Tolerance of Four Fig Genotypes Based on Vegetative Growth and Ion Content in Leaves , Shoots , and Roots. *HortScience*, 51(11), 1427-1434. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11009-16>
- Zhang, H., Wang, R., Wang, H., Liu, B., Xu, M., Guan, Y., Yang, Y., Qin, L., Chen, E., Li, F., Huang, R., y Id, Y. Z. (2019). Heterogeneous root zone salinity mitigates salt injury to *Sorghum bicolor* ( L .) Moench in a split-root system. *PLoS ONE*, 14(12), 1-24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227020>
- Zhang, M., Zhou, J., Sudduth, K. A., y Kitchen, N. R. (2020). Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. *Biosystems Engineering*, 189(December 2019), 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.001>
- Zhang, P., Senge, M., y Dai, Y. (2016). Effects of Salinity Stress on Growth, Yield, Fruit Quality and Water Use Efficiency of Tomato Under Hydroponics System. *Reviews in Agricultural Science*, 4(0), 46-55. <https://doi.org/10.7831/ras.4.46>

Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. Cell. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.08.029>