



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO MEDIANTE  
DIFUSORES SUBTERRÁNEOS Y SU EFECTO EN LA  
ECOFISIOLOGÍA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN  
HIGUERA (*Ficus carica* L.)

T E S I S

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencias**

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación en Agricultura Sustentable)

P r e s e n t a

**Gregorio Lucero Vega**

La Paz, Baja California Sur, junio de 2018

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10 horas del día 11 del Mes de Junio de 2018, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"DISEÑO DE UN SISTEMA DE RIEGO MEDIANTE DIFUSORES SUBTERRÁNEOS Y SU EFECTO EN LA ECOFISIOLOGÍA Y PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN HIGUERA (*Ficus carica* L.)"**


Presentada por el alumno:

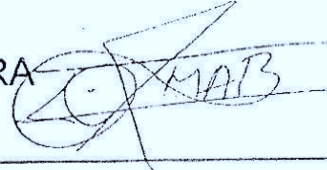
Gregorio Lucero Vega

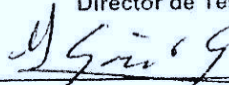
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN Agricultura Sustentable


Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

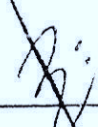
LA COMISIÓN REVISORA

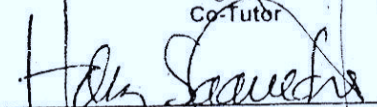
  
\_\_\_\_\_  
Dr. Enrique Troyo Diéguez  
Director de Tesis

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Bernardo Murillo Amador  
Co-Tutor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alejandra Nieto Garibay  
Co-Tutor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Sergio Zamora Salgado  
Co-Tutor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Higinio Ruiz Espinoza  
Co-Tutor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. Norma Yolanda Hernández Saavedra,  
Directora de Estudios de Posgrado y  
Formación de Recursos Humanos

## **COMITÉ TUTORIAL**

### **Director de Tesis**

Dr. Enrique Troyo Diéguez  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

### **Co-Tutor**

Dr. Bernardo Murillo Amador  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

### **Co-Tutor**

Dra. Alejandra Nieto Garibay  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

### **Co-Tutor**

Dr. Sergio Zamora Salgado  
Universidad Autónoma de Baja California Sur

### **Co-Tutor**

Dr. Francisco Higinio Ruiz Espinoza  
Universidad Autónoma de Baja California Sur

## **COMITÉ REVISOR**

Dr. Enrique Troyo Diéguez  
Dr. Bernardo Murillo Amador  
Dra. Alejandra Nieto Garibay  
Dr. Sergio Zamora Salgado  
Dr. Francisco Higinio Ruiz Espinoza

## **JURADO DE EXAMEN DE GRADO**

Dr. Enrique Troyo Diéguez  
Dr. Bernardo Murillo Amador  
Dra. Alejandra Nieto Garibay  
Dr. Sergio Zamora Salgado  
Dr. Francisco Higinio Ruiz Espinoza

## **SUPLENTES**

Dr. Félix Alfredo Beltrán Morales  
Dra. Yolanda Lourdes Maya Delga

## Resumen

Los sistemas de riego de aporte subterráneo han sido objeto de investigación por varios años; en países como EUA, Israel y España, estudios formales durante los últimos 35 años han logrado avances importantes en relación a su funcionamiento desde la óptica hidráulica y en relación al incremento de la productividad del agua, sin embargo, es un sistema cuya aceptación por parte de los usuarios ha sido lenta y con dificultades, debido los problemas que se presentan en campo al operar los sistemas. Uno de los inconvenientes principales se relaciona con los daños producidos por roedores, que en ocasiones dejan al sistema inoperante. En el presente trabajo de investigación se pretende rescatar las bondades del sistema de riego subterráneo, con un nuevo diseño denominado riego subterráneo por difusión (RSD), resolviendo los problemas actuales. Para evaluar dicha tecnología se diseñaron dos experimentos con la finalidad de realizar comparaciones entre tres sistemas de riego, de los cuales dos son sistemas superficiales, riego por goteo con cinta (RGC) y riego localizado en franjas (RLZ), comparados con un sistema de aporte subterráneo RSD. El primer experimento se diseñó para evaluar la pérdida de agua por evaporación directa del suelo; los resultados mostraron una marcada diferencia, la cual fue de 30% entre RSD y RLZ, y de 44% entre RSD y RGC, donde el sistema que mostró menor evaporación directa del suelo fue RSD. El segundo experimento consistió en la evaluación de tres sistemas de riego, dos de aporte superficial y uno de aporte subterráneo; se evaluaron las relaciones hídricas-suelo-planta-atmosfera en un cultivo de higuera variedad White Kadota (*Ficus carica* L.); también se comparó la productividad del agua para cada uno de los sistemas en el cultivo de higuera en relación a la producción de siconos frescos. Los resultados no mostraron diferencias notorias en las relaciones hídricas suelo-planta-atmosfera, sin embargo, mostraron diferencia muy marcada en la productividad del agua, en relación a la producción de siconos frescos; se obtuvo un Kg de higo fresco con: 0.86 m<sup>3</sup> en el sistema RSD, 1.88 m<sup>3</sup> en el sistema RGC y 2.46 m<sup>3</sup> en el sistema RLZ.

### Palabras clave:

Riego subterráneo, Aporte subterráneo, Evaporación, *Ficus carica*, Higuera, Temperatura de suelo, Productividad del agua, Riego superficial.

Vo. Bo. Director de Tesis



Dr. Enrique Troyo Diéguez.

## Summary

Underground irrigation systems have been investigated for several years; in countries such as the USA, Israel and Spain, formal studies during the last 35 years have made important advances in relation to their operation from the hydraulic perspective and in relation to the increase in water productivity, however, it is considered a system whose acceptance by users has been slow and difficult, due to the problems that arise in the field when operating them. One of the main problems is related to the damage produced by rodents, which sometimes leave the system inoperative. The aim of this research was to take advantage of the benefits of the underground irrigation system, with a new design called underground irrigation by diffusion (RSD), solving current problems. To evaluate this technology, two experiments were designed in order to perform comparisons among three irrigation systems, including two surface systems, drip irrigation with tape (RGC) and a localized irrigation in strips (RLZ), which were compared with a RSD underground system. The first experiment was designed to evaluate the loss of water by direct evaporation from the soil; results showed a marked difference, which was 30% between RSD and RLZ, and 44% between RSD and RGC, where the system that showed the lowest direct evaporation from the soil was RSD. The second experiment consisted in the evaluation of three irrigation systems, two of them based on surface contribution and one based on underground supply. The soil-water-atmosphere relationships were evaluated in a group of fig trees, variety White Kadota (*Ficus carica* L.). The productivity of water for each of the systems in the group of fig trees in relation to the production of fresh fruit was also compared. The results showed no notorious differences in the water relations soil-atmosphere, however, they showed significant differences in the productivity of water, in relation to the production of fresh fig; in this sense, one kg of fresh fig was obtained with: 0.86 m<sup>3</sup> in the RSD system, 1.88 m<sup>3</sup> in the RGC system and 2.46 m<sup>3</sup> in the RLZ system.

### Keywords:

Underground irrigation, Underground supply, Evaporation, *Ficus Carica*, Fig tree, Soil temperature, water productivity, surface irrigation.

**Vo. Bo. Director de Tesis**



**Dr. Enrique Troyo Diéguez.**

## Dedicatoria

**A Dios:** que me dio una familia maravillosa que me apoya en todo momento y amigos sinceros que enriquecen mi vida.

**A mi esposa:** Alma Lorena Gastelum Félix, por brindarme amor y apoyo en todo momento, ya que con su ejemplo y dedicación me motiva a cumplir nuestras metas, gracias por todo Amor.

**A mis hijas:** Andrea y Estrella, quienes con su alegría y entusiasmo contagian a todos los que con ellas convivimos y son una constante fuente de inspiración para continuar todos los días y cumplir la metas por más altas que estas sean, con su presencia hacen que nuestra vida sea más feliz.

**A mis padres:** Juan Ciro Lucero Flores y Bernardina Vega Hernández, gracias por darme la vida, guiarme por el buen camino y brindarme su apoyo en todo momento.

**A mis hermanos:** Juan José, Raquel, Norberto, Moisés, Isidro y Estrella, quienes son personas maravillosas que han tenido una influencia positiva en mi vida y estoy seguro que siempre puedo contar con su apoyo incondicional.

## **Agradecimientos**

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la beca otorgada (No. 335461) para realizar el proyecto durante el tiempo que permanecí en el programa de doctorado.

**Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR)**, por haberme formado como un buen estudiante y permitirme adquirir los conocimientos útiles que me ayudaron a culminar el programa de doctorado, gracias a los maestros y doctores que me apoyaron siempre que fue necesario.

**Al proyecto del Fondo Sectorial SEP-CONACyT de Ciencia Básica:** Determinación y construcción de indicadores de la huella hídrica y desertificación como consecuencia de la sobreexplotación agropecuaria y del cambio climático en cuencas de zonas áridas Clave: 0134460. Por el apoyo otorgado.

**A la Dirección de Estudios de Posgrado**, Dra. Norma Hernández, Lic. Osvelia Ibarra, Lic. Claudia Olachea, Lic. Leticia Rubio, C. Tania Núñez y Lic. Horacio Sandoval, por su apoyo en todo lo necesario durante mi estancia en el CIBNOR.

**A mi director de tesis y tutores**, Dr. Enrique Troyo Diéguez, Dr. Sergio Zamora Salgado, Dr. Francisco Higinio Ruiz Espinoza, Dr. Bernardo Murillo Amador, Dra. Alejandra Nieto Garibay, por su valiosa asesoría y correcciones en mi trabajo de tesis a todos muchas gracias.

**A investigadores, técnicos administrativos, alumnos y personal en general**, Al personal del Laboratorio de Irrigación, Álvaro González Michel, Juan E. Vega Mayagoitia y Arturo Cruz Falcón; Al Laboratorio de Edafología, Manuel S. Trasviña Castro y Myriam L. Hernández De haro; de Fisiotecnia Vegetal, Lidia Hiraes Lucero y Maria del Carmen Mercado Guido; asimismo, a los técnicos del Campo Experimental, Adrián Jordán Castro, José Raymundo Ceseña Nuñez y Saúl E. Briseño Ruíz; También al Sr. Ernesto Díaz Rivera y a Guillermo García Cortez, por su fructífera colaboración.

**A mis compañeros, estudiantes del posgrado**, Federico Soto Landeros, Fernando Pio, Yuneisy Milagro, Daulemis Batista, Carlos Michel Ojeda, Guillermo Portillo y Emilio García, por brindarme su amistad, y apoyo en todo momento.

<b>Contenido</b>	
<b>Resumen</b> .....	i
<b>Summary</b> .....	ii
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	v
<b>Lista de figuras</b> .....	ix
<b>Lista de tablas</b> .....	xi
<b>Abreviaturas</b> .....	xii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	3
2.1 Manejo del agua en agricultura.....	3
2.2 Sistema de riego por goteo subterráneo comercial RGS.....	5
2.3 Pérdida de agua por evaporación directa del suelo.....	6
2.4 Situación actual del riego por goteo subterráneo RGS.....	7
2.5 La higuera <i>Ficus carica</i> L.....	7
2.5.1 Clasificación de las higueras.....	9
2.5.1.1 Higueras tipo Esmirna.....	9
2.5.1.2 Cabrahigos .....	9
2.5.1.3 Higueras comunes.....	9
2.5.1.4 Higueras Bíferas .....	10
2.5.1.5 Higueras Uníferas.....	10
2.5.1.6 Tipo San Pedro.....	10
2.5.2 Variedades .....	10
2.5.3 Importancia del cultivo.....	11
2.5.4 Morfología .....	12
2.5.4.1 Sistema radicular .....	12
2.5.4.2 Sistema aéreo, tronco y ramas.....	13
2.5.4.3 Yemas.....	13
2.5.4.4 Hojas.....	14
2.5.4.5 Flores.....	15



2.5.4.6	Frutos.....	16
2.5.5	Requerimientos climáticos de la higuera.....	18
2.5.6	Umbrales térmicos para la higuera.....	18
2.5.7	Suelo óptimo para el cultivo de higuera .....	18
2.5.8	Necesidades de nutrientes de la higuera .....	19
2.5.9	Establecimiento de plantación.....	20
2.5.10	Poda de la higuera .....	20
2.5.10.1	Poda de formación.....	20
2.5.10.2	Poda de producción.....	21
2.5.11	Requerimiento de agua del cultivo de higuera. ....	21
2.6	Efectos del déficit hídrico en frutales .....	21
<b>3.</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>22</b>
<b>4.</b>	<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>23</b>
<b>5.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>23</b>
5.1	Objetivos específicos .....	23
<b>6.</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
6.1	Ubicación .....	24
6.2	Clima.....	24
6.3	Suelo.....	24
6.4	Agua .....	24
6.5	Experimentos .....	25
6.6	Material y métodos.- Primer experimento .....	25
6.6.1	Clima de la zona de estudio .....	26
6.6.2	Instalación de sistemas de riego .....	26
6.6.3	Tratamiento 1. Riego localizado en zanjas RLZ.....	27
6.6.4	Tratamiento 2. Riego subterráneo por difusores RSD.....	27
6.6.5	Tratamiento 3. Riego por goteo con cinta RGC .....	28
6.6.6	Muestreo de suelo.....	29
6.6.7	Caracterización del suelo .....	30
6.6.8	Determinación de la humedad en el suelo .....	30
6.6.9	Análisis estadísticos .....	31

6.6.10	Medición de la temperatura de suelo .....	31
6.7	Material y métodos.- Segundo experimento .....	32
6.7.1	Tratamiento 1. Riego localizado en zanjas RLZ.....	33
6.7.2	Tratamiento 2. Riego subterráneo por difusores RSD.....	34
6.7.3	Tratamiento 3. Riego por goteo con cinta RGC .....	36
6.7.4	Control de la humedad en el suelo.....	37
6.7.5	Determinación del volumen del suelo humedecido (volumen del bulbo) para cada sistema de riego. ....	37
6.7.6	Determinación del pulso de riego para cada sistema de riego.....	38
6.7.7	Determinación de la HFA para el sistema de RSD.....	39
6.7.8	Uso de tensiómetros para el monitoreo y control de la humedad en el suelo.....	40
6.7.9	Fertilización .....	41
6.7.10	Monitoreo de la planta.....	42
6.7.10.1	Variables morfométricas:.....	42
6.7.10.2	Variables ecofisiológicas.....	44
<b>7.</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>46</b>
7.1	Resultados.- Primer experimento.....	46
7.1.1	Tipo de suelo.....	46
7.1.2	Resultados de temperatura del suelo.....	55
7.2	Resultados.- Segundo experimento.....	58
7.2.1	Variables morfométricas.....	58
7.2.2	Variables ecofisiológicas.....	60
7.2.3	Cosecha de higo fresco durante el ciclo 2016.....	63
7.2.4	Consumo de agua en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego durante el ciclo 2016 .....	66
7.2.5	Productividad del agua en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego. ....	66
<b>8.</b>	<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>67</b>
8.1	Discusión.- Primer experimento .....	67
8.2	Discusión.- Segundo experimento .....	68
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>71</b>

9.1 Conclusiones.- Primer experimento .....	71
9.2 Conclusiones.- Segundo experimento .....	71
<b>10. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>73</b>
<b>11. ANEXOS .....</b>	<b>78</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Uso ineficiente del agua en riego por gravedad (tomada de Flores-Gallardo <i>et al.</i> , 2017).....	4
<b>Figura 2.</b> Planta de higuera en su primer año de producción. ....	8
<b>Figura 3.</b> Yema terminal de higuera.....	13
<b>Figura 4.</b> Yema axilar de higuera.....	14
<b>Figura 5.</b> Hoja de higuera mostrando el haz.....	15
<b>Figura 6.</b> Hoja de higuera mostrando el envés. ....	15
<b>Figura 7.</b> Siconos de diferentes tamaños de la variedad White Kadota .....	17
<b>Figura 8.</b> Croquis de instalación espacial de tres sistemas de riego en el Campo Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C. S., México.....	26
<b>Figura 9.</b> Sistemas de riego. (A) localizado en zanjas RLZ; (B) subterráneo por difusores RSD, (C) por goteo con cinta RGC. ....	28
<b>Figura 10.</b> Barrena de media caña. ....	30
<b>Figura 11.</b> Bulbo húmedo de cada uno de los sistemas de riego del experimento. (A) RLZ, (B) RSD y (C) RGC.....	31
<b>Figura 12.</b> Diseño de bloques al azar con arreglo en franjas.....	33
<b>Figura 13.</b> Sistema RLZ después de un riego. ....	34
<b>Figura 14.</b> Difusor subterráneo .....	35
<b>Figura 15.</b> Sistema RSD en operación .....	35
<b>Figura 16.</b> Receptor de sistema RSD que conecta con difusor subterráneo, recibiendo agua.....	36
<b>Figura 17.</b> Cinta de riego por goteo RGC en operación.....	36
<b>Figura 18.</b> Parámetros de humedad del suelo, Campo Agrícola Experimental CIBNOR. ....	38
<b>Figura 19.</b> Gráfica de calibración de tensiómetros en el sistema RSD.....	41
<b>Figura 20.</b> Temperaturas promedio mensuales durante el año 2016 en el lugar del experimento.....	44
<b>Figura 21.</b> Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 24 a 29 de septiembre de 2015. ....	48

<b>Figura 22.</b> Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 18 a 23 de enero de 2016.....	49
<b>Figura 23.</b> Evaporación acumulada de tres sistemas de riego en (2015).....	49
<b>Figura 24.</b> Evaporación acumulada de tres sistemas de riego en (2016).....	50
<b>Figura 25.</b> Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, septiembre de 2015. (a): RLZ, (b): RSD, (c): RGC.....	52
<b>Figura 26.</b> Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, enero de 2016. (a): RLZ, (b): RSD, (c): RGC. ....	52
<b>Figura 27.</b> Tendencia de la temperatura del suelo en el período del 24 al 29 de septiembre de 2015.....	56
<b>Figura 28.</b> Tendencia de la temperatura del suelo en el período 18 al 23 de enero de 2016. ....	57
<b>Figura 29.</b> Grosor promedio de tallos productores, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.....	58
<b>Figura 30.</b> Longitud promedio de tallos productores, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.....	59
<b>Figura 31.</b> Longitud de hoja, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.....	59
<b>Figura 32.</b> Medias y desviaciones estándar de la variable tasa fotosintética para tres fechas durante el año 2016. ....	61
<b>Figura 33.</b> Medias y desviaciones estándar de la variable clorofila total para tres fechas durante el año 2016. ....	61
<b>Figura 34.</b> Medias y desviaciones estándar de la variable potencial hídrico en la hoja.....	62
<b>Figura 35.</b> Medias y desviaciones estándar de la variable potencial potencial mátrico; profundidad 0 a 10 cm. ....	62
<b>Figura 36.</b> Medias y desviaciones estándar de la variable potencial índice SPAD.....	63
<b>Figura 37.</b> Higo fresco, cosecha 2016. ....	65
<b>Figura 38.</b> Rendimiento de higo fresco por planta, durante el ciclo 2016 con diferentes sistemas de riego.....	65
<b>Figura 39.</b> Consumo de agua en litros por planta para cada mes en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego durante el ciclo 2016.....	66

## Lista de tablas

<b>Tabla I.</b> Contenido nutricional de 100 g de pulpa comestible de sicono (Fuente: Morton 1987).....	17
<b>Tabla II.</b> Fertilización para el cultivo intensivo de higuera, los valores se expresan en Unidades por hectárea. ....	19
<b>Tabla III.</b> Dimensiones del bulbo húmedo por planta, para cada sistema de riego. ....	37
<b>Tabla IV.</b> Programas de fertilización para el cultivo de higuera; los valores se expresan en partes por millón (ppm).....	42
<b>Tabla V.</b> Promedios mensuales de las variables climáticas registradas en el lugar del experimento durante el año 2016. ....	43
<b>Tabla VI.</b> Porcentaje de humedad del suelo, a cada profundidad, sistema de riego y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 24 a 29 de septiembre de 2015. ..	47
<b>Tabla VII.</b> Contenido de humedad del suelo a cada profundidad, tratamiento y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 18 a 23 de enero de 2016.....	48
<b>Tabla VIII.</b> Pérdida por evaporación directa de suelo desnudo con tres sistemas de riego, posterior a un riego de $10 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}$ , equivalente a $100 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ .....	51
<b>Tabla IX.</b> Resumen de ANDEVAS y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 24 al 29 de septiembre de 2015. ....	53
<b>Tabla X.</b> Resumen de ANDEVA y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 18 al 23 de enero de 2016.....	54
<b>Tabla XI.</b> Comparación de medias para el mes de mayo de 2016.....	60
<b>Tabla XII.</b> Comparación de medias para el mes de noviembre de 2016.....	60
<b>Tabla XIII.</b> Resumen de cosecha por mes, promedio por árbol. ....	64
<b>Tabla XIV.</b> Producción por planta en todo el ciclo.....	64

**Abreviaturas**

cbar	Centibar
CC	Capacidad de campo
CE	Conductividad eléctrica
Da	Densidad aparente
$dS \cdot m^{-1}$	Decisiemens por metro
$E_o$	Evaporación potencial
ha	Hectárea
HA	Humedad aprovechable
HFA	Humedad fácilmente aprovechable
MCA	Metros de columna de agua
MIP	Manejo integrado de plagas
MPa	Mega Pascal
$\mu g \cdot cm^{-2}$	Microgramo por centímetro cuadrado
$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Micromol por metro cuadrado por segundo
ppm	Partes por millón
PSI	Libra sobre pulgada cuadrada
RDC	Riego deficitario controlado
RGC	Riego por goteo con cinta
RLZ	Riego localizado en zanjas
RSD	Riego subterráneo por difusión
tm	Tonelada métrica
VACS	Volumen de agua contenida en el suelo

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, a nivel mundial la presión sobre los recursos hídricos es cada vez mayor, debido al incremento de la población, la demanda de alimentos y al cambio en los hábitos de consumo (Bozkurt *et al.*, 2015). También es cada vez más notoria la competencia por terrenos y agua de buena calidad, que tradicionalmente eran dedicados a la agricultura, los cuales pasan a formar parte de áreas residenciales o industriales; dicha situación obliga a la agricultura a ser más intensiva que extensiva, con tendencia muy clara de producir mayor cantidad de alimento con menos agua (Glavan *et al.*, 2013). En México, la mitad del territorio nacional afronta escases hídrica, situación agravada por la baja eficiencia en el uso del agua agrícola (CONAGUA, 2011). Una alternativa para lograr mayor eficiencia en el uso del agua destinada a la agricultura, es emplear sistemas de riego más eficientes; se ha demostrado que el sistema de mayor eficiencia para colocar agua y nutrientes en la zona más activa de la raíz es el riego subterráneo (Bozkurt *et al.*, 2015; Bryla *et al.*, 2003).

En Baja California Sur (BCS), México, los sistemas de riego empleados en frutales son el de microaspersión, riego por gravedad y goteo superficial “convencional” (RGC), aunque dichos sistemas no muestran alta eficiencia (Ghamarnia y Sepehri, 2010; Liu *et al.*, 2014).

Comparaciones realizadas entre riego por microaspersión y riego por goteo subterráneo (RGS), más la estrategia de riego deficitario controlado (RDC), indican que se ahorra hasta 60% del volumen de agua utilizado (Parra *et al.*, 2009). El sistema RGS comercial funciona adecuadamente desde la óptica hidráulica, aunque es vulnerable a diversos factores, entre otros, es afectado por roedores (topos) y es susceptible al taponamiento por diversas causas (Payero *et al.*, 2005). Por lo antes expuesto, se propone un sistema de riego subterráneo por difusión (RSD), que rescata las ventajas del RGS, sin los problemas del sistema actual.



Entre las actividades más rentables de la agricultura destaca la fruticultura, actividad con producción de alto valor agregado; para las zonas áridas existen varias opciones de especies frutales, una alternativa considerando su rusticidad y demanda de agua, relativamente baja, es el cultivo de higuera (*Ficus carica* L.) (Irget *et al.*, 2008; Melgarejo, 2000)

La higuera es un árbol frutal de la familia de las moráceas y del género *Ficus*, en el cual se agrupan más de 750 especies (Barolo *et al.*, 2014). Aunque la higuera es originaria de Asia Central, con el paso del tiempo se distribuyó por toda la región mediterránea donde se encuentra bien adaptada. Es una especie tolerante a varios tipos de suelo, prospera con aguas de baja calidad y es tolerante a periodos prolongados de sequía; dichas condiciones le han valido para estar distribuida actualmente en gran parte del mundo donde existen climas con inviernos moderados (Pereira *et al.*, 2015; Villalobos *et al.*, 2014). Es uno de los primeros frutales cultivados por el hombre, utilizado por los pueblos antiguos como alimento, refugio, medicinas y en ceremonias espirituales. Es una especie que tiene un elevado potencial para diversos climas con inviernos moderados y un buen sujeto de estudio para probar un nuevo sistema de riego por su rápido desarrollo y potencial productivo e importancia para nuestro país.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Manejo del agua en agricultura

En el sector agrícola el manejo rutinario del agua es inadecuado, incluyendo la fruticultura, donde el diseño de sistemas de riego comúnmente no considera la situación hídrica actual, mostrando baja uniformidad, toda vez que operan de manera inapropiada con riego en exceso y frecuencias no sustentadas científicamente. En zonas áridas, con alta radiación solar, elevadas temperaturas y agua de baja calidad, para calcular la frecuencia de riego idónea, se requiere considerar la textura del suelo, profundidad de raíz, variaciones climáticas y consumo del cultivo, todo ello apoyado con instrumentos de medición como el tensiómetro (Selim *et al.*, 2013). En este sentido, el manejo inadecuado ocasiona obstrucción de emisores, baja uniformidad y desperdicio de agua, en perjuicio de los demás sectores de la sociedad. La escasa modernización tecnológica y baja inversión en algunas zonas obliga a los agricultores a usar los sistemas de riego por gravedad, que tienen muy baja eficiencia en el uso del agua (Fig. 1) En la actualidad, la agricultura de zonas áridas y semiáridas ejerce un rol importante en los sectores económicos y culturales del mundo (Santos *et al.*, 2007).



**Figura 1.** Uso ineficiente del agua en riego por gravedad (tomada de Flores-Gallardo *et al.*, 2017).

Molden *et al.* (2010) aseguran que existe un amplio margen para mejorar la productividad del agua en los cultivos de todo el mundo y citan varios ejemplos de sistemas de riego que pueden contribuir a esta causa: riego suplementario, riego deficitario, riego de precisión, acuaponía, cultivos hidropónicos, prácticas de conservación de suelo-agua y riego subterráneo. La aplicación de mulching (paja de arroz) sobre la superficie del suelo donde se ubica la manguera de goteo fue probada en el cultivo de uva, al respecto, Zhang *et al.* (2014) confirman que es una técnica que incrementa el uso eficiente del agua.

Autores con destacada experiencia en RGS, como Ayars *et al.* (1999), mediante una investigación en los Estados Unidos durante 15 años sobre dicho sistema de riego en cultivos de algodón, maíz y melón, demostraron un incremento significativo en el rendimiento y eficiencia del uso de agua. Por otra parte, Thompson *et al.* (2009) publicaron sobre el uso del RGS y aseguraron que el sistema mantiene la superficie de suelo seca, lo cual contribuye de manera

significativa al control de plantas arvenses. Asimismo, afirmaron que al aplicar menos agua, se reduce la lixiviación de  $\text{NO}_3$  en comparación con el riego superficial, lo cual permite alcanzar mayores rendimientos, proporcionando agua y nutrientes a la parte más activa de la zona de las raíces. En Brasil, Dos Santos *et al.* (2016) realizaron un experimento en cultivo de caña de azúcar; trabajaron con dos profundidades en la instalación de sistemas de riego subterráneos, donde colocaron la línea regante a 0.20 y 0.40 m de profundidad. Al respecto, concluyeron que el sistema de RGS instalado a 0.20 m proporcionó las mejores condiciones en relación al contenido de agua en las diferentes profundidades del suelo, lo cual favorece un adecuado equilibrio de agua y oxígeno en las raíces.

## 2.2 Sistema de riego por goteo subterráneo comercial RGS

El principal componente para un sistema de riego por goteo subterráneo comercial RGS para árboles frutales, es la manguera de goteo, fabricada con polietileno de baja densidad, cuyo espesor de pared oscila de 0.5 a 1.2 mm. Las mangueras cuentan con goteros integrados especiales que tienen función autocompensada y antidrenante; los goteros se encuentran ubicados dentro de la manguera con una separación de 0.3 a 1.0 m y los caudales por emisor oscilan de 1.0 a 3.5  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$  (Montaña *et al.*, 2005). La correcta elección de una manguera considera la separación entre goteros, el caudal por emisor, textura del suelo y cultivo; las características mencionadas se toman en cuenta para elegir una manguera adecuada y el número de líneas regantes por línea de árboles. Otros componentes del sistema RGS incluyen la bomba para presurizar el agua, filtros, válvulas de control, válvulas expulsoras de aire y un sistema de lavado de mangueras. El sistema es similar a un sistema de riego por goteo convencional o superficial RGC con la diferencia que el tipo de mangueras de goteo es especial y también cuenta con un sistema de expulsión-admisión de aire más elaborado que en el RGC, además de contar con un sistema de lavado de mangueras más eficiente. Es indispensable contar con medidores de presión y un medidor de flujo,

para verificar constantemente el flujo y detectar obstrucciones o fugas en el sistema (Lamm y Camp, 2007; Payero *et al.*, 2005).

En el sistema RGS, las mangueras de goteo son colocadas desde 0.2 hasta 1.0 m de profundidad dependiendo del cultivo y tipo de suelo; para el caso de frutales, se instalan desde dos hasta 6 mangueras de goteo por cada línea de árboles, lo que depende de las condiciones de la huerta, de la especie y del tipo de suelo. El agua se aporta mediante una estrategia que permita proporcionar la cantidad necesaria a los árboles, pero la aplicación se hace en pulsos, lo cual favorece proporcionar el agua necesaria al árbol y mantener una capa de 5 cm de suelo seca en la superficie, buscando disminuir la evaporación y evitar la proliferación de plantas arvenses (Pastor *et al.*, 2006).

### 2.3 Pérdida de agua por evaporación directa del suelo

La evaporación directa de suelo cobra mayor importancia en las primeras etapas de los cultivos anuales, cuando la mayor parte del suelo se encuentra descubierta y posteriormente es rebasada por la pérdida por transpiración del cultivo, sin dejar de ser importante en la suma de todo el ciclo. También en el agroecosistema de árboles frutales es importante, sobre todo en las especies que requieren poda de producción donde el árbol se queda sin hojas, como es el caso de la higuera. En este sentido, se han realizado experimentos para determinar la cantidad de agua que se pierde directamente del suelo, al comparar sistemas de riego de aporte superficial y sistemas de aporte subterráneo. Meshkat *et al.* (2000) compararon el sistema de riego por goteo convencional con un sistema de goteo subterráneo; su ensayo consistió en enterrar un tubo en el suelo para regar a profundidad; reportaron que la diferencia de evaporación entre el sistema superficial y el subterráneo es 39.8%. También Montemayor *et al.* (2006) en el cultivo de maíz forrajero compararon el sistema de riego por goteo superficial contra el subterráneo y encontraron un 27.4% de ahorro en el sistema subterráneo. En otro experimento, Godoy *et al.* (2005) compararon dos sistemas

de riego por goteo, uno de aporte superficial y otro subterráneo y encontraron que el subterráneo ahorró 30.6% del volumen de agua aplicado. En todos los casos analizados de investigaciones que han trabajado con riego subterráneo y superficial, se concluye que existe ahorro significativo en el aporte de agua con sistemas subterráneos, debido principalmente a la disminución de la evaporación directa del suelo.

#### 2.4 Situación actual del riego por goteo subterráneo RGS

El sistema RGS se ha empleado en algunas regiones productoras; en California, Estados Unidos, se evaluó el uso del RGS por 30 años con excelentes resultados (Ayars *et al.*, 2015). Sin embargo, no ha alcanzado crecimiento significativo en superficie e impacto esperado a nivel mundial, principalmente por efectos indeseables ocasionados por diversos factores, entre otros, por la presencia y daño de roedores. Al respecto, los topos dañan las mangueras de polietileno, ocasionan fugas y el sistema queda inoperante, por lo que es necesario dar mantenimiento constante para la operación del riego (Payero *et al.*, 2005). En algunos casos, principalmente en zonas con alta presencia de roedores, los agricultores inevitablemente terminan por abandonar los sistemas presurizados y deciden continuar con sus sistemas de riego tradicional.

#### 2.5 La higuera *Ficus carica* L.

La higuera (*Ficus carica* L.) es un árbol de porte bajo, con altura de 3.0 a 10.0 m (Fig. 2); pertenece a la familia de las Moráceas y al género *Ficus*, a dicho género pertenecen más de 600 especies, la mayor parte son plantas ornamentales y algunas son especies frutícolas de climas tropicales. Solo una menor proporción de especies del género *Ficus* producen frutos comestibles (Lavín y Matsuya, 2004).



**Figura 2. Planta de higuera en su primer año de producción.**

Desde sus primeros registros históricos, la higuera ha sido apreciada por el hombre por ser una excelente fuente de alimento y también por sus propiedades medicinales (Barolo *et al.*, 2014). Evidencias arqueobotánicas encontradas en el Valle inferior del río Jordán indican que habitantes de dicha zona aprovechaban higos partenocárpicos plantados de manera intencional que datan desde hace 11,200 a 11,400 años, mil años antes de la domesticación de cereales (Kislev *et al.*, 2006). En el pasado, en los tiempos de Plinio, los romanos la consideraban un árbol sagrado. Mientras se encontraba sentado en la sombra de una higuera,

Siddhartha Gautama (Buda), concibió los principios que lo llevaron a fundar la religión que hoy se conoce como Budismo. La higuera ha sido una planta muy apreciada en el pasado, importante en nuestro presente y prometedora para la economía agrícola del futuro (Gallego *et al.*, 1996).

### 2.5.1 Clasificación de las higueras.

Las higueras se pueden clasificar en relación a su floración y producción, ya que es una especie ginodioica, donde existen plantas con flores masculinas, femeninas, hermafroditas y variedades partenocárpicas ampliamente cultivadas (Kislev *et al.*, 2006).

#### 2.5.1.1 Higueras tipo Esmirna

Producen una sola cosecha al año y es necesario que sean polinizadas por el polen de otra planta “cabrahigo” (Suleman *et al.*, 2014).

#### 2.5.1.2 Cabrahigos

También se conocen como higueras silvestres, dichos árboles solo producen flores masculinas que tienen la función de polinizar a las higueras tipo Esmirna y San Pedro, función que se cumple con la colaboración de una pequeña avispa (*Blastophaga psenes*), la cual es un himenóptero apócrito de la familia Agaonidae. (Caliskana *et al.*, 2017; Suleman *et al.*, 2014).

#### 2.5.1.3 Higueras comunes

Son las higueras autofértiles y partenocárpicas y se trata del tipo de higuera más cultivada a nivel mundial; las higueras comunes se dividen en dos grupos, las que producen una y dos cosechas al año (uníferas o bíferas) (Pereira *et al.*, 2017).



#### 2.5.1.4 Higueras Bíferas

Son higueras con dos tipos de de siconos, brevas en junio e higos después de julio; también se les denomina higueras brevales o de dos cosechas y son las más apreciadas por los agricultores a nivel mundial. Las brevas alcanzan mejores precios por su aspecto, tamaño y fecha de maduración; las brevas son higos que no alcanzaron a desarrollarse en el otoño, pasan el invierno en latencia e inician su desarrollo en la primavera del siguiente año. De manera empírica, se dice que las brevas se producen en madera del año anterior. Los higos se desarrollan y alcanzan su madurez en madera que brota en la temporada de producción, iniciando en primavera y madurando antes de la llegada del invierno (Khadivi *et al.*, 2018)

#### 2.5.1.5 Higueras Uníferas

Tipo de higueras que solo producen una cosecha al año, brevas o higos, antes de los primeros fríos otoñales. (Essid *et al.*, 2017).

#### 2.5.1.6 Tipo San Pedro

Son higueras que producen una cosecha de brevas con aporte del polen de cabrahigo y apoyo del insecto blastophaga, proceso conocido como 'caprificación', en este caso, la segunda cosecha de higos no requiere caprificación (Pereira *et al.*, 2017).

### 2.5.2 Variedades

Existen alrededor de 700 variedades de higuera que se cultivan a nivel mundial (Gallego *et al.*, 1996; Villalobos *et al.*, 2014). En BCS, solo se cultivan a nivel comercial dos variedades, Black Mission y White Kadota; en la presente investigación se estudia únicamente a la variedad White Kadota por su importancia en la región y por el potencial productivo de la variedad.

La higuera es un cultivo rustico y puede producir frutos de calidad comercial con aguas de baja calidad, donde otros frutales no producen de manera satisfactoria (Melgarejo, 2000), siendo superada únicamente por la palma datilera. Otra ventaja importante de la higuera es la rapidez con la que alcanza producción importante (dos a tres años), al compararla con otros frutales de zonas desérticas, como el olivo, que alcanza la etapa productiva al cuarto o quinto año (Bernardi *et al.*, 2018) y la palma datilera del quinto al sexto año de establecida (Salomón *et al.*, 2017).

### 2.5.3 Importancia del cultivo.

A nivel mundial, la superficie cultivada de higuera supera las 314,000 ha, con producción estimada de 1,158,513 toneladas durante el 2014, la superficie cultivada a nivel mundial alcanzó su máximo histórico en el año 2006 con 460,900 ha y más de 1,200,000 toneladas. En la zona mediterránea se localizan los principales países productores de higo; en primer lugar Turquía, con un volumen de producción de 300,282 toneladas en el año 2014 y en segundo lugar Egipto con 176,105 toneladas; el tercer, cuarto y quinto lugar lo tienen Argelia, Marruecos e Irán (FAOSTAT, 2018). La producción en la zona mediterránea ha mostrado amplias oscilaciones, debido a los diferentes esquemas de cultivo, ya que la mayor superficie se cultiva en condiciones de temporal y en condiciones climáticas adversas, incluyendo heladas, sequias y altas temperaturas (López *et al.*, 2011).

En México, la superficie cosechada de higuera para el año 2016 fue de 1,339.80 ha y la producción total fue de 7,088.68 toneladas; el valor de la cosecha de higo en 2016 fue 65.79 millones de pesos (SIAP, SAGARPA, 2016).

En relación a la superficie establecida por estados en México, en el 2016 el estado con mayor superficie fue Morelos, en segundo lugar BCS, seguido por Puebla y Veracruz. En relación a la superficie con nuevas plantaciones por estados en México, el que ocupa el primer lugar para el 2016 fue el estado de

Morelos, seguido de Baja California Sur y Puebla, con 793.0 ha, 278.0 ha y 128.0 ha, respectivamente.

En Baja California Sur, la producción total en el 2016 fue 468 t, con valor de cosecha de 10.70 millones de pesos (23,000 pesos mex por tonelada) (SIAP, SAGARPA, 2016). Los ingresos por venta de higo deshidratado representan un recurso importante para los agricultores del Valle de Vizcaíno en BCS.

#### 2.5.4 Morfología

La higuera es un árbol que en ocasiones supera los 10 m de altura, lo que ocurre cuando se encuentra en las mejores condiciones de cultivo; en condiciones desfavorables adopta una forma de arbusto bajo. Es frecuente encontrar higueras con esta forma cuando son azotadas por vientos fuertes o por la brisa marina, lo cual no permite un desarrollo normal del cultivo. Sin embargo, en condiciones favorables la forma de su copa es globosa siendo más ancha que alta dando la forma típica de la higuera (Khadivi *et al.*, 2018; Melgarejo, 2000)

##### 2.5.4.1 Sistema radicular

La higuera posee un robusto sistema radicular, característica que le permite explorar un volumen importante de suelo, lo que le permite soportar periodos prolongados de sequía, situación a la que se enfrenta en diversas zonas a nivel mundial. Por su robusto y eficiente sistema radicular, la higuera puede subsistir en suelos calcáreos pobres y pedregosos (Di Vaio *et al.*, 2013; Khadivi *et al.*, 2018).

Las raíces de la higuera por lo general solo se encuentran cerca de la superficie (20 a 40 cm de profundidad) y la distancia horizontal cubre alrededor de 15 m; solo en suelos permeables algunas raíces pueden profundizar hasta 6 m (Morton, 1987). El sistema radicular es fasciculado, con raíces robustas, abultadas y extensas (Flores, 1990).

#### 2.5.4.2 Sistema aéreo, tronco y ramas

El tronco de la higuera es corto, debido a su tendencia a formarse como arbusto rastrero; en ocasiones nacen brotes en la parte de inserción del tallo con las raíces, a estos delgados tallos se les conoce como 'varas chuponas' o 'chupones', las cuales inician delgadas y largas pero después ramifican y forman varios tallos juntos. Es aconsejable eliminar los chupones cuando la higuera se encuentra en reposo, lo que favorece el desarrollo del árbol. El tallo y ramas tienen madera poco densa y frágil, aunque al mismo tiempo resulta elástica (Di Vaio *et al.*, 2013; Flores, 1990).

#### 2.5.4.3 Yemas

La higuera es una planta que tiene yemas axilares y terminales. La yema es vegetativa terminal (Fig. 3) y las axilares (Fig. 4) son yemas compuestas; donde se encuentra una yema de flor y dos yemas vegetativas, una de las vegetativas da origen a una hoja que después de caer deja una cicatriz, como se aprecia en la (Fig. 4) La otra yema vegetativa dará origen a un nuevo brote (una rama nueva provista de yemas vegetativas y de flor), por el contrario la yema de flor formará una inflorescencia o sicono, conocido comúnmente como higo (Essid *et al.*, 2017).



**Figura 3.** Yema terminal de higuera.



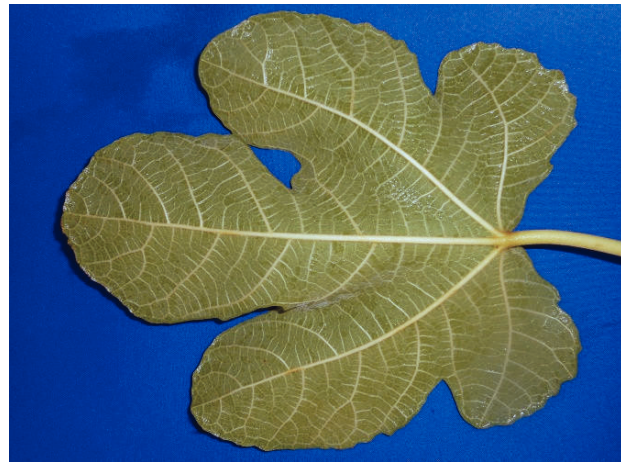
**Figura 4.** Yema axilar de higuera.

#### 2.5.4.4 Hojas

La higuera tiene hojas grandes, de 10.0 a 20.0 cm, palmeadas, alternas y se insertan en un peciolo largo de 3.0 a 5.0 cm, el cual tiene un grosor de 4.0 a 8.0 mm. Cada hoja tiene de 3.0 a 5.0 lóbulos. Por lo general están divididas y acorazonadas en la base y tienen nervaduras palmeadas y bien marcadas. Son hojas ásperas con vellosidades fuertes y rígidas, en el haz y en el envés (Figs. 5 y 6). Su color es verde brillante en el haz y menos intenso en el envés (Mamoucha *et al.*, 2016).



**Figura 5.** Hoja de higuera mostrando el haz.



**Figura 6.** Hoja de higuera mostrando el envés.

#### 2.5.4.5 Flores

La higuera posee flores muy pequeñas en comparación con las de otros frutales (diámetro < 1.0 mm). De hecho, los primeros autores que escribieron sobre la higuera se confundieron al afirmar que la higuera no florecía y que solo daba frutos. Dicha confusión se generó porque la higuera no produce flores expuestas, en virtud de que sus flores se encuentran encerradas en una estructura carnosa que recibe por nombre sicono (higo). Las flores son diminutas y no se aprecian a simple vista.

Las flores se encuentran dentro de un sicono que las engloba y encierra, el cual tiene solo una salida llamada ostiolo. Las flores masculinas se aprecian únicamente cuando el sicono alcanza la madurez, ya que se abren las brácteas del ostiolo y es posible visualizarlas. Sin embargo, las flores femeninas ubicadas más adentro del sicono, no es posible verlas a simple vista, por lo que es necesario abrir el sicono (Essid *et al.*, 2017).

La flor femenina cuenta con 5 pétalos y únicamente un carpelo, tienen el estilo largo y un estigma bifido. La flor masculina cuenta con tres sépalos y tres estambres (Khadivi *et al.*, 2018).

#### 2.5.4.6 Frutos

Los verdaderos frutos de la higuera se llaman aquenios, los cuales son duros y pequeños ( $\pm 1.0$  mm); el fruto se encuentra dentro del receptáculo carnoso llamado sicono (Fig. 7). Es muy común que se considere al higo como el fruto de la higuera, pero en realidad el higo es un falso fruto que agrupa en su interior las flores, de 200 a 300 en cada sicono y posteriormente a los verdaderos frutos. Por tal razón, el receptáculo carnoso al que comúnmente se le llama higo (Tabla I), es en realidad una infrutescencia. Los aquenios al ser tan duros, son difíciles de destruir y no se alteran al pasar por el sistema digestivo. Dicha característica favorece la distribución de la especie con ayuda de las aves, cuando los frutos no son partenocárpicos. El higo o sicono es blando, jugoso, dulce, gelatinoso y muy atractivo para aves y muchos animales (Boudchicha *et al.*, 2018).



**Figura 7.** Siconos de diferentes tamaños de la variedad White Kadota.

**Tabla I.** Contenido nutricional de 100 g de pulpa comestible de sicono (Fuente: Morton, 1987).

<b>COMPUESTO</b>	<b>CANTIDAD</b>
Calorías	80.00
Agua	78.00 g
Carbohidratos	19.60 g
Grasas	0.40 g
Proteínas	1.40 g
Fibra	0.00 g
Cenizas	0.60 g
Potasio	268.00 mg
Calcio	34.00 mg
Fósforo	32.00 mg
Hierro	0.40 mg
Tiamina	0.01 mg
Riboflavina	0.05 mg
Niacina	0.70 mg
Ácido ascórbico	0.60 mg



### 2.5.5 Requerimientos climáticos de la higuera

La higuera se cultiva en el hemisferio norte y se desarrolla de manera satisfactoria entre los 34 y 40° de latitud N “climas templados cálidos”, aunque también es posible que se adapte y produzca fuera de estas zonas óptimas. Las plantaciones establecidas en una latitud superior a los 45°, pueden resistir sus condiciones climáticas, sin embargo, los frutos no alcanzan una plena maduración. Por el contrario, si se establece en zonas con latitud menor a 25°, el exceso de calor puede impedir la sucesión normal de las distintas fases vegetativas. El clima óptimo para la higuera es aquel que presenta inviernos benignos con veranos calurosos y sin lluvias. Se adapta adecuadamente a climas mediterráneos de tipo “templado-cálido seco”. Lluvias frecuentes y humedad alta perjudican la calidad de la cosecha (Flores, 1990; Podgornik *et al.*, 2010).

### 2.5.6 Umbrales térmicos para la higuera

La muerte del árbol se produce con heladas de -12.2° C, en tanto que la caída o pérdida de frutos se produce con heladas de -6° a -7° C.

Temperaturas de 37.7 °C o superiores aunadas o en combinación con ausencia de riego y vientos cálidos provocan la caída de frutos, toda vez que se produce una falsa madurez (Boudchicha *et al.*, 2018; Flores, 1990).

### 2.5.7 Suelo óptimo para el cultivo de higuera

El cultivo de la higuera puede prosperar en suelos áridos pedregosos y poco profundos. Sin embargo, prefiere suelos ricos, profundos y bien drenados, de manera similar a la mayoría de los cultivos. Si se espera cosechar siconos de calidad, la higuera requiere suelos ricos en calcio, con buen drenaje y con pH entre 8.0 y 8.5. En suelos con las características mencionadas, se obtienen excelentes cosechas para higo deshidratado (Khadivi *et al.*, 2018; Melgarejo, 2000). La higuera puede crecer de manera óptima en suelos arenosos, siempre

que no exista presencia de nematodos, ya que dichos microorganismos pueden hacer improductivos los agroecosistemas de higueras (Lavín y Matsuya, 2004).

### 2.5.8 Necesidades de nutrientes de la higuera

La higuera es menos demandante en nutrientes que otros cultivos, sin embargo, en suelos pobres en materia orgánica y carentes de nutrientes es estrictamente necesario aplicar fertilizantes, si se desea obtener una buena cosecha. La cantidad de nutrientes que se tienen que aportar depende de diversos factores, incluyendo el tamaño de los árboles, la densidad de plantación y el vigor de los árboles. Asimismo, debe considerarse la calidad del agua y del suelo; las recomendaciones emanadas de investigaciones son una buena referencia que debe ajustarse en cada caso particular con la observación y experiencia propia del productor. La recomendación de Melgarejo (2000) para el cultivo intensivo de higuera se muestra en la tabla II.

**Tabla II.** Fertilización para el cultivo intensivo de higuera, los valores se expresan en Unidades por hectárea.

<b>Periodo/Nutriente</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
Enero – Marzo	50	100	75		
Abril – Junio	10	50	75	30	15
Julio - Septiembre	50	50	50	10	
Total por año	110	200	200	40	15

Irget *et al.*, (2008), realizaron un experimento en Turquía, el cual consistió en seis tratamientos de fertilización; el objetivo fue incrementar el rendimiento y calidad del higo deshidratado. Encontraron que el mejor tratamiento fue con 430.0 g de N, 200.0 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 430.0 g de K<sub>2</sub>O y 280.0 g de Ca por árbol. Dicho programa de fertilización mostró reducción significativa de daños por quemaduras de sol y grietas en el fruto.

### 2.5.9 Establecimiento de plantación

El diseño de la huerta de higuera es un aspecto de suma importancia, ya que influye en los costos de operación y rentabilidad del proyecto. Hay cambios importantes al comparar las primeras plantaciones de temporal o secano, con las plantaciones actuales donde se aplican tecnologías riego y fertilización, entre otras estrategias, incrementar el rendimiento; las principales diferencias radican en el marco de plantación y en el tamaño de los árboles. Los marcos tradicionales de plantación de 10.0 m x 10.0 m y hasta 15.0 m x 15.0 m utilizados en temporal o secano pasaron en la actualidad a marcos de 8.0 m x 8.0 m y hasta 5.5 m x 5.5 m en cultivos intensivos, lo cual depende de la variedad. Dichos marcos plantación reducidos tienen como consecuencia que el árbol se puede a menor porte facilitando la cosecha y que se obtenga menos  $\text{kg planta}^{-1}$ , pero más  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (Melgarejo, 2000).

### 2.5.10 Poda de la higuera

#### 2.5.10.1 Poda de formación

Con la aplicación de esta práctica se obtiene la estructura adecuada del árbol para que soporte todo el follaje y la producción. Una forma de iniciar esta poda es despuntar el tallo principal a una altura que oscila entre 0.9 a 1.2 m y sobre el mismo dejar tres ramas principales; también se puede establecer el tallo a una altura de 40.0 a 60.0 cm. Con esta técnica se obtienen árboles más pequeños, lo que facilita la recolección de la cosecha. En este caso también se dejan tres ramas principales con inclinación ligeramente ascendente y longitud de 1.0 a 1.5 m. El objetivo final de la poda es dar forma a un árbol balanceado con capacidad de carga, con una altura máxima de 3.0 m. Lo anterior se logra con despuntes ligeros a tiempo, sin llegar a podas severas (Flores, 1990).

#### 2.5.10.2 Poda de producción.

La poda de producción está determinada por la variedad, en el caso de las higueras White Kadota, la poda es necesaria para estimular el crecimiento de madera nueva que es donde se produce la cosecha. Asimismo, si el marco de plantación es reducido, la poda es una estrategia para mantener el árbol a un tamaño reducido y manejable. En higueras negras 'Black Mission', con una baja densidad de población se requieren únicamente podas ligeras; dicha actividad se realiza quitando ramas secas y "chupones", realizando además una poda general a base de despuntes con cortes limpios, utilizando tijeras y pasta cicatrizante. También se realizan aclareos discretos, procurando que en el interior de la copa no haya rose entre ramas. Cabe mencionar que la poda severa en variedades de higos negros induciría una cosecha tardía (Melgarejo, 2000).

#### 2.5.11 Requerimiento de agua del cultivo de higuera.

Cuando el cultivo de higuera se considera como un frutal de temporal o de secano, se tiene la idea que consume cantidades mínimas de agua, sin embargo, si se espera un rendimiento elevado, es necesario aplicar cantidades considerables de agua. En la etapa en que el cultivo se encuentra en plena producción, tiene un requerimiento anual de  $7,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ; al compararlo con otros frutales, por ejemplo los cítricos (naranja) tiene cierta ventaja, ya que el requerimiento de agua anual del cultivo de cítricos en producción plena oscila de  $10,000$  a  $12,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . (Melgarejo 2000; Nagaraju y Sreenivas 2003).

### 2.6 Efectos del déficit hídrico en frutales

Una forma de explicar el control y flujo de agua en la planta es por medio del modelo del continuo suelo-planta-atmosfera, en el cual la conductancia estomática es una respuesta que indica el grado de déficit hídrico al que está sometida una planta. Cuando la demanda evapotariva es superior al suministro hídrico que abastece la planta, enfrenta una condición que se conoce como déficit hídrico

(Del'Amico *et al.*, 2012). Si la planta es sometida a dicha condición, ocurre un incremento en el contenido de ácido abscísico (ABA), seguido de cierre paulatino de estomas, por lo que se le atribuye a dicho fitorregulador una función importante en la conductancia estomática. Al desencadenarse este proceso, también se reduce la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y por ende la reducción del proceso de fotosíntesis (Wang *et al.*, 2014). Toda la serie de respuestas de la planta tiene relación directa con la disminución del flujo de agua a través de los estomas. Si las condiciones de estrés hídrico persisten, enfrentando un déficit hídrico moderado, se desencadena un proceso con una serie de respuestas que continúan, en primera instancia, con la reducción en el crecimiento del árbol (estancamiento), pero si el déficit persiste y no se consigue el equilibrio, ocurre la pérdida de hojas y frutos; después de un estrés hídrico agravado, algunos árboles entran en un proceso de latencia, en tanto que otros pueden llegar a morir si las condiciones no mejoran (Di Vaio *et al.*, 2013). En el contexto de los tratamientos por aplicar, se espera que el Riego Subterráneo mantenga, promueva o mejore la conductancia estomática y mitigue o evite el déficit hídrico, lo cual se verá reflejado positivamente en la tasa fotosintética.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

La agricultura consume en promedio el 70% del agua dulce disponible, por tal razón es de suma importancia desarrollar proyectos de investigación enfocados a incrementar el uso eficiente del agua. La presente investigación se enfoca a desarrollar tecnología que contribuye al uso eficiente del agua, con el desarrollo de un nuevo sistema de riego que proporciona el agua de manera subterránea en la zona más activa del sistema radicular, con la finalidad de disminuir las pérdidas por evaporación. Asimismo, se investiga la respuesta fisiológica de árboles de higuera, var. 'White Kadota', a este nuevo sistema de riego para evaluar la viabilidad de su aplicación y estimar la cantidad de agua que se puede ahorrar en el riego y de esta forma hace un uso más sustentable del agua en zonas áridas.

#### 4. HIPÓTESIS

La aplicación de agua para riego en higuera mediante difusores subterráneos con disposición horizontal, mantendrá el cultivo en balance hídrico óptimo, incrementará la productividad del agua y abatirá significativamente las pérdidas por evaporación, al compararlo con dos sistemas de riego por goteo superficial.

#### 5. OBJETIVOS

Evaluar un sistema de riego subterráneo con innovaciones en el método de difusión, su efecto en las relaciones hídricas suelo-planta-atmósfera y comparar la productividad del agua en el cultivo de higuera con riego subterráneo contra dos sistemas de riego por goteo superficial.

##### 5.1 Objetivos específicos

(a).- Evaluar las diferencias de evaporación del agua contenida en el suelo en tres sistemas de riego, dos sistemas superficiales y un sistema subterráneo.

(b).- Evaluar las relaciones hídricas del cultivo de higuera (*Ficus carica* L). irrigado con tres sistemas de riego, dos sistemas superficiales y un sistema subterráneo.

(c).- Comparar tres sistemas de riego, dos sistemas superficiales y un sistema subterráneo en relación a variables ecofisiológicas y productividad del agua (producción de siconos frescos por volumen de agua de riego utilizado).

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.1 Ubicación

Los experimentos se realizaron en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C (CIBNOR) en el Comitán, Baja California Sur, México, el cual se localiza 17 km al oeste de la Ciudad de La Paz, en las coordenadas 24° 8' 9.47" N y 110° 25' 41.35" O.

### 6.2 Clima

El clima predominante en el sitio de estudio tiene las características de zonas áridas; la clasificación climática según García (2004) es BW(h')w, el cual corresponde a un clima muy seco, cálido, con lluvias en verano. Las normales climatológicas indican una temperatura máxima mensual de 39.8°C en agosto, mínima de 11.2°C en enero y promedio anual de 23.7°C; la evaporación potencial máxima mensual es 248.3 mm en julio, mínima 96.0 en diciembre y acumulada anual 2084.5 mm. La precipitación total anual es 169.2 mm, con máximos 37.2 y 58.4 mm en agosto y septiembre, respectivamente (SMN, 2016).

### 6.3 Suelo

El suelo del área de estudio es de textura arenosa franca y franca arenosa, predominando la presencia de arena (62 a 84%) para una profundidad del perfil de suelo de 0 a 40 cm. Es un suelo pobre en materia orgánica y su contenido oscila de 0.4 a 0.9%. El pH del suelo es alcalino y oscila desde 8.4 hasta 9.6; la conductividad eléctrica (CE) del suelo fluctúa de 0.3 a 0.5 dS·m<sup>-1</sup>.

### 6.4 Agua

El agua utilizada para los experimentos proviene de un pozo salobre (CE = 6.02 dS·m<sup>-1</sup>), la cual es desalinizada utilizando un equipo de osmosis inversa, del que se obtiene agua cuya conductividad eléctrica es 1.20 dS·m<sup>-1</sup>, con pH = 7.70.

## 6.5 Experimentos

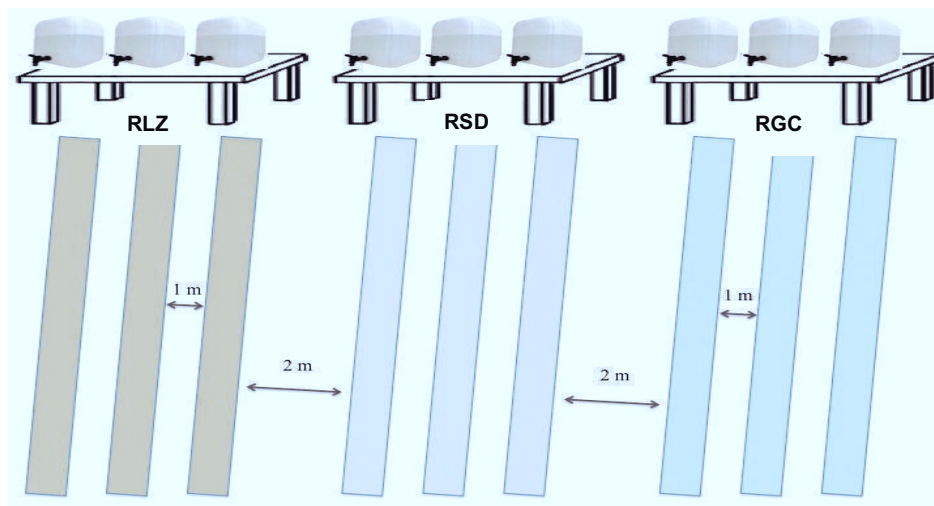
En el sitio de estudio se implementaron dos experimentos; el primer experimento se destinó a evaluar las diferencias de evaporación de agua directa del suelo con tres sistemas de riego, de los cuales dos fueron superficiales y un sistema subterráneo. El segundo experimento fue el establecimiento de un huerto de higuera protegido dentro de una estructura con malla anti granizo y con tres sistemas de riego diferentes, dos sistemas superficiales y un sistema de riego subterráneo. En este experimento se evaluaron las relaciones hídricas suelo-planta-atmosfera con cada sistema de riego y la eficiencia en el uso del agua de riego en relación a la producción de siconos frescos con los tres sistemas de riego.

## 6.6 Material y métodos.- Primer experimento

### **Evaluación del volumen de agua evaporada directamente del suelo desnudo con tres sistemas de riego.**

El experimento se realizó en el Campo Agrícola Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIBNOR) en el Comitán, Baja California Sur, México, localizado a 17 km al oeste de la Ciudad de La Paz, en las coordenadas 24° 8' 9.47" N y 110° 25' 41.35" O. El experimento se realizó en dos períodos en el mismo sitio; el primero fue del 24 al 29 de septiembre de 2015 y el segundo del 18 al 23 de enero de 2016. Tres sistemas de riego en campo abierto se usaron para evaluar la evaporación directa de suelo desnudo con dos sistemas superficiales y uno subterráneo. El diseño experimental fue completo al azar con arreglo en franjas, con tres tratamientos y tres repeticiones, donde cada repetición corresponde a 1 m de longitud (Box *et al.*, 1978). La separación entre sistemas de riego fue 2 m y entre repeticiones 1 m (Fig. 8).





**Figura 8.** Croquis de instalación espacial de tres sistemas de riego en el Campo Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C. S., México.

#### 6.6.1 Clima de la zona de estudio

Las normales climatológicas indican una temperatura máxima mensual de 39.8°C en agosto, mínima de 11.2°C en enero y promedio anual de 23.7°C; la evaporación potencial máxima mensual es 248.3 mm en julio, mínima 96.0 en diciembre y acumulada anual 2084.5 mm. La precipitación total anual es 169.2 mm, con máximas de 37.2 y 58.4 mm en agosto y septiembre (SMN, 2016).

#### 6.6.2 Instalación de sistemas de riego

La separación entre líneas regantes o emisores fue 1 m y la separación entre sistemas de riego fue de 2 m. El riego se proporcionó añadiendo agua a un depósito instalado sobre una plataforma colocada a 1 m de altura, de donde se distribuyó a través de una manguera conectada a cada emisor. En la figura 9 se muestran los tres sistemas después del primer riego.

### 6.6.3 Tratamiento 1. Riego localizado en zanjas RLZ

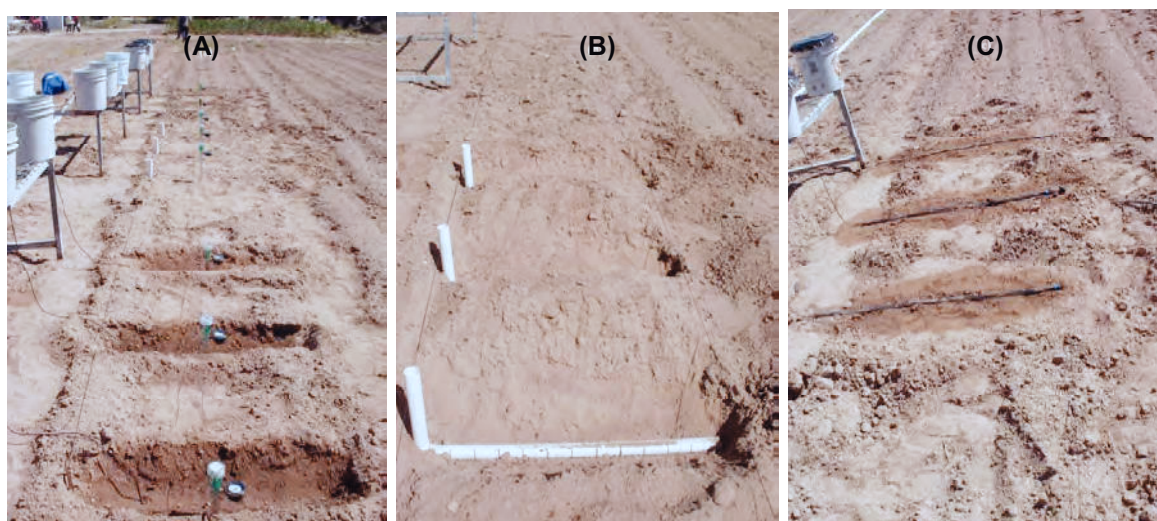
El primer sistema de riego fue 1 m de zanja o surco con pendiente de 0.5 %; el interior de la zanja se trazó en forma de triángulo con taludes de 19.6 cm, tirante de 5.0 cm y 38 cm en la parte superior, que es la base del triángulo. El agua se aplicó en la parte más alta de la zanja mediante un micro tubo de PVC negro de 3 mm de diámetro interior y 5 mm de diámetro exterior, el cual aportó un caudal de  $12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ . El sistema RLZ simula el riego por goteo convencional realizado con goteros tipo botón (goteros independientes), en el cual los agricultores usan manguera lisa de 16 a 20 mm de diámetro interior donde colocan goteros con separaciones que ellos deciden, por lo común con 3 a 4 emisores por árbol (Fig. 9A).

### 6.6.4 Tratamiento 2. Riego subterráneo por difusores RSD

Para el sistema de riego RSD se instaló un tubo de PVC sanitario de 5.08 cm de diámetro interior y 1 m de longitud, colocado de manera horizontal a 20 cm de profundidad. En uno de los extremos del tubo se coloca un tapón con una ranura vertical de 4 cm y en el otro extremo se acopla un codo sanitario de  $90^\circ$  del mismo diámetro para conectar la sección subterránea del difusor horizontal con la superficie del suelo y la atmósfera mediante un segmento de tubo de 30 cm de longitud del mismo tipo y diámetro. A través del segmento del difusor expuesto se aporta agua mediante un micro tubo de 3 mm de diámetro interior (Fig. 9B). El segmento horizontal del difusor mide 1 m de longitud y tiene ranuras de 4 cm cada 8.2 cm en ambos lados, de manera que al ser colocado en el suelo las ranuras se exponen de forma vertical; desde el punto de vista hidráulico, la parte inferior del tubo funciona en forma de canal. Para su operación, el interior del tubo se llena con gravilla de 3 a 7 mm de diámetro para favorecer el flujo de agua e impedir el ingreso de partículas de suelo finas al difusor. El sistema RSD se compara con sistemas de riego convencionales para demostrar sus ventajas al minimizar la evaporación directa del suelo.

### 6.6.5 Tratamiento 3. Riego por goteo con cinta RGC

El tercer sistema de riego consistió en un segmento de un metro de cinta de riego marca Netafim® modelo Streamline 16060 con goteros cada 20 cm fabricados para un flujo máximo de  $1.1 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ . El caudal por gotero se calibró en  $0.40 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , menor al caudal nominal debido a que la presión proporcionada a la cinta de riego fue de 1 m de columna de agua (MCA) equivalente a  $0.1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (1.42 PSI), la cual es menor a la presión nominal, indicada en 10 MCA. Este método simula el sistema de riego por goteo con cinta, que es el sistema más usado por los agricultores que cuentan con riego presurizado, quienes utilizan cintas o manguera con goteros instalados de manera equidistante (Fig. 9C).



**Figura 9.** Sistemas de riego. (A) localizado en zanjas RLZ; (B) subterráneo por difusores RSD, (C) por goteo con cinta RGC.

Para relacionar la evaporación de agua directa del suelo con los elementos del clima, en ambos períodos del experimento se tomaron datos de temperatura ambiental, del suelo y la evaporación potencial ( $E_o$ ) con evaporímetro tipo “A”. Los datos climáticos se obtuvieron de una estación meteorológica automática marca Davis® modelo Vantage Pro2 (USA), instalada en el Campo Agrícola Experimental del CIBNOR.

Después de instalar los sistemas de riego se proporcionó un riego de  $10 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}$  para humedecer el suelo a capacidad de campo (CC); al considerar una distancia de un metro entre surcos, dicho volumen unitario corresponde a una lámina de riego de 10 mm (equivalente a  $100 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ ). La primera muestra de suelo se tomó 15 min después del riego y la segunda se tomó 24 h después. Al terminar el segundo muestreo se realizaron dos tomas de muestra adicionales cada dos días, para un total de cuatro muestreos. Dicho proceso fue similar en ambas fechas, septiembre de 2015 y enero de 2016.

#### 6.6.6 Muestreo de suelo

Para la toma de muestras de suelo se utilizó una barrena de media caña (Fig. 10), mediante la cual se extrae un núcleo de suelo de 2.5 cm de diámetro, lo que permite separar la muestra en fracciones de 5 cm; cada sección de la muestra se colocó en un frasco de vidrio previamente pesado y etiquetado. Los muestreos se realizaron a profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm para determinar el contenido de humedad, de tal forma que se obtuvieron 4 muestras por repetición y 12 por tratamiento, para un total de 36 muestras por fecha de muestreo. Después de cada muestreo se obtuvo el porcentaje de humedad de cada muestra por medio del método gravimétrico, el cual consiste en pesar la muestra húmeda, secarla en estufa durante 24 h a  $105^\circ\text{C}$ , pesar la muestra seca y obtener el porcentaje de humedad tomando como referencia el peso del suelo seco. Mediante este proceso se determinó el porcentaje de humedad de cada sistema de riego y repetición.



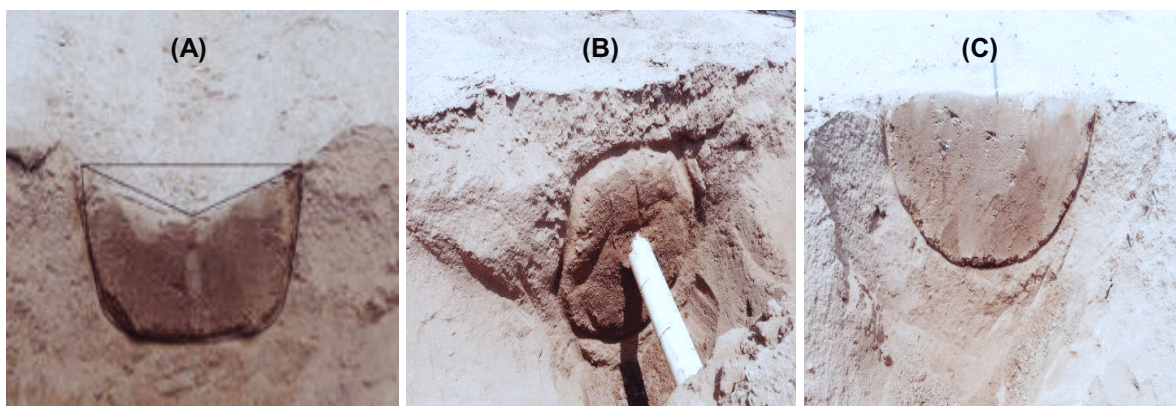
**Figura 10.** Barrena de media caña.

#### 6.6.7 Caracterización del suelo

La textura del suelo se determinó con analizador laser marca Horiba (Japón), según el método de granulometría descrito por Lewis (1984); la materia orgánica se cuantificó a través del método AS-07 de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), según Walkley y Black (1934), el pH se determinó mediante el método AS-02 y la conductividad eléctrica (CE) por el método AS-18 de la citada NOM. La capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente ( $D_a$ ) se determinaron según los métodos sugeridos por Ortiz-Villanueva y Ortiz-Solorio (1990).

#### 6.6.8 Determinación de la humedad en el suelo

El contenido de agua expresado en L por profundidad para cada sistema de riego fue calculado a partir de los datos de porcentaje de humedad y densidad aparente del suelo; para ello se tomó en cuenta la forma del bulbo húmedo (Fig. 11). Las imágenes se digitalizaron con las mediciones realizadas en campo, para lo cual se utilizó el programa Autocad 2005; a partir de dichas imágenes se obtuvo un gráfico de contorno del bulbo húmedo fraccionado por aéreas de igual porcentaje de humedad.



**Figura 11.** Bulbo húmedo de cada uno de los sistemas de riego del experimento. (A) RLZ, (B) RSD y (C) RGC.

#### 6.6.9 Análisis estadísticos

Los datos de pérdida de humedad se analizaron estadísticamente con el programa Excel 2007 y se aplicó análisis de varianza de una vía (ANDEVA) mediante el programa PAST (Hammer, 2001). Las diferencias entre medias de tratamientos fueron determinadas mediante la diferencia mínima significativa (DMS) con  $p \leq 0.01$  y  $p \leq 0.05$ .

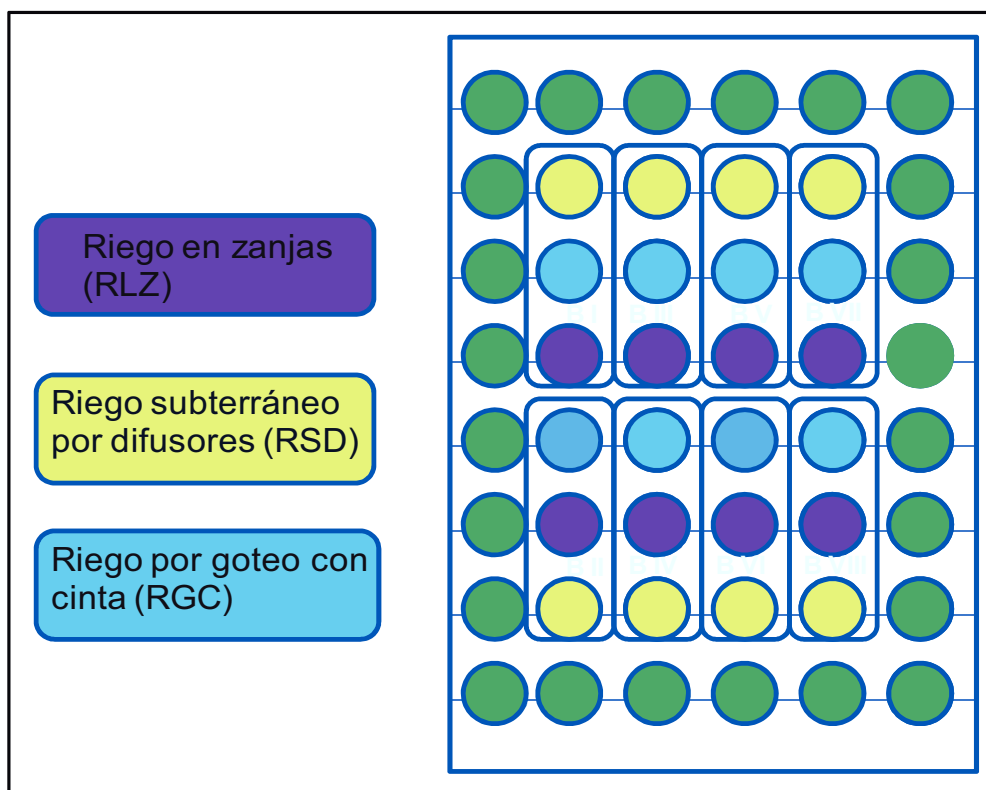
#### 6.6.10 Medición de la temperatura de suelo

Durante el experimento se midió la temperatura del suelo en los sistemas de riego a tres profundidades (5, 10 y 15 cm), también las temperaturas ambiente (máxima y mínima) para cada día a las 8:30 AM y 2:00 PM. Para medir la temperatura de suelo se usó un termómetro digital portátil marca Yokogawa® modelo 2455 (Japón); dicho instrumento consiste en un dispositivo electrónico que interpreta la señal que emite un sensor tipo termopar soportado por una varilla de acero inoxidable de 4.8 mm de diámetro.

## 6.7 Material y métodos.- Segundo experimento

### **Evaluación de un sistema de riego mediante difusores subterráneos y su efecto en la ecofisiología y productividad del agua en higuera.**

Se estableció un huerto de higueras variedad White Kadota, protegido dentro de una estructura con malla antigranizo, en el Campo Agrícola Experimental del CIBNOR; en dicho experimento se evaluó un nuevo sistema de riego (riego subterráneo por difusores RSD) y se realizaron comparaciones con los sistemas de riego convencionales. Las comparaciones se relacionan con la respuesta fisiológica de la planta a cada uno de los sistemas de riego y también se evaluó la eficiencia del uso del agua en cada uno de los sistemas de riego (tratamientos). Se ensayaron tres tratamientos, cada uno de ellos con 8 unidades experimentales (UE), para un total de 24 UE (Fig. 12). Cuando se evaluaron los tres sistemas de riego en el cultivo, la plantación de higuera ya tenía un año de establecida. El diseño experimental aplicado fue en bloques al azar con arreglo en franjas (Box *et al.*, 1978). La distancia entre surcos fue de 3.5 m y 2 m entre plantas. Mediante cada tratamiento se proporcionó agua de riego a 2 franjas de árboles. No se consideraron como unidades experimentales los árboles ubicados en el perímetro para evitar el efecto de orilla.



**Figura 12.** Diseño de bloques al azar con arreglo en franjas.

### Descripción de tratamientos segundo experimento.

#### 6.7.1 Tratamiento 1. Riego localizado en zanjas RLZ

Para este tratamiento se realizaron en el suelo dos zanjas de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de profundidad, ubicadas una a cada lado de la planta a 80 cm del tallo principal (Fig. 13). Para proporcionar agua a cada zanja, se instaló un sistema de riego con goteros individuales, autocompensados y antidrenantes; se colocó un gotero de  $12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  por cada zanja. Los goteros proporcionaron agua por medio de un microtubo de PVC flexible de 3x5 mm y estaca conductora de gota; cada tratamiento contó con tres tensiómetros de la marca Irrrometer (instalados a 15, 25 y 40 cm de profundidad) para monitorear la humedad del suelo. Este tratamiento simula al sistema de riego para árboles frutales que cuenta con goteros individuales para cada árbol.





**Figura 13.** Sistema RLZ después de un riego.

#### 6.7.2 Tratamiento 2. Riego subterráneo por difusores RSD

Para este tratamiento se instalaron dos difusores subterráneos, de 1 m de longitud por cada planta; el difusor fue instalado a 20 cm de profundidad y a 80 cm del tallo principal, los difusores fueron construidos con tubo de PVC sanitario de 2". En la sección horizontal del mismo cuentan con ranuras de 4 cm cada 8.2 cm en ambos lados; al colocar el tubo en el suelo las ranuras quedan de forma vertical, por lo que la parte inferior del tubo adquiere forma de canal, quedando en la misma forma en la parte superior, pero de forma invertida. La parte final del tubo se cierra con un tapón de mismo diámetro, en tanto que en el otro extremo se ensambla un codo de 90° y una fracción de tubo de 30 cm que conecta al difusor subterráneo (Fig. 14) con la superficie. El difusor se llena con gravilla de 0.5 a 1 cm de diámetro, la cual permite el flujo de agua e impide el ingreso de lodo al difusor evitando así el taponamiento. Para proporcionar agua a cada difusor, se

instaló un sistema de riego con goteros individuales, autocompensados y antidrenantes; para este efecto se colocó 1 gotero de  $12 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  por cada difusor (Fig. 15); los goteros se conectaron al difusor por medio de un microtubo de PVC flexible de 5 mm (Fig. 16). En este sistema, el caudal lo controla un gotero instalado en una manguera ciega de 16 mm, el agua es depositada en el subsuelo por el difusor y distribuida a lo largo de un metro. De este modo, el agua fluye en el interior del tubo a través de la gravilla, medio que sirve para distribuir el agua y evita el ingreso de tierra que podría obstruir el flujo dentro del difusor.



**Figura 14.** Difusor subterráneo.



**Figura 15.** Sistema RSD en operación, donde se aprecia la superficie seca.



**Figura 16.** Receptor de sistema RSD que conecta con difusor subterráneo, recibiendo agua.

### 6.7.3 Tratamiento 3. Riego por goteo con cinta RGC

En este tratamiento se instalaron dos cintas de riego por goteo, las cuales se colocaron de manera superficial y paralelas a las líneas de árboles, ubicadas a 80 cm del tallo principal (Fig. 17); en este tratamiento la cinta de riego tiene goteros cada 20 cm y el caudal de cada gotero fue de  $1 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ .



**Figura 17.** Cinta de riego por goteo RGC en operación.

#### 6.7.4 Control de la humedad en el suelo

Para tener un control preciso del contenido de humedad en el suelo se realizó el siguiente proceso:

- 1.- Se determinó el volumen de suelo humedecido por planta para cada uno de los sistemas de riego.
- 2.- Se encontró el pulso de riego (volumen de agua por riego) compatible con cada uno de los sistemas de riego.
- 3.- El control de la humedad en el suelo se consiguió con la instalación y monitoreo de tensiómetros, a una densidad de tres tensiómetros por tratamiento. Los tensiómetros indicaron el intervalo de humedad del suelo y el punto en el cuál era necesario proporcionar el riego, siempre la misma cantidad de agua para cada evento, de esta forma se mantuvo al suelo de los tres tratamientos con un nivel de humedad dentro del intervalo de humedad fácilmente aprovechable (HFA).

#### 6.7.5 Determinación del volumen del suelo humedecido (volumen del bulbo) para cada sistema de riego.

Se proporcionó un riego de dos horas a cada uno de los sistemas para apreciar su bulbo de humedad; después de lo cual se determinó por medio de muestreo con barrena de media caña la influencia de cada uno de los sistemas de riego para obtener el volumen del bulbo; las dimensiones se aprecian en la tabla III.

**Tabla III.** Dimensiones del bulbo húmedo por planta, para cada sistema de riego.

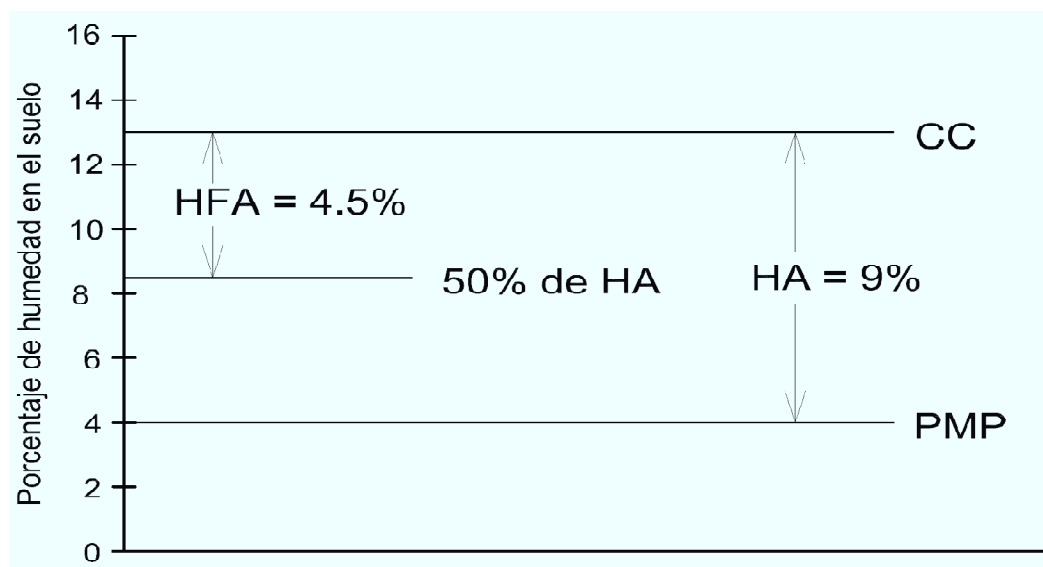
Longitud, m	Ancho, m	Profundidad, m	Vol. del bulbo, m <sup>3</sup>		Sistema
1.3	0.5	0.3	0.39	*	RSD
1.3	0.5	0.3	0.39	*	RLZ
2.0	0.4	0.3	0.48	*	RGC

\* El resultado se multiplicó por dos, ya que cada planta cuenta con dos emisores, uno a cada lado.

### 6.7.6 Determinación del pulso de riego para cada sistema de riego.

Para determinar el pulso de riego fue necesario considerar el volumen del bulbo humedecido por cada uno de los sistemas tabla III, también se tomaron en cuenta las características físicas del suelo (Fig. 18) y se estableció un pulso de riego igual para todos los tratamientos.

Para calcular el pulso de riego en cada uno de los sistemas, se determinó la humedad fácilmente aprovechable (HFA), la cual se define como la fracción del total de agua disponible en la zona radicular que un cultivo puede extraer sin experimentar estrés hídrico (Allen 2006). Se determinó el volumen de agua en L contenida en el suelo al encontrarse en CC y PMP, la diferencia entre estos dos valores se denomina humedad aprovechable (HA) y el 50% de este valor se considera HFA (Allen, 2006), equivalente al pulso de riego, o bien, se puede realizar un ligero ajuste para fines prácticos. Todas las operaciones realizadas se programaron para determinar el pulso de riego a una planta, esta información de utilidad para aplicar el riego a los tratamientos.



**Figura 18.** Parámetros de humedad del suelo, Campo Agrícola Experimental CIBNOR.

### 6.7.7 Determinación de la HFA para el sistema de RSD.

Capacidad de campo CC = 13%

Punto de marchitez permanente PMP = 4%

Densidad aparente  $D_a = 1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Volumen de suelo humedecido por planta =  $0.39 \text{ m}^3$

$$\begin{aligned} \text{VACS a CC} &= (\text{Volumen de suelo})(D_a)(1000)(\text{CC}\%) & (1) \\ &= (0.39 \text{ m}^3)(1.4)(1000)(13\%) = 70.98 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{VACS en PMP} &= (\text{Volumen de suelo})(D_a)(1000)(\text{PMP}\%) & (3) \\ &= (0.39 \text{ m}^3)(1.4)(1000)(4\%) = 21.84 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{HA} &= \text{Diferencia entre el VACS a CC contra el VACS a PMP} & (4) \\ &= (70.98\text{L})-(21.84\text{L}) = 49.14 \text{ L} \end{aligned}$$

$$\text{HFA} = (\text{HA})(50\%) = (49.14\text{L})(50\%) = 24.57 \text{ L} \quad (5)$$

**HFA para el sistema RSD y para RLZ = 24.57 L**

**HFA para el sistema RLC = 30.24 L**

Donde:

VACS.- Volumen de agua contenida en el suelo

CC.- Capacidad de campo

$D_a$ .- Densidad aparente

PMP.- Punto de marchitez permanente

HA.- Humedad aprovechable

HFA.- Humedad fácilmente aprovechable

Después de calcular la HFA para cada uno de los sistemas, se determinó el pulso de riego en 24 L por planta, toda vez que al considerar las propiedades físicas del suelo, se estima el volumen de agua que el suelo puede retener y aportar a la planta.

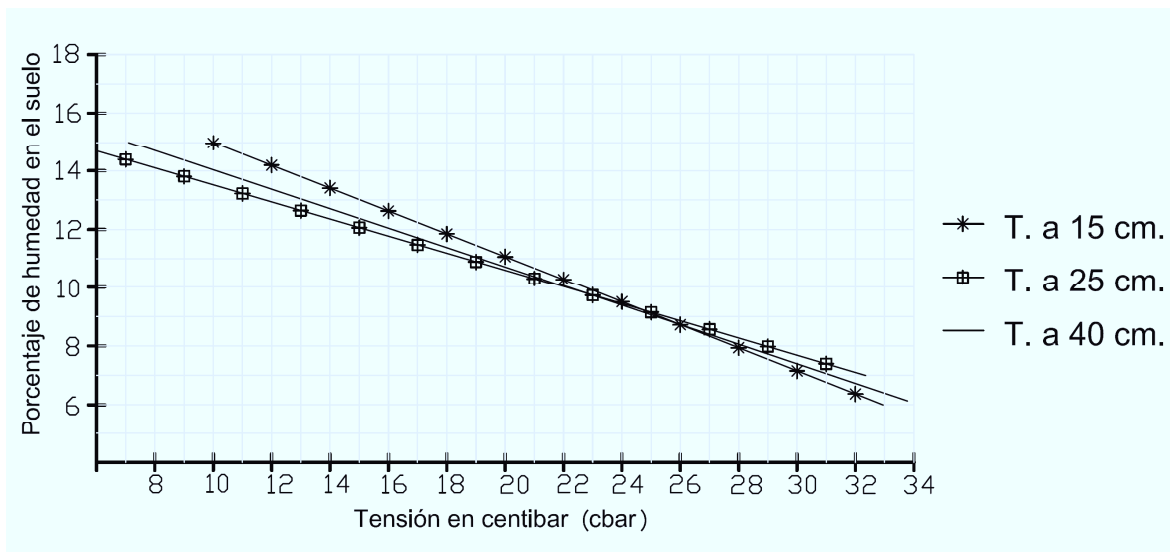
#### 6.7.8 Uso de tensiómetros para el monitoreo y control de la humedad en el suelo

Para tener un control preciso de la humedad del suelo se decidió realizar el monitoreo utilizando tensiómetros, se instalaron tres por cada tratamiento (15, 25 y 40 cm de profundidad) posteriormente se realizó la calibración de los mismos con el método gravimétrico, de esta forma se conoce el porcentaje de humedad que contiene el suelo en el momento que se monitorea el tensiómetro y es posible saber si es necesario aplicar el riego o esperar más tiempo (Fig. 19). Para el caso de la higuera, la humedad del suelo se mantuvo en el rango de CC como valor máximo y la humedad mínima fue equivalente al 50% de la HA. En el suelo del experimento corresponde a un rango de tensión de 12 a 27 centibar (cbar), que corresponde a un rango de humedad del suelo de 13 a 8.5 % (HFA). En un rango de profundidad de 10 a 30 cm (Fig. 19), esto para evitar que las plantas expresaran estrés hídrico.

Después de establecer los intervalos de tensión y humedad en los que se mantendría el suelo, se realizó el monitoreo de los tensiómetros de manera diaria durante la el tiempo del experimento una lectura a las 8:00 AM y otra a la 12 PM, la cual era determinante para decidir si regar o no el presente día. Cuando el intervalo del tensiómetro estaba cerca de los 27 cbar (25 a 27) se proporcionaba el riego, ya que al encontrarse el tensiómetro a las 12 PM en 25 cbar sin proporcionar riego, la tensión superaba los 27 cbar aproximadamente a las 4:00 PM del mismo día, al aplicar el riego siempre era un pulso igual (24 L por planta) y se esperaba los días que fuera necesario para repetir el riego cuando las condiciones de tensión llegaran al rango preestablecido. Con el proceso descrito de control de la humedad en el suelo, el cultivo siempre contó con agua suficiente para no experimentar estrés hídrico, el mismo criterio para los tres sistemas de riego.

Otro aspecto importante en el presente experimento fue el monitoreo constante de la conductividad eléctrica (CE) del extracto de saturación del suelo, ya que al regar la cantidad mínima necesaria se puede incrementar la CE, valores superiores a  $3.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Okubo y Utsunomiya, 1996) pueden afectar al cultivo, al detectarse

este problema, se abate aplicando una cantidad de agua tal que produzca lixiviación y lavado de sales.



**Figura 19.** Gráfica de calibración de tensiómetros en el sistema RSD.

### 6.7.9 Fertilización

La fertilización se aplicó con el método de fertirrigación, donde los nutrientes se agregan al agua de riego, de esta forma se riega y se fertiliza al mismo tiempo. En el lugar del experimento se contaba con un recipiente de 5,000 L; al llenarlo se aplicaba el fertilizante necesario según la etapa de cultivo, para conseguir la proporción requerida en partes por millón (ppm). Se realizaron dos programas de fertilización uno para la etapa de desarrollo y el otro para la etapa de producción tabla IV. Para calcular la dosis de fertilización se tomó como base a información de (Melgarejo, 2000), en su obra se hace referencia a la fertilización del cultivo intensivo de higuera, la información se presenta en unidades por hectárea, se hizo la conversión a ppm, considerando el volumen de agua que se requería, se hicieron pequeños ajustes y los programas de fertilización quedaron como se muestran en la tabla IV.



**Tabla IV.** Programas de fertilización para el cultivo de higuera; los valores se expresan en partes por millón (ppm).

<b>Periodo/Nutriente</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
Desarrollo Vegetativo	22	40	40	8	3
Producción	30	40	50	12	5

#### 6.7.10 Monitoreo de la planta

##### 6.7.10.1 Variables morfométricas:

- Longitud de tallos productores
- Grosor de tallos productores
- Ancho y largo de la hoja más grande

Las variables morfométricas fueron registradas durante el año de 2016, antes de la instalación de los sistemas de riego el 14 de enero, también después de instalados, 04 de mayo y cuando las plantas ya estaban adaptadas a los sistemas de riego y en buen clima, otra fecha de registro fue el 04 de julio, cuando las condiciones climáticas fueron más severas, esto debido a las altas temperaturas registradas en este mes, (tabla V y Fig. 20) Dentro de la casa de malla donde se realizó el experimento, fue colocada una estación climatológica (Wather Station Spectrum Technologies, inc. WATCH DOG Model 2900 ET Series 2000) para registrar las variables del clima.

Cabe mencionar que posterior a la primera medición se realizó una poda (24/01/2016) para estimular brotación y producción, con los datos obtenidos de las variables morfométricas se hicieron comparaciones en diferentes fechas, esto permitió comparar la respuesta de la planta con diferentes sistemas de riego.

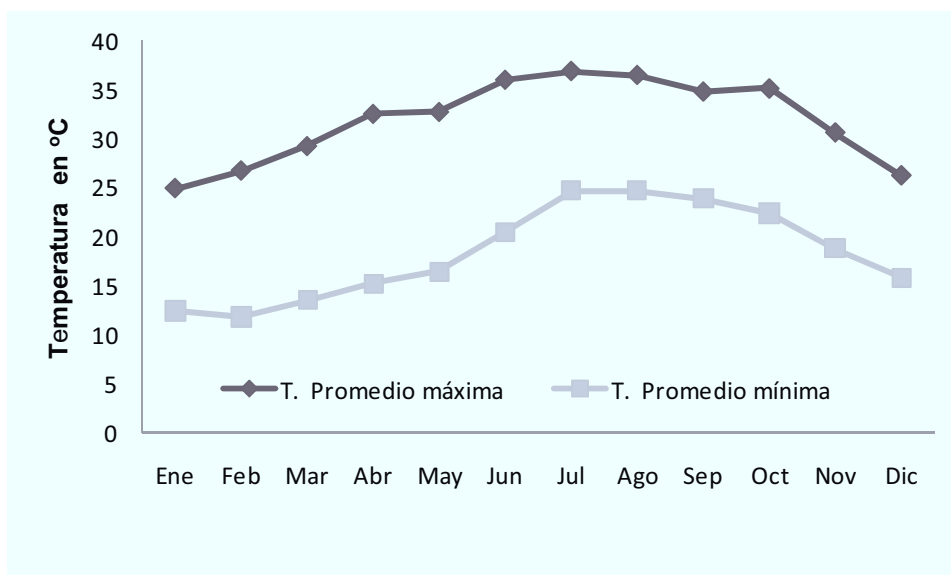
La longitud de tallos productores fue medida del punto de intersección entre el tallo secundario y el tallo productor hasta la yema apical del tallo productor (solo madera nueva).

El grosor del tallo productor fue medido en la base del mismo, a 1 cm arriba de la intersección entre el tallo secundario y el tallo productor, para tal medición se utilizó un vernier digital (Marca Titan).

En la medición del ancho y largo de la hoja más grande, fue seleccionada la quinta hoja más grande de cada planta, iniciando el conteo de la yema apical hacia abajo, al medir el largo de la hoja solo se midió el área foliar, descartando el largo del peciolo. La planta de higuera muestra su vigor con el tamaño de las hojas, en cada medición se tomó una hoja diferente, las de reciente formación que mostraron el estado de la planta.

**Tabla V.** Promedios mensuales de las variables climáticas registradas en el lugar del experimento durante el año 2016.

<b>Mes/ Variable</b>	<b>T. media máxima</b>	<b>T. media mínima</b>	<b>Hr. media máxima</b>	<b>Hr. media mínima</b>	<b>Precipitación en mm</b>
Enero	24,9	12,4	89,4	39,4	0,0
Febrero	26,7	11,8	91,3	31,6	14,6
Marzo	29,2	13,5	84,1	23,5	0,0
Abril	32,5	15,2	86,0	19,4	0,0
Mayo	32,7	16,4	84,6	22,4	3,5
Junio	36,0	20,5	80,8	24,8	1,2
Julio	36,9	24,7	77,0	28,7	0,9
Agosto	36,5	24,7	85,5	37,0	2,7
Septiembre	34,8	23,9	90,5	41,2	20,9
Octubre	35,1	22,4	87,5	35,8	0,0
Noviembre	30,6	18,8	89,5	44,1	0,0
Diciembre	26,2	15,8	88,4	42,3	8,8



**Figura 20.** Temperaturas promedio mensuales durante el año 2016 en el lugar del experimento.

#### 6.7.10.2 Variables ecofisiológicas.

- Potencial hídrico en la hoja
- Potencial mátrico en el suelo
- Fotosíntesis, tasa fotosintética
- Cantidad relativa de clorofila de la hoja
- Cantidad de clorofila total método directo (Arnon 1949)

Las variables ecofisiológicas fueron tomadas antes de la instalación de los sistemas de riego (14 de enero de 2016); después de su puesta en marcha, el 04 de mayo de 2016 y el 04 de julio de 2016, dichas variables se midieron con el apoyo de equipos e instrumentos del Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal del CIBNOR. Con su medición se obtuvieron datos sobre la respuesta de la planta a los distintos sistemas de riego.

El potencial hídrico en la hoja fue medido utilizando un psicrómetro (WP4-T, Decagon® Devices, Pullman, Washington, EE.UU.); se seleccionó la quinta hoja, considerando la yema apical del tallo hacia abajo para una de las ramas productoras de cada planta. Se tomó en cuenta una hoja madura y joven, la cual estuvo expuesta a la radiación solar directa por lo menos una hora antes de la medición y muestreo.

Para la medición del potencial mátrico en el suelo, se empleó el mismo psicrómetro (WP4-T) anteriormente descrito; para la toma de la muestra se seleccionó el área de influencia de la raíz (a 80 cm del tallo) y en una zona representativa de riego según el sistema. El área fue limpiada para posteriormente tomar la muestra a una profundidad de 2 cm, la cual fue colocada en un contenedor plástico especial de 4 cm de diámetro y 1 cm de profundidad. Dichas muestras fueron cerradas y colocadas en una hielera para su traslado y posterior medición en el Laboratorio de Fisiotécnica Vegetal del CIBNOR, donde se midió el potencial mátrico del suelo con el citado psicrómetro.

En cuanto a la fotosíntesis, la medición de la tasa fotosintética  $\text{CO}_2$  ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), fue realizada de 10:00 a 13:00 horas en días soleados; para dicha medición se seleccionó la quinta hoja contada de la yema apical hacia abajo, tomando en cuenta una hoja madura y joven; para ello se utilizó un medidor portátil de fotosíntesis (LI-6400XT LI-COR Biosciences Inc. Nebraska USA).

La estimación de la cantidad de clorofila de la hoja, se realizó con el método de unidades relativas SPAD, mediante un medidor portátil (SPAD 502, Minolta® Camera Co., Ltd., Japan). Para ello se seleccionó la quinta hoja, contada de la yema apical del tallo hacia abajo, en virtud de que la hoja ubicada en la posición mencionada era una hoja madura y joven; cada hoja fue medida en tres ocasiones y el dato considerado fue el promedio de las tres lecturas.

Para la medición de la clorofila a, b y total, se tomaron tres discos de la misma hoja, el área total fue de 3.9 cm<sup>2</sup> dichos discos se obtuvieron mediante un sacabocados, y depositados en un tubo de ensayo con 20 ml de acetona al 80%, después los tubos de ensayo fueron colocados en un soporte tipo rejilla, los cuales fueron mantenidos en completa obscuridad por 72 horas, para posteriormente medir la absorbancia con un espectrofotómetro (Spectronic Unicomp, Cambridge, Reino Unido). La absorbancia de los extractos de la hoja fueron medidos a 645 nm y 663 nm y el contenido total de clorofila (Chl a + Chl b) fue determinado por el método de Arnon (1949) y fue expresado en función del peso y del área foliar (mg·cm<sup>-2</sup>).

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Resultados.- Primer experimento

#### 7.1.1 Tipo de suelo

El suelo del área de estudio es de textura arenosa franca, con 81.6, 17.5 y 0.9% de arena, limo y arcilla. El perfil de 0 a 40 cm consiste en un suelo con contenido muy bajo en materia orgánica de 0.7%, pH alcalino de 8.8, CE de 0.4 dS·m<sup>-1</sup> y Da con valor de 1.40 gr cm<sup>-3</sup>; los valores de CC y PMP fueron 13 y 4%, respectivamente.

La evaporación potencial (E<sub>o</sub>) para la primera y segunda fecha fue 6.32 y 2.82 mm·día<sup>-1</sup>, respectivamente. El contenido de humedad del suelo expresado en porcentaje se muestra en las tablas VI y VII, donde los resultados corresponden a cuatro profundidades y cuatro fechas, para cada experimento; en la parte inferior de cada tabla se muestra la pérdida de humedad acumulada en los períodos observados. La evaporación del suelo desnudo después del primer riego ocurrió con mayor intensidad durante las primeras 24 h y posteriormente fue disminuyendo de manera paulatina (Figs. 21 y 22).

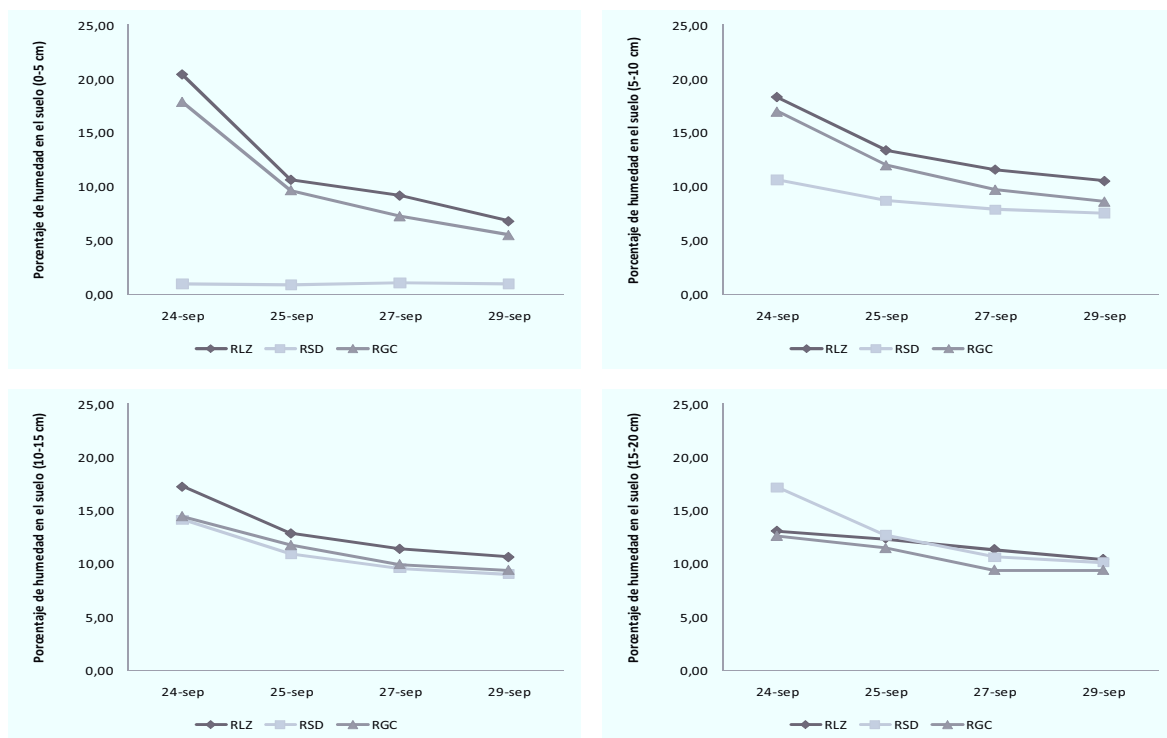
Debido a que el bulbo húmedo es dinámico, su forma geométrica y contenido de humedad cambian gradualmente a medida que el suelo pierde agua, en consecuencia, las imágenes fueron diferentes para cada día de muestreo. La lámina evaporada para cada sistema de riego evaluado durante el experimento se calculó considerando una distancia entre líneas regantes de un m (Figs. 23 y 24).

**Tabla VI.** Porcentaje de humedad del suelo, a cada profundidad, sistema de riego y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 24 a 29 de septiembre de 2015.

<b>Prof. 0-5 cm</b>	<b>RLZ</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>	<b>Prof. 5 a 10 cm</b>	<b>RLZ</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>
24-sep	20.40	1.02	17.83	24-sep	18.30	10.66	17.00
25-sep	10.67	0.92	9.67	25-sep	13.38	8.72	12.04
27-sep	9.22	1.11	7.27	27-sep	11.60	7.88	9.77
29-sep	6.84	1.01	5.52	29-sep	10.54	7.56	8.67
Pérdida de H.	13.56	0.01	12.32	Pérdida de H.	7.76	3.10	8.34

<b>Prof. 10 a 15 cm</b>	<b>RLZ</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>	<b>Prof. 15 a 20 cm</b>	<b>RLZ</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>
24-sep	17.27	14.15	14.49	24-sep	13.07	17.17	12.62
25-sep	12.89	10.94	11.76	25-sep	12.38	12.69	11.46
27-sep	11.45	9.61	9.96	27-sep	11.35	10.65	9.43
29-sep	10.68	9.05	9.42	29-sep	10.42	10.14	9.42
Pérdida de H.	6.59	5.10	5.08	Pérdida de H.	2.64	7.03	3.20



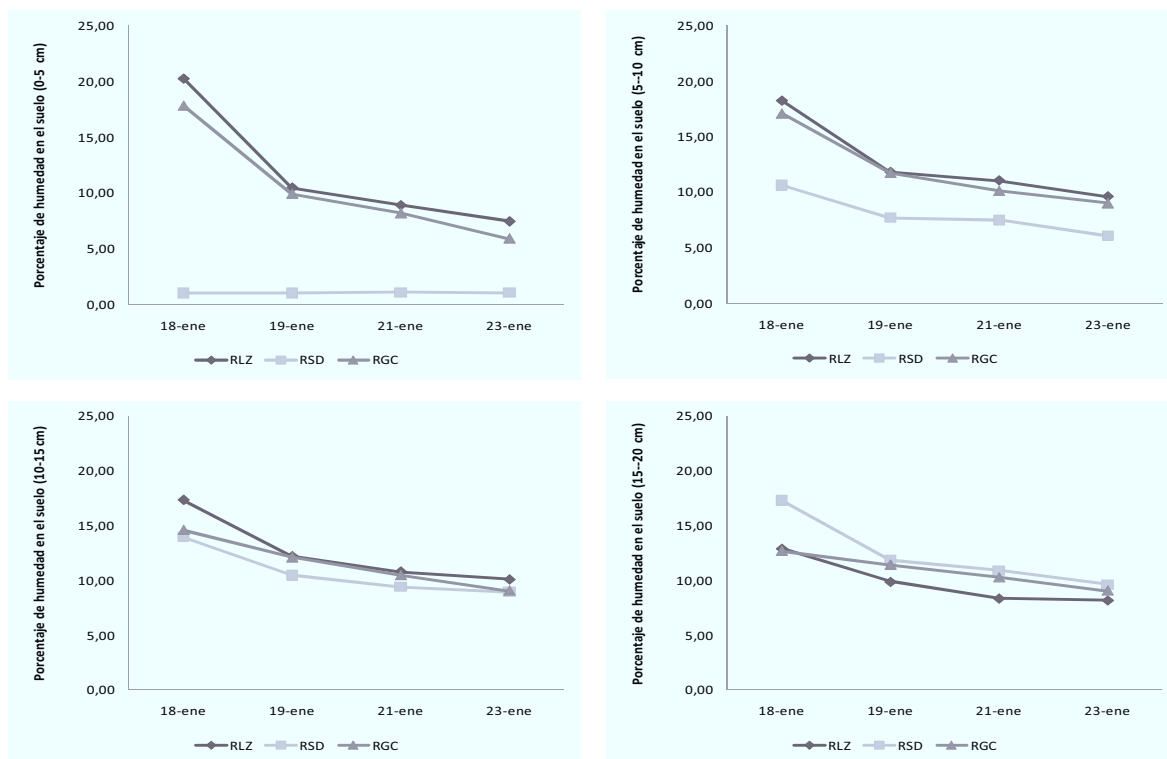
**Figura 21.** Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 24 a 29 de septiembre de 2015.

**Tabla VII.** Contenido de humedad del suelo a cada profundidad, tratamiento y fecha, con pérdida de humedad acumulada; 18 a 23 de enero de 2016.

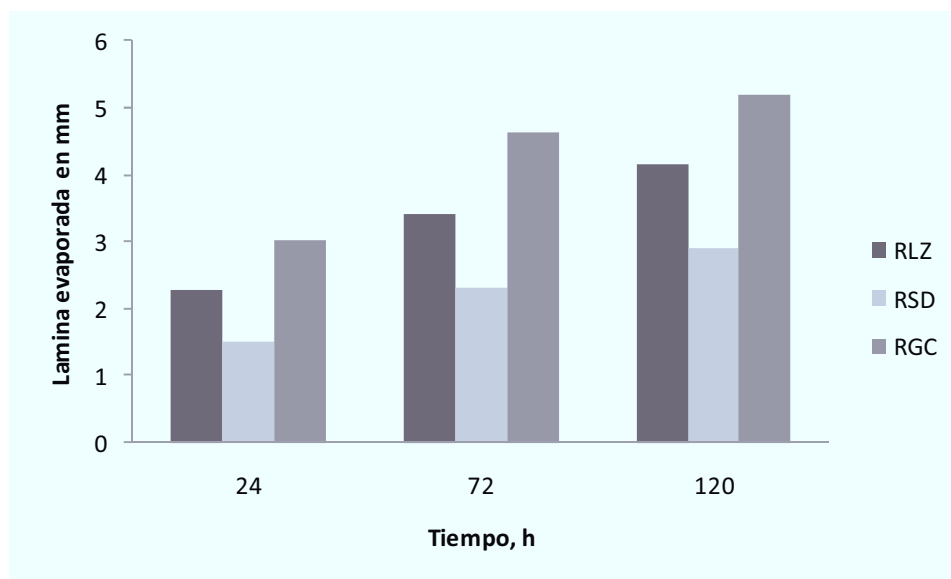
Prof. 0 a 5 cm	RLZ	RSD	RGC	Prof. 5 a 10 cm	RLZ	RSD	RGC
18-ene	20.27	1.02	17.84	18-ene	18.25	10.61	17.09
19-ene	10.48	1.03	9.91	19-ene	11.78	7.67	11.72
21-ene	8.89	1.07	8.16	21-ene	11.02	7.48	10.10
23-ene	7.44	1.05	5.90	23-ene	9.56	6.04	8.95
Pérdida de H.	12.83	-0.03	11.94	Pérdida de H.	8.69	4.57	8.14

Prof. 10 a 15 cm	RLZ	RSD	RGC	Prof. 15 a 20 cm	RLZ	RSD	RGC
18-ene	17.30	13.94	14.57	18-ene	12.88	17.30	12.68
19-ene	12.17	10.44	12.06	19-ene	9.86	11.82	11.40
21-ene	10.76	9.39	10.43	21-ene	8.34	10.89	10.24
23-ene	10.05	8.92	9.53	23-ene	8.17	9.61	9.03
Pérdida de H.	7.25	5.02	5.04	Pérdida de H.	4.71	7.69	3.65

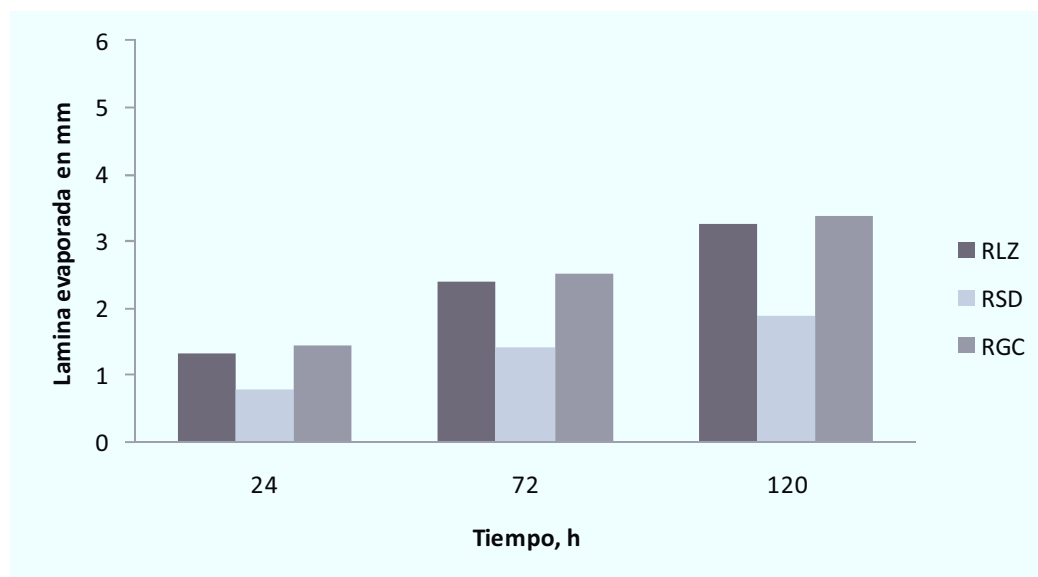


**Figura 22.** Porcentaje de humedad en el suelo a cuatro profundidades después de aplicar 10 L por m en cada unidad experimental; 18 a 23 de enero de 2016.



**Figura 23.** Evaporación acumulada de tres sistemas de riego en (2015).





**Figura 24.** Evaporación acumulada de tres sistemas de riego en (2016).

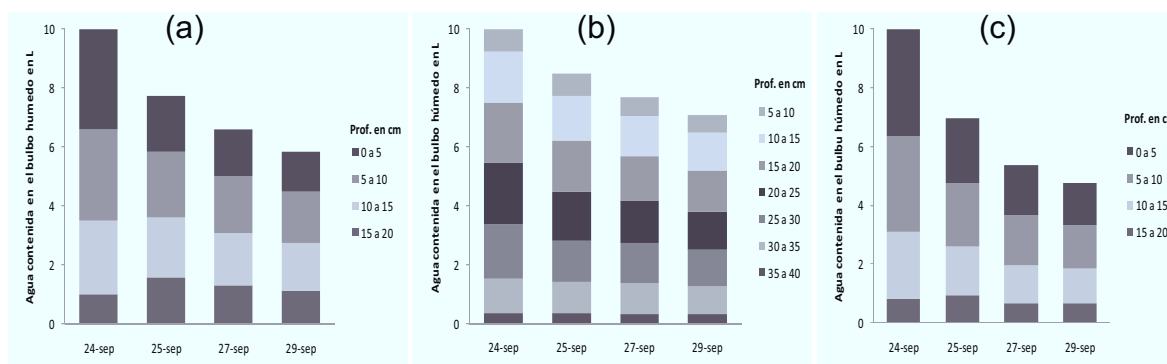
Al estimar la evaporación del suelo desnudo en relación a la evaporación potencial tomando como referencia el área del bulbo húmedo, se encontró que la evaporación fue mayor durante las primeras 24 horas posteriores al riego, la cual corresponde al 85% de la evaporación potencial en el sistema de RLZ, de 50% para el RSD y de 90% para el sistema RGC. Cabe mencionar que los porcentajes fueron similares en ambas fechas del experimento (septiembre de 2015 y enero de 2016). Al expresar la evaporación en  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  y considerando una distancia de 1 m entre surcos, para el periodo del 24 al 29 septiembre de 2015 se observa que durante las primeras 24 h la evaporación equivale a  $22.80 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  en el sistema RLZ, 15.10 en RSD y 30.30 en RGC. Debido a que la pérdida por evaporación disminuyó paulatinamente hasta el último día observado, la evaporación entre el día 4 y 5 posterior al riego fue  $3.75 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  para RLZ, 2.95 para RSD y 3.10 para RGC. En el periodo del 18 al 23 de enero de 2016, durante las primeras 24 h posteriores al riego, la evaporación fue  $13.3 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  en RLZ, 8.0 en RSD y 14.5 en SRG; posteriormente, la pérdida por evaporación para el último día observado entre el día 4 y 5 después del riego, fue  $4.45 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  para RLZ, 2.50 para RSD y 4.40 para RGC, lo cual se muestra en la tabla VIII.

**Tabla VIII.** Pérdida por evaporación directa de suelo desnudo con tres sistemas de riego, posterior a un riego de  $10 \text{ L}\cdot\text{m}^{-1}$ , equivalente a  $100 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ .

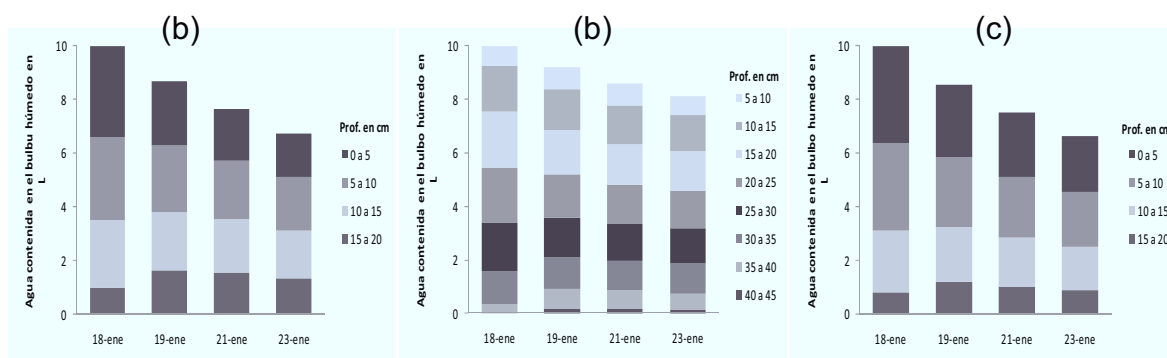
Sistema de Riego	Septiembre 2015				Enero 2016			
	----- Tiempo después del riego (h) -----							
	24	72	120	$\Sigma$	24	72	120	$\Sigma$
RLZ (Vol. en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	22.80	11.20	7.50	41.50	13.30	10.50	8.90	32.70
RSD (Vol. en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	15.10	8.00	5.90	29.00	8.00	6.00	5.00	19.00
RGC (Vol. en $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ )	30.30	15.90	5.80	52.00	14.50	10.60	8.80	33.90

En todos los casos, la pérdida por evaporación fue menor en el RSD; la diferencia entre el RSD y RLZ fue de 30% en septiembre de 2015 y de 41% en enero de 2016. Por su parte, la diferencia entre RSD y RGC fue de 44%, la cual fue similar en ambos períodos de experimentación.

La distribución del agua en el perfil del suelo por capas se muestra en las (Fig. 25 y 26), para cada uno de los sistemas de riego durante el periodo observado (120 horas después del riego). Se aprecia en los sistemas superficiales que la mayor cantidad de agua en el suelo se deposita en las primeras capas, de 0 a 10 cm; por su parte, en el sistema subterráneo el mayor volumen se concentra de 10 a 30 cm de profundidad.



**Figura 25.** Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, septiembre de 2015. (a): RLZ, (b): RSD, (c): RGC.



**Figura 26.** Distribución del agua contenida en el suelo por profundidad en tres sistemas de riego, enero de 2016. (a): RLZ, (b): RSD, (c): RGC.

### Análisis estadístico

La pérdida de humedad fue calculada por diferencia entre la primera y la última muestra de cada capa a partir de los datos originales, los datos se agruparon por profundidad formando cuatro grupos; para el análisis estadístico se consideraron los datos de las tres repeticiones por cada tratamiento. Los datos de humedad del suelo fueron analizados por profundidad (0-5, 5-10, 10-15 y 15-20 cm), a los cuatro grupos de datos se les aplicó la prueba de normalidad de Barlett, mediante

la cual se verificó que corresponden a una población normal, por tal razón se aceptó la hipótesis nula ( $H_0$ ) de similitud de varianza para todos los grupos analizados. Una vez realizadas las pruebas de normalidad, los datos fueron analizados en el programa Excel, con el cual se calculó la suma de cuadrados totales (SCT) y la suma de cuadrados de tratamientos (SCt). Con la información obtenida se realizaron los ANDEVAS de una sola vía con nivel de significancia  $P \leq 0.05$  y  $\leq 0.01$  y posteriormente se realizó la comparación de medias con el método de diferencia mínima significativa (DMS) con nivel de significancia  $P \leq 0.05$  y  $\leq 0.01$  para el período de septiembre 2015, de 0 a 5 cm las diferencias fueron altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ); al comparar las medias, el tratamiento con menor evaporación fue RSD y el de mayor evaporación fue RLZ. De 5 a 10 cm las diferencias también fueron altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ), donde el tratamiento con menor evaporación fue RSD, mientras que RLZ fue estadísticamente similar al RGC. A su vez, de 10 a 15 cm, los resultados fueron estadísticamente similares. De 15 a 20 cm los resultados mostraron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ), donde los sistemas con menor evaporación fueron RLZ y RGC, estadísticamente similares, mientras que el riego con mayor pérdida en esta capa fue RSD, los resultados de los análisis estadístico para se resumen en la tabla IX.

**Tabla IX.** Resumen de ANDEVAS y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 24 al 29 de septiembre de 2015.

ANDEVAS			COMPARACION DE MEDIAS (DMS)	
Prof.	F. c.	Re.	Re.	Observaciones
0-5 cm	1074.72	**	abc	RSD fue el tratamiento con menor pérdida.
5-10 cm	28.20	**	abb	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RLZ fueron estadísticamente similares.
10 -15 cm	2.99	NS	aaa	RSD, RGC y RLZ fueron estadísticamente similares.
15-20 cm	9.29	*	abb	RLZ y RGC fueron estadísticamente similares, RSD reflejó la mayor pérdida.

Resultado (**Re.**), Valor de F. calculada (**F. c.**), Profundidad (**Prof.**).

Para enero de 2016, en la profundidad 0 a 5 cm los resultados muestran diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ), donde el tratamiento con menor evaporación fue RSD, en tanto que RLZ fue estadísticamente similar a RGC. De 5 a 10 cm los resultados muestran diferencia significativa ( $P \leq 0.01$ ), donde el sistema con menor evaporación fue RSD, mientras que RLZ y RGC fueron estadísticamente similares. A su vez, de 10 a 15 cm los resultados sugieren que los tres sistemas fueron estadísticamente similares. En contraste, de 15 a 20 cm de profundidad los resultados muestran diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ), donde los sistemas con menor evaporación y estadísticamente similares fueron RLZ y RGC, mientras que la mayor pérdida se observó en RSD, los resultados de los análisis estadístico para se resumen en la tabla X.

**Tabla X.** Resumen de ANDEVA y comparación de medias de pérdida de humedad; período del 18 al 23 de enero de 2016.

ANDEVAS			COMPARACION DE MEDIAS (DMS)	
Prof. cm	F. c.	Re.	Re.	Observaciones
0-5	337.83	**	aab	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RLZ fueron estadísticamente similares.
05-oct	19.63	**	aab	RSD reflejó la menor pérdida, RGC y RLZ fueron estadísticamente similares.
oct-15	2.81	NS	aaa	Los tres tratamientos fueron estadísticamente similares.
15-20	5.85	*	abb	RLZ y RGC fueron estadísticamente similares, RSD mostró la mayor pérdida.

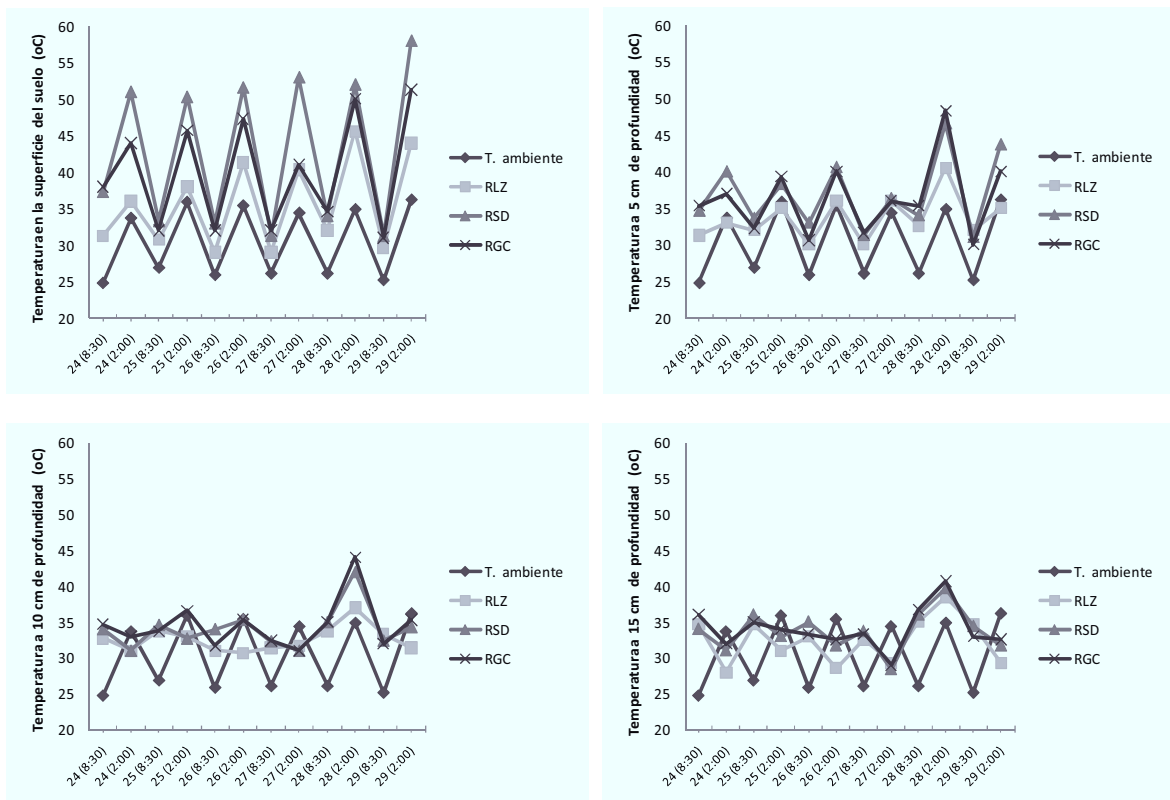
Resultado (**Re.**), Valor de F. calculada (**F. c.**), Profundidad (**Prof.**).

Allen *et al.* (2006) estima pérdidas por evaporación directa del suelo en 28.95% del volumen total de agua para riego de cultivos perennes, de acuerdo con la distribución cuantitativa anual de la evapotranspiración según FAO (2007). A

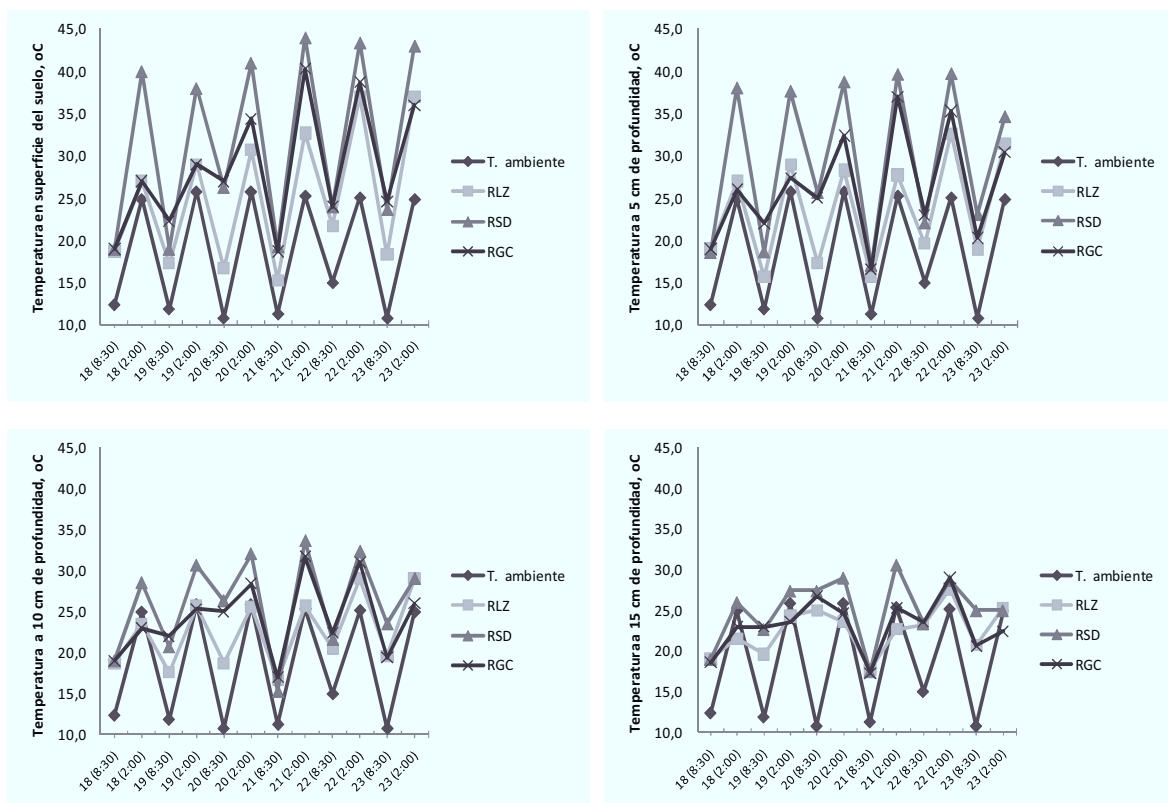
manera de ejemplo, al aplicar los resultados obtenidos en los tres sistemas de riego en un cultivo que requiere  $7,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  en un año, se tendrían pérdidas por evaporación del suelo estimadas en  $2,026.5 \text{ m}^3$ . En este caso, al tomar en cuenta una aportación de  $7,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  calculada para un sistema RGC, con los sistemas RSD y RLZ se requerirían  $6,106$  y  $6,712 \text{ m}^3$ , con un ahorro de agua estimado para RSD y RLZ de 44 y 14%, respectivamente, en relación a la fracción del agua que se pierde por evaporación directa del suelo.

### 7.1.2 Resultados de temperatura del suelo

Los valores de máxima y mínima ambiental fueron  $36.1$  y  $24.9 \text{ }^\circ\text{C}$  en septiembre de 2015, las cuales bajaron a  $26.2$  y  $10.4 \text{ }^\circ\text{C}$  en enero de 2016; en ambos períodos, la temperatura máxima se presentó de 2:00 a 4:00 PM (Figs. 27 y 28). La variación de la temperatura del suelo a diferentes profundidades reflejó una tendencia similar al contenido de humedad en las mismas. En septiembre de 2015, la mayor temperatura en la superficie del suelo ( $57.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se observó en RSD y la menor ( $44.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) en RLZ, lo cual es esperable por la humedad que aporta este sistema, donde RGC mostró un valor intermedio ( $51.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ). A su vez, a 5 cm de profundidad fue mayor en RGC ( $47.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que en RSD ( $46.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y RLZ ( $35.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), éste último también con la menor temperatura. A 10 cm la diferencia de temperatura del suelo entre sistemas disminuyó notoriamente, donde RGC reflejó el máximo ( $35.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y RLZ el mínimo ( $32.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). De manera similar, a 15 cm RGC mostró la máxima ( $32.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y RLZ la mínima ( $29.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En ambas profundidades de 10 y 15 cm, RSD mostró valores intermedios ( $33.9$  y  $32.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ). En enero de 2016, RSD reflejó la máxima en superficie y a 5 cm, con  $42.8$  y  $34.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, donde RLZ y RGC registraron temperaturas similares. A 10 y 15 cm las diferencias de temperatura del suelo entre los tres sistemas disminuyeron considerablemente, donde RSD y RLZ presentaron temperaturas similares, con medias de  $28.9$  y  $25.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, mientras que RGC presentó mínimas de  $25.9$  y  $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 27.** Tendencia de la temperatura del suelo en el período del 24 al 29 de septiembre de 2015.



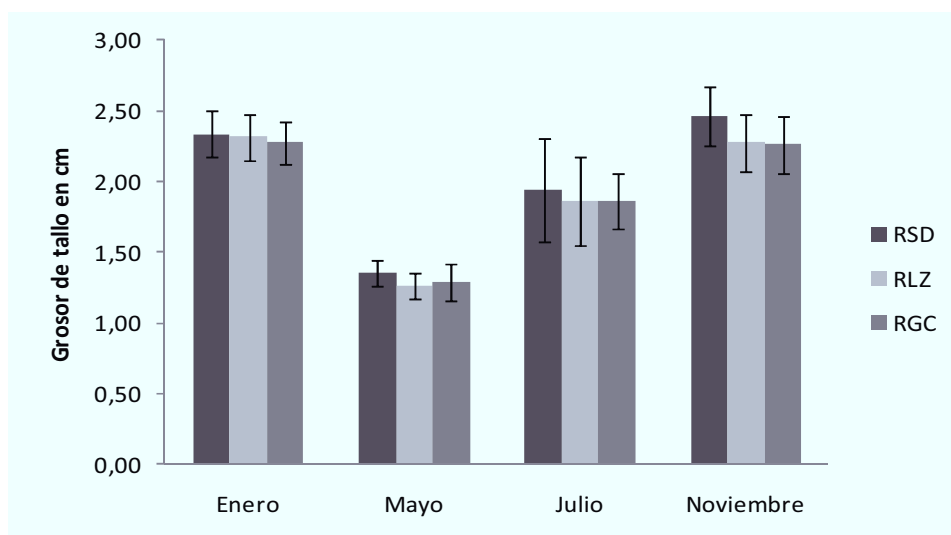
**Figura 28.** Tendencia de la temperatura del suelo en el período 18 al 23 de enero de 2016.



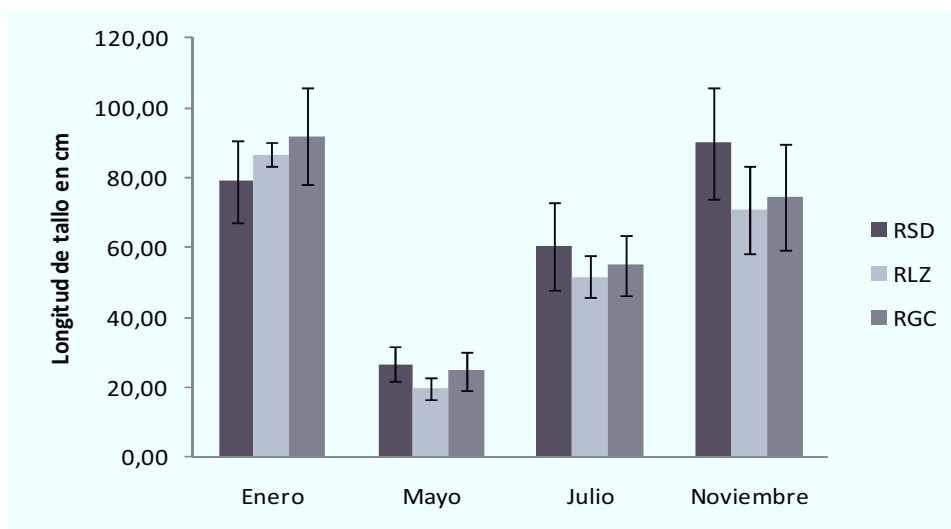
## 7.2 Resultados.- Segundo experimento

### 7.2.1 Variables morfométricas

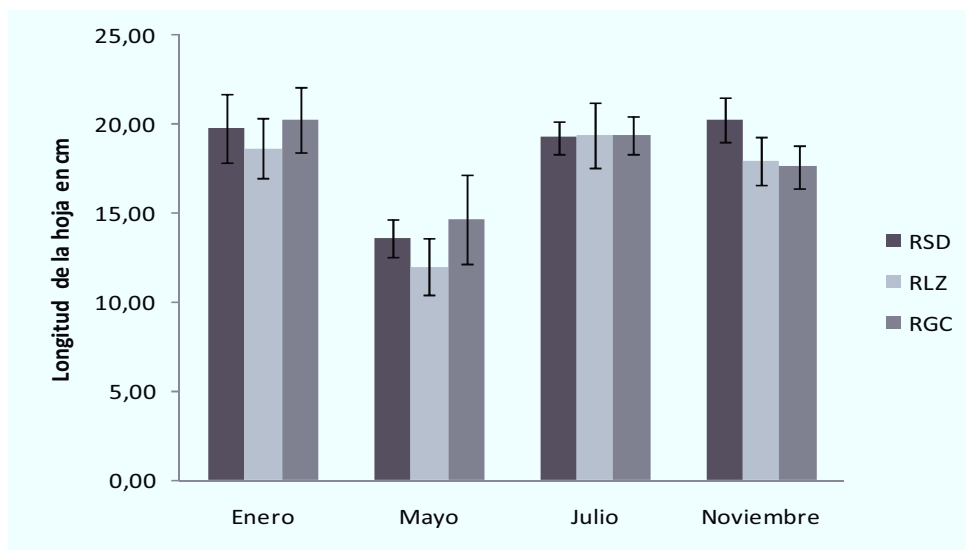
En las variables morfométricas analizadas para el año 2016, no se encontró diferencia significativa para grosor promedio de tallos productores (fig. 29); por su parte, se observaron diferencias significativas en la variable longitud promedio de tallos productores, en el mes de mayo, donde el RDS fue superior a RLZ y en noviembre RSD fue superior a los otros dos sistemas de riego como lo muestran la figura 30 y las comparaciones de medias, tablas XI y XII. En relación a longitud de hoja, se detectaron diferencias significativas, para el mes de mayo, donde RGC fue superior a RLZ y en noviembre el RSD fue superior a RLZ y RGC, lo cual se muestra en la figura 31 y en las comparaciones de medias, tablas XI y XII.



**Figura 29.** Grosor promedio de tallos productores, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.



**Figura 30.** Longitud promedio de tallos productores, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.



**Figura 31.** Longitud de hoja, para cada uno de los tratamientos y en diferentes fechas.

**Tabla XI.** Comparación de medias para el mes de mayo de 2016.

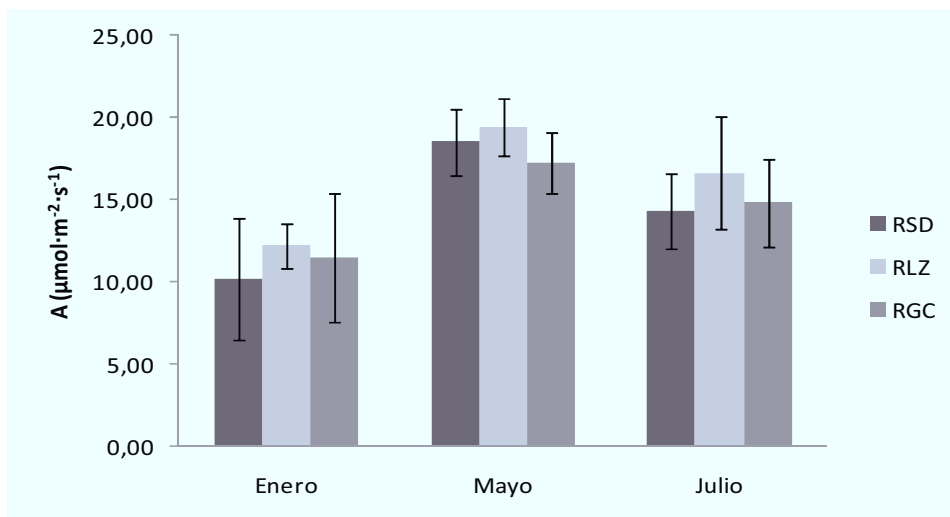
<b>Longitud promedio de tallos. (DMS)</b>			<b>Longitud promedio de hojas. (DMS)</b>		
Tratamiento	Media	$p \leq 0.05$	Tratamiento	Media	$p \leq 0.05$
RSD	26.62	a	RGC	14.62	a
RGC	24.68	ab	RSD	13.56	ab
RLZ	19.81	b	RLZ	12.00	b

**Tabla XII.** Comparación de medias para el mes de noviembre de 2016.

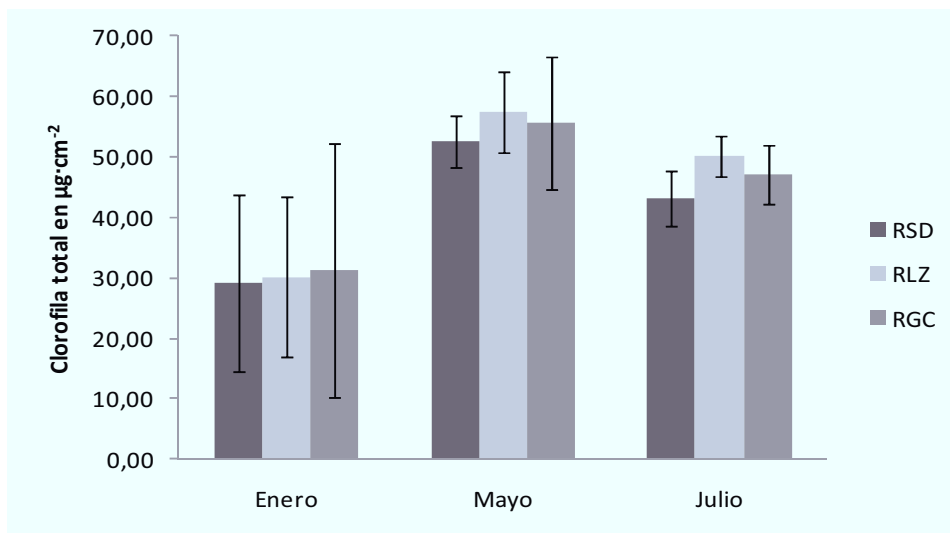
<b>Longitud promedio de tallos. (DMS)</b>			<b>Longitud promedio de hojas. (DMS)</b>		
Tratamiento	Media	$p \leq 0.05$	Tratamiento	Media	$p \leq 0.05$
RSD	89.95	a	RSD	20.25	a
RGC	74.51	b	RLZ	17.93	b
RLZ	70.73	b	RGC	17.62	b

### 7.2.2 Variables ecofisiológicas.

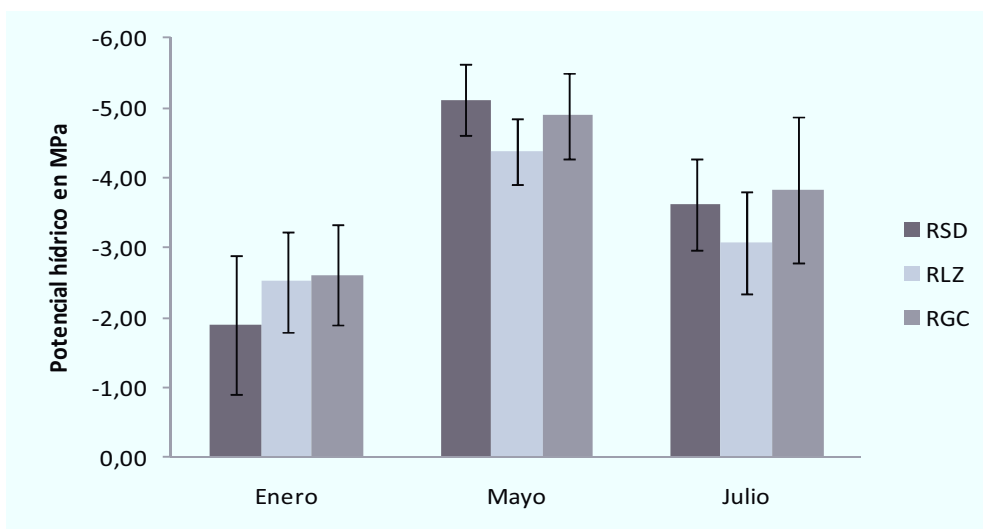
Los análisis de varianza para las variables ecofisiológicas durante el año 2016, no mostraron diferencia significativa para la variable tasa fotosintética, en ninguna fecha analizada (fig. 32); la variable contenido de clorofila total, solo mostró diferencia significativa en julio, donde el tratamiento RLZ fue superior a RSD, como se muestra en la figura 33; por su parte en la variable potencial hídrico en la hoja, únicamente se detectó diferencia significativa en mayo, donde el tratamiento RLZ fue superior a RSD (fig. 34); la variable potencial mátrico, mostró diferencia significativa en el mes de mayo, donde RLZ fue superior a RSD y en el mismo mes diferencia altamente significativa, entre RSD y RGC siendo superior el último, en la misma variable para el mes de julio, la diferencia fue altamente significativa, donde RLZ y RGC fueron superiores a RSD (fig. 35); por el contrario los resultados para la variable índice SPAD, no mostraron diferencia significativa en ninguna fecha analizada (fig. 36).



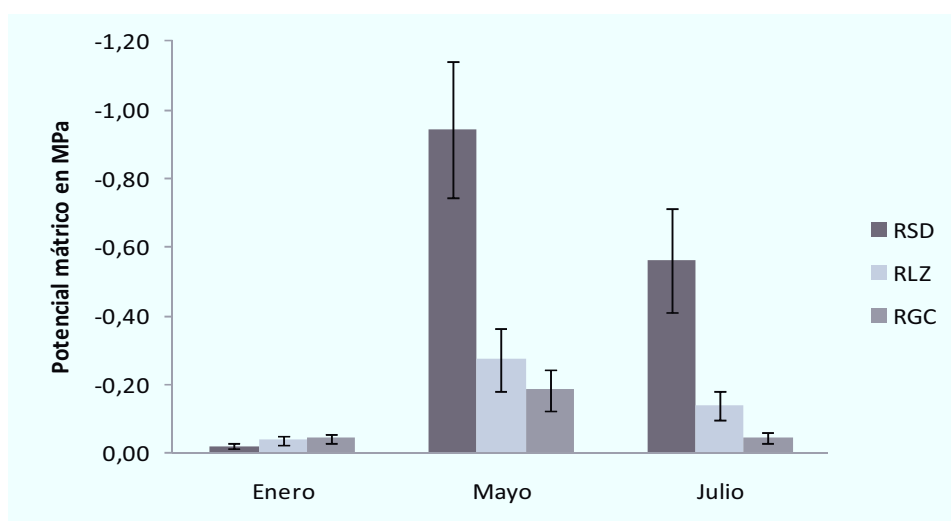
**Figura 32.** Medias y desviaciones estándar de la variable tasa fotosintetica para tres fechas durante el año 2016.



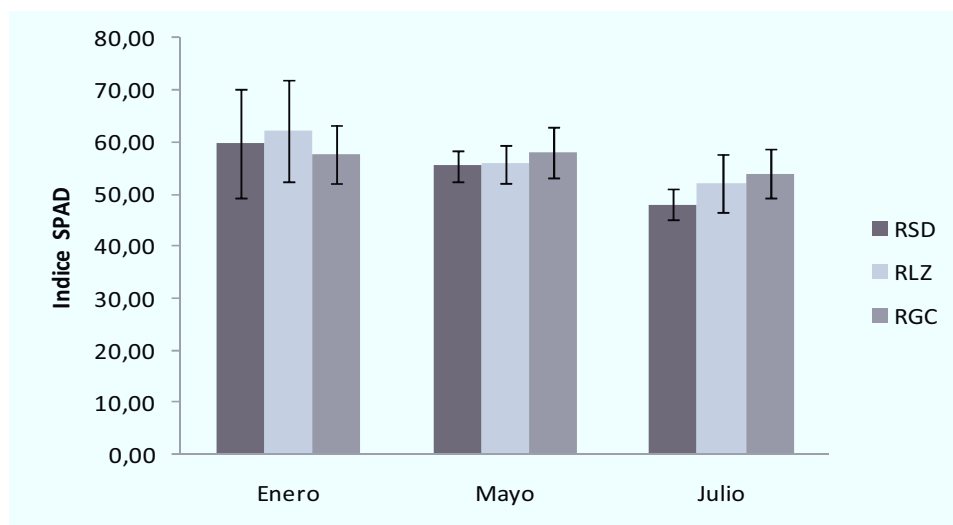
**Figura 33.** Medias y desviaciones estándar de la variable clorofila total para tres fechas durante el año 2016.



**Figura 34.** Medias y desviaciones estándar de la variable potencial hídrico en la hoja.



**Figura 35.** Medias y desviaciones estándar de la variable potencial potencial mátrico; profundidad 0 a 10 cm.



**Figura 36.** Medias y desviaciones estándar de la variable potencial índice SPAD.

### 7.2.3 Cosecha de higo fresco durante el ciclo 2016

El análisis de varianza mostró diferencia altamente significativa para la cosecha de 2016 (Fig. 37) y tablas XIII y XIV; al realizar la comparación de medias con DMS, se encontró que el tratamiento RSD fue superior a RGC y RLZ, como lo muestra la (Fig. 38).

La conversión a  $\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , considerando la densidad de siembra de 1,400 plantas por ha arroja un rendimiento de 5,170 kg para RSD, de 2,746 para RGC y de 2,011 para RLZ.

**Tabla XIII.** Resumen de cosecha por mes, promedio por árbol.

<b>Fecha</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>	<b>RLZ</b>
Julio	877	729	339
Agosto	1237	644	676
Septiembre	820	485	336
Octubre	253	104	61
Noviembre	506	0	26
<b>Sumatoria</b>	<b>3693</b>	<b>1962</b>	<b>1437</b>

Nota: Los valores se expresan en gramos por árbol.

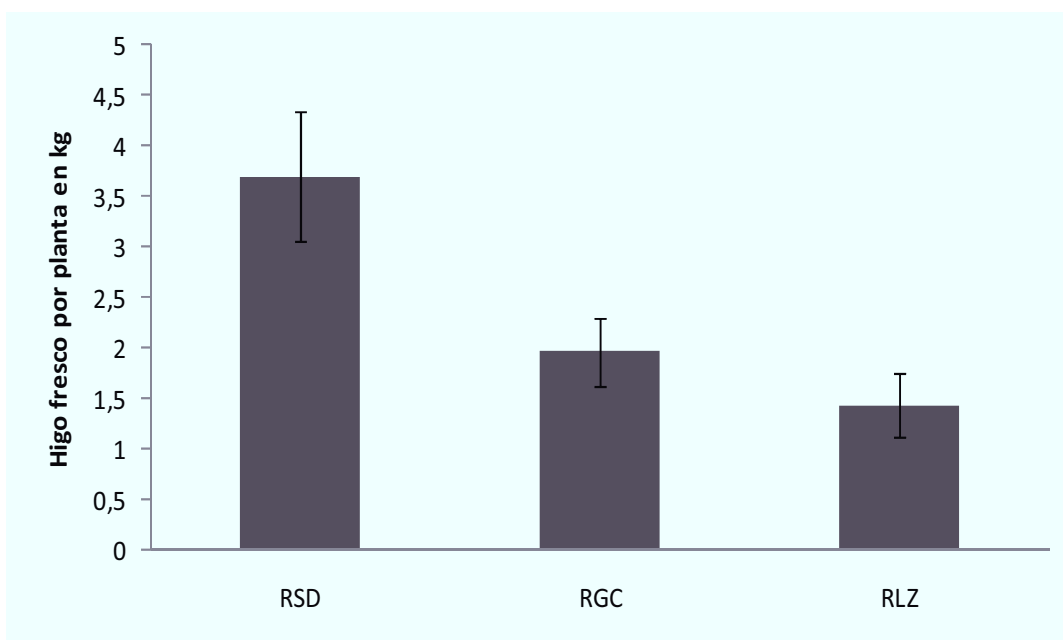
**Tabla XIV.** Producción por planta en todo el ciclo.

<b>No. de planta</b>	<b>RSD</b>	<b>RGC</b>	<b>RLZ</b>
1	4.74	2.12	1.76
2	3.31	1.68	1.12
3	3.37	1.62	0.88
4	3.38	1.57	1.58
5	3.87	2.44	1.53
6	3.04	2.41	1.76
7	3.25	1.96	1.27
8	4.59	1.88	1.60
<b>Promedio</b>	<b>3.69</b>	<b>1.96</b>	<b>1.44</b>

Nota: Los valores se expresan en kilogramos por planta.



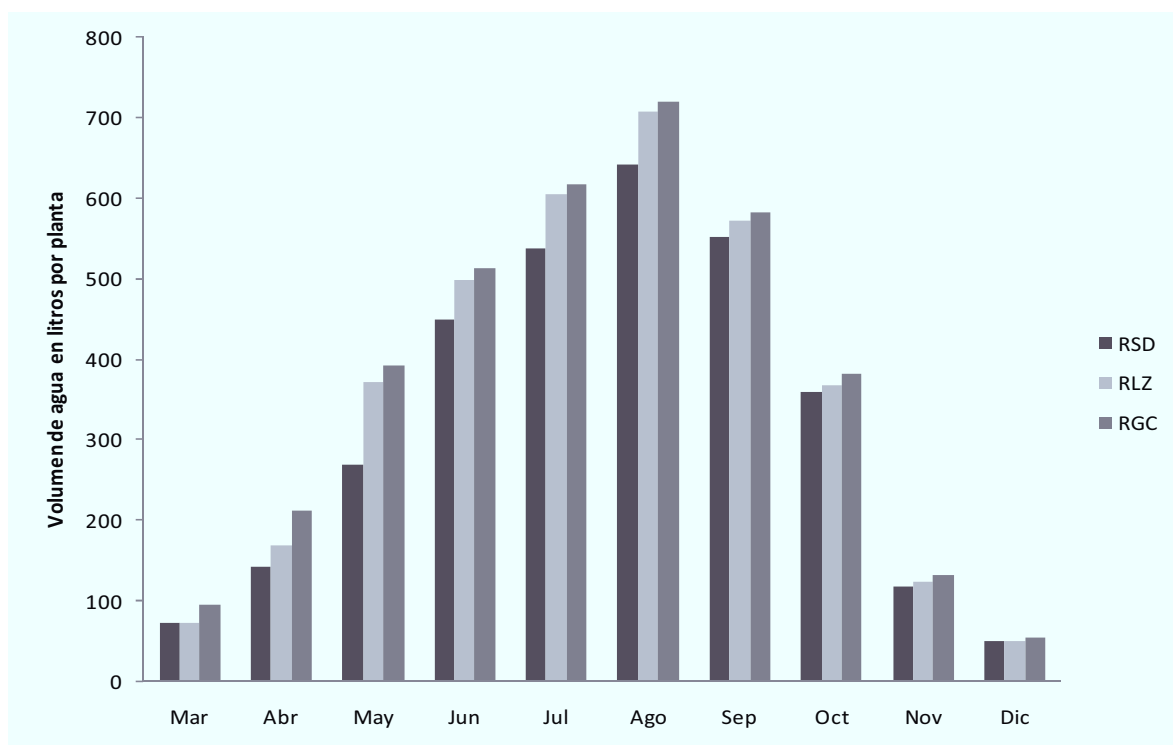
**Figura 37.** Higo fresco, cosecha 2016.



**Figura 38.** Rendimiento de higo fresco por planta, durante el ciclo 2016 con diferentes sistemas de riego.



#### 7.2.4 Consumo de agua en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego durante el ciclo 2016



**Figura 39.** Consumo de agua en litros por planta para cada mes en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego durante el ciclo 2016.

El consumo de agua en  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  fue equivalente a 5,178 para RGC, de 4,949 para RLZ y de 4,467 para RSD, lo cual representa un ahorro de 13.7% al comparar RSD con RGC y de 9.7% al comparar RSD con RLZ (Fig. 39).

#### 7.2.5 Productividad del agua en el cultivo de higuera con tres sistemas de riego.

Al comparar el rendimiento de higo fresco con el consumo de agua para los sistemas de riego, se obtuvo que el volumen de agua necesario para producir un kilogramo de higo fresco fue en cada caso: RSD = 864 L; RGC = 1,885 L y RLZ = 2,460 L.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Discusión.- Primer experimento

En relación al primer experimento, donde se evaluó la pérdida de agua por evaporación directa del suelo, los resultados reflejaron que la pérdida de humedad fue menor en el tratamiento RSD, donde la diferencia fue 35% en promedio al comparar los resultados con el tratamiento RLZ y de 44% en comparación con el tratamiento RGC, esto considerando ambos periodos, septiembre de 2015 y enero de 2016. Meshkat *et al.* (2000) obtuvieron datos similares cuando compararon el RGC con un sistema de goteo subterráneo, el cual consistió en colocar un tubo en el suelo, extraer el núcleo de suelo y rellenarlo con arena gruesa, lo cual les permitió colocar el agua bajo la superficie; reportaron que la diferencia de evaporación entre el sistema superficial y el subterráneo fue 39.8%. Montemayor *et al.* (2006) utilizaron maíz forrajero para comparar dos sistemas de riego, goteo superficial y subterráneo, y encontraron que con el sistema de riego subterráneo se obtiene un ahorro de 27.4%. Dicho resultado fue inferior al encontrado en la presente investigación y también al reportado por Meshkat *et al.* (2000). Tal diferencia puede obedecer a que el cultivo de maíz proyecta sombra sobre la superficie del suelo, lo que favorece la disminución de la evaporación directa del suelo, efecto más marcado en las últimas etapas del cultivo. Godoy *et al.* (2005) compararon el riego por goteo subterráneo con 6 laterales por cada línea de árboles contra riego por gravedad (inundación) en un cultivo de nogal pecanero, en Matamoros, Coahuila (México), y encontraron que se ahorra 30.6% del volumen de agua aplicado con el sistema subterráneo. Un factor fundamental al comparar los sistemas de riego superficiales contra el sistema de riego subterráneo es la distribución del agua en el perfil de suelo, en la presente investigación se demostró que con los sistemas superficiales la mayor cantidad de agua se deposita en los primeros 10 cm, mientras que en el RSD la mayor concentración de agua ocurre en la fracción de 10 a 30 cm de profundidad (Figs. 25 y 26). Al analizar la distribución del agua por capas se puede explicar la diferencia de evaporación que existe entre los sistemas superficiales y el sistema

de aporte subterráneo, toda vez que en el subterráneo el agua se expone menos a los elementos del clima, al encontrarse de cierta forma, resguardada de los efectos evaporativos de la radiación solar. La ubicación y tamaño del bulbo húmedo del RSD es diferente a los sistemas superficiales, en este sentido, su tamaño es mayor en virtud de que el movimiento del agua en el suelo es radial, lo cual produce como resultado un bulbo de mayor volumen pero con menor contenido de humedad con la misma cantidad de agua, de tal forma que en el suelo se consigue un mejor equilibrio entre agua y oxígeno para el sistema radicular del cultivo.

Durante el periodo del experimento se monitoreo la temperatura del suelo y se puede decir que es un indicador importante del contenido de humedad en el suelo y de la cantidad de agua que el suelo entrega a la atmosfera. En un viñedo de 12 ha irrigado con riego por goteo superficial, Kerridge *et al.* (2013) compararon la temperatura de la superficie del suelo entre hileras (suelo seco) y dentro de hileras de plantas (suelo húmedo) por medio de un método para estimar la evaporación del suelo. Dicho método se basa en una función lineal del cambio de temperatura de la superficie del suelo; concluyeron que el monitoreo de la temperatura de la superficie del suelo es un método promisorio para estimar la evaporación directa del suelo, mediante el uso de sensores permanentes distribuidos en el cultivo para el registro sistemático de datos diarios.

## 8.2 Discusión.- Segundo experimento

En el segundo experimento, el rendimiento obtenido fue equivalente a 5.17  $\text{tm}\cdot\text{ha}^{-1}$  para RSD, 2.76 para RGC y 2.01 para RLZ, cosechado de árboles con solamente un año de establecimiento, lo cual es aceptable y promisorio, principalmente para el sistema RSD, al comparar su rendimiento con datos de SIAP, SAGARPA (2016), donde se reporta que la media nacional en México para

higo fresco en 2016 fue de  $5.29 \text{ tm}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a partir de información registrada de huertas en producción plena, con árboles de más de tres años de edad. Melgarejo (2000) en su libro “Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas” reporta cosecha para higueras hasta el tercer año de establecidas con un rendimiento de 1 a 2 Kg por árbol. Al considerar el marco de plantación del presente experimento, dicha estimación es equivalente a un rendimiento de  $1.4$  a  $2.8 \text{ tm}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; en el presente experimento fue superado este promedio con plantas que tenían un año de establecidas al iniciar la producción. Existen rendimientos mayores reportados por investigadores, sobre todo en plantaciones con más tiempo de establecidas; en este sentido, Pereira *et al.* (2017) en una plantación de 10 años ubicada en Extremadura España, reportan rendimiento de  $26 \text{ tm}\cdot\text{ha}^{-1}$  para la variedad Cuello de Dama Blanco, la cual es similar a White Kadota. Los rendimientos más altos se consiguen en plantaciones de higuera en invernadero y en condiciones de hidroponía (Melgarejo *et al.*, 2007) reportó producción de  $81 \text{ tm}\cdot\text{ha}^{-1}$ , este sistema de producción aún se encuentra a nivel experimental

En relación al volumen de agua consumido por los sistemas de riego durante el ciclo analizado, al expresarlo en porcentaje de ahorro y para comparar el sistema subterráneo con los sistemas de aporte superficial, se estimó un ahorro del 13.7% al comparar RSD con RGC y de 9.7% al compararlo con RLZ.

Al respecto, Montemayor *et al.* (2006) usaron maíz forrajero para comparar riego por goteo superficial y subterráneo, y encontraron que el riego subterráneo da un ahorro de 27.4 %. Este resultado es superior al encontrado en el presente experimento. Godoy *et al.* (2005) compararon el riego por goteo subterráneo con 6 laterales por cada línea de árboles contra riego por gravedad (inundación) en nogal pacanero, en Matamoros, Coahuila, y reportan 30.6% de ahorro del volumen de agua al comparar los dos sistemas a favor del riego por goteo subterráneo.

Otra investigación de Montemayor *et al.* (2012) al comprar tres sistemas, riego por gravedad, pivote central y riego por goteo subterráneo, encontraron que el ahorro,

al comparar riego por gravedad con pivote central es de 26% y de 37% al comparar riego por gravedad contra riego subterráneo. Según las investigaciones reportadas, el sistema de riego por goteo subterráneo genera ahorros que oscilan de 27 al 37%. En la presente investigación la diferencia fue de 13.7% al comparar RSD contra RLZ y de 9.7% al comparar RSD contra RGC, en ambos casos a favor de RSD. La diferencia en el consumo de agua no fue tan marcada al comparar los sistemas entre sí, aunque los árboles en el tratamiento con riego subterráneo fueron más vigorosos y productivos. Sin embargo, al comparar RSD con RGC, se estima un ahorro de 1 m<sup>3</sup> por cada kg producido, en tanto que para la otra comparación, RSD con RLZ, se ahorra un volumen de 1.6 m<sup>3</sup> por cada kg de fruto cosechado.

#### Observaciones sobre la ocurrencia de plagas y enfermedades

Cabe hacer notar, que algunas de las variaciones morfométricas y fisiológicas observadas obedecen a que durante el experimento se detectó presencia de nemátodos que afectaron parcialmente el sistema radicular de la higuera, detectándose en menor intensidad en el sistema de RSD. Lo anterior se controló con el uso de productos biológicos, a base de hongos enemigos naturales de nematodos. Dicha incidencia en la sanidad de la higuera amerita mayor investigación enfocada al manejo del cultivo con presencia de nematodos, en el diseño de estrategias de manejo integrado de plagas (MIP).

## 9. CONCLUSIONES

### 9.1 Conclusiones.- Primer experimento

Se observaron diferencias significativas entre las pérdidas por evaporación en suelo desnudo al comparar el sistema RSD contra los dos sistemas de riego superficiales, RLZ y RGC, en las profundidades de 0 a 5 y 5 a 10 cm. Al comparar los tres sistemas de riego, la evaporación del riego subterráneo por difusores fue la de menor magnitud. La diferencia entre RSD y RLZ fue de 30% en el experimento de 2015 y de 41% en el experimento de 2016. La diferencia entre RSD y RGC fue de 44%, similar en 2015 y 2016, lo cual expresa una diferencia considerable en la pérdida de agua por evaporación de suelo desnudo entre el RSD y los sistemas superficiales. En relación a la temperatura, se aprecia que la mayor diferencia existe en las profundidades de 0 a 5 y de 5 a 10 cm en los sistemas superficiales comparados con el RSD, lo cual confirma los resultados obtenidos, ya que al ocurrir mayor evaporación existe mayor influencia en el cambio de temperatura. De acuerdo con Safi *et al.* (2007), el riego subterráneo ha llamado fuertemente la atención, principalmente debido a su baja tasa de evaporación, la uniformidad de las aplicaciones de agua y su estabilidad, sin embargo, sigue siendo un tema de controversia y análisis metodológico, por lo que amerita investigaciones más detalladas y con estudios de caso. Al respecto, los resultados alcanzados sugieren una clara ventaja de los sistemas de riego subterráneo al compararlos con sistemas de riego por goteo convencionales, en la conservación del agua en sistemas agrícolas de zonas áridas.

### 9.2 Conclusiones.- Segundo experimento

Al comparar los distintos sistemas de riego en relación a las variables ecofisiológicas, solo se encontró diferencia significativa para potencial hídrico y en una fecha para clorofila total. Se encontró diferencia altamente significativa en la variable potencial mátrico, donde se mostró que el sistema RSD contenía menor cantidad de agua en el suelo y el potencial hídrico indica menor cantidad de agua

en la hoja; en ambas variables el sistema RSD fue inferior a los sistemas RGC y RLZ. Los resultados alcanzados muestran que dichas diferencias observadas en las variables indicadoras de estrés no afectan el rendimiento. Se concluye que la diferencia en el potencial mátrico obedece a que en el sistema RSD se mantiene la superficie del suelo seca. Por otro lado, la diferencia significativa para clorofila total en mayo de 2016 no tuvo influencia en el rendimiento ni en las variables morfométricas.

Las diferencias relevantes se encontraron al comparar la respuesta del cultivo a los diferentes sistemas de riego en las variables rendimiento, longitud de tallos productores, longitud de hoja y consumo de agua. Las variables longitud de tallo y longitud de hoja están directamente relacionadas con el rendimiento, ya que la higuera produce a partir de madera nueva, en este sentido, al tener más longitud de tallos productores mayor será el número de siconos y por ende el rendimiento. La longitud de hoja también tiene efectos en el rendimiento; dicha variable registrada en mayo para el tratamiento RGC, fue superior a la registrada en RSD, cuando la diferencia en promedio fue de 1.1 cm. Sin embargo, para noviembre el tratamiento RSD fue superior, reflejando mayor longitud de hoja con una diferencia más notoria, en promedio de 2.3 cm, con respecto al RGC. Lo anterior conlleva una ventaja, en virtud de que una mayor área foliar representa mayor captación de energía, con influencia directa en el rendimiento, el cual fue de 5,170 kg·ha<sup>-1</sup> para RSD, de 2,746 para RGC y de 2,011 para RLZ, considerando una densidad de 1,400 plantas por ha. El consumo de agua en m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> fue de 5,178 para RGC, de 4,949 para RLZ y de 4,467 para RSD, lo cual representa un ahorro de 13.7% al comparar RSD con RGC y de 9.7% al comparar RSD con RLZ; en relación a la productividad del agua, se obtuvo un Kg de higo fresco con: 0.86 m<sup>3</sup> en RSD, 1.88 m<sup>3</sup> en RGC y 2.46 m<sup>3</sup> en RLZ. Al considerar las variables analizadas, el sistema de riego RSD ofrece claras ventajas comparado con RGC y RLZ, en relación a la productividad del agua en el cultivo de higuera.

## 10. LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 298 p.
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.* 24:1-15.
- Ayars, J. E., A. Fulton, B. Taylor. 2015. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay?. *Agric. Water Manag.* 157:39-47.
- Ayars, J. E., C. J. Phene, R. B. Hutmacher, K. R. Davis, R. A. Schoneman, S. S. Vail, R. M. Mead. 1999. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric. Water Manag.* 42:1-27.
- Barolo, M. I., Nathalie Ruiz Mostacero, Silvia N. López. 2010. *Ficus carica* L. (Moraceae): An ancient source of food and health. *Food Chem.* 164:119-127.
- Bernardi, B., G. Falcone, T. Stillitano, S. Benalia, A. Strano, J. Bacenetti, A. Irene De Luca. 2018. Harvesting system sustainability in Mediterranean olive cultivation. *Sci. Total Environ.* 625:1446-1458.
- Boudchicha, R. H., J. I. Hormaza, H. Benbouza. 2018. Diversity analysis and genetic relationships among local Algerian fig cultivars (*Ficus carica* L.) using SSR markers. *S. Afr. J. Bot.* 116:207-215.
- Box, G. E. P., W. G. H. Hunter, J. S. Hunter. 1978. *Statistics For Experimenters*. John Wiley And Sons. First Edition. New York. USA. 653 p.
- Bozkurt, C. Y., A. Yazar, İ. Colak, H. Akca, G. Duraktekin. 2015. Evaluation of Crop Water Stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems. *Agric. Agric. Sci. Procedia*, 4: 372-382.
- Bryla, D. R., T. J. Trout, J. E. Ayars, R. S. Johnson. 2003. Growth and production of young peach trees irrigated by furrow. microjet. surface drip. or subsurface drip systems. *Hortscience.* 38(6): 1112-1116.
- Caliskan, O., S. Bayazit, M. Ilgin, N. Karatas. 2017. Morphological diversity of caprifig (*Ficus carica* var. *caprificus*) accessions in the eastern Mediterranean region of Turkey: Potential utility for caprification. *Sci. Hortic.* 222:46-56.
- Comisión Nacional del Agua. 2011. Estadísticas del agua en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. D.F. 185p.
- CONAGUA. 2011. Estadísticas del agua en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 185p.
- Dell'Amico, J., A. Moriana, M. Corell, I. F. Girón, D. Morales, A. Torrecillas, F. Moreno. 2012. Low water stress conditions in table olive trees (*Olea europaea* L.)



during pit hardening produced a different response of fruit and leaf water relations. *Agric. Water Manag.* 114:11-17.

Di Vaio, C., N. Marallo, G. Marino, T. Caruso. 2013. Effect of water stress on dry matter accumulation and partitioning in pot-grown olive trees (cv Leccino and Racioppella). *Sci. Hortic.* 164:155-159,

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Segunda Sección. 31 de diciembre de 2002. México, D.F.

Dos Santos, L. N. S., E. E. Matura, I. Z. Goncalves, E. A. A. Barbosa, A. A. Nazário, N. F. Tuta, M. C. L. Elaiuy, D. R. C. Feitosa, A. C. M. De Sousa. 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agric. Water Manag.* 170:91-98.

Essid, A., F. Aljane, A. Ferchichi. 2017. Morphological characterization and pollen evaluation of some Tunisian ex situ planted caprifig (*Ficus carica* L.) ecotypes. *S. Afr. J. Bot.* 111:134-143.

FAO (Food And Agriculture Organization of The United Nations). 2007. Information System on Water and Agriculture - Aquastat. 263 p.

FAOSTAT. 2018. FAO Database. <http://www.fao.org/faostat/es/#data>. (Consulta: Mayo de 2018).

Flores, A. 1990. La higuera frutal mediterráneo para climas cálidos. Ediciones Mundi-Prensa. Primera Edición. Madrid España. 190p.

Flores-Gallardo, H., A. Castillo-Rosales, S. Santana-Espinoza, R. Jiménez-Ocampo, P. A. Domínguez-Martínez. 2017. Recomendaciones para la producción de grano y forraje de maíz bajo riego en Durango. INIFAP. Folleto Técnico No. 96. 32 p. Durango, México.

Gallego, M. C., R. Angulo, S. Serrano, M. Jodral. 1996. Estudio espacio-temporal del consumo de higos. *Cienc. Tecnol. Aliment.* 1(3):43-48.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta edición. México. D.F. 91 pp.

Ghamarnia, H., S. Sepehri. 2010. Different irrigation regimes affect water use, yield and other yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) crop in a semi-arid region of Iran. *J. Food Agric. Environ.* 8 (2): 590-593

Glavan, M., V. Milicic, M. Pintar. 2013. Finding options to improve catchment water quality—Lessons learned from historical land use situations in a Mediterranean catchment in Slovenia. *Ecol. Model.* 262:58-73.

Godoy-Avila, C., I. Reyes-Juarez. C. A. Torres-Estrada. 2005. Riego por goteo subsuperficial en nogal pecanero (*Carya illinoensis* K.) con diferente número de laterales de riego. *Agric. Téc. Méx.* 31:203-212.

- Hammer, Ø., D. A. T. Harper, and P. D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9pp. [http:// palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm).
- Irget, M. E., U. Aksoy, B. Okur, A. R. Ongun, M. Tepecik. 2008. Effect of calcium based fertilization on dried fig (*Ficus carica* L. cv. Sarılop) yield and quality. *Sci. Hortic.* 118(4):308-313.
- Kerridge, B. L., J. W. Hornbuckle, E. W. Christen, R. D. Faulkner. 2013. Using soil surface temperature to assess soil evaporation in a drip irrigated vineyard. *Agric. Water Manag.* 116:128-141.
- Khadiji, A., R. Anjam, K. Anjam. 2018. Morphological and pomological characterization of edible fig (*Ficus carica* L.) to select the superior trees. *Sci. Hortic.* 283:66-74.
- Kislev, M. E., A. Hartmann, O. Bar-Yosef. 2006. Early domesticated fig in the Jordan Valley. *Sci.* 312:1372-1374
- Lamm, F. R., C. R. Camp. 2007. Subsurface drip irrigation. *Dev. Agric. Eng.* 13:473-551.
- Lavín, A. A., K. Matsuya. 2004. Frutales: Especies con potencial en el secano interior. Chillán. Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA 120: 81-95.
- Lewis, D.W. 1984. *Practical Sedimentology*. Edit. Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, USA. 217 p.
- Liu, J., X. Zuo, Z. Qian, Q. Zhou, J. Guo, Y. Sun, X. Zhang, Y. Guo, Y. Qian. 2014. Application of irrigation technology in agricultural production. *Agric. Sci. Technol.* 15(8): 1417-1421.
- Mamoucha, S., N. Fokialakis, N. S. Christodoulakis. 2016. Leaf structure and histochemistry of *Ficus carica* (Moraceae), the fig tree. *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants.* 218:24-34.
- Melgarejo, P. 2000. *Tratado de fruticultura para zonas áridas y semiáridas*. Ediciones Mundi-Prensa. Primera Edición. Madrid España. 382p.
- Melgarejo, P., J. J. Martínez, F. Hernández, D. M. Salazar, R. Martínez. 2007. Preliminary results on fig soil-less cultura. *Sci. Hortic.* 111: 255–259.
- Meshkat, M., R. C. Warner, S. R. Workman. 2000. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation. *Soil Water Div.* 43(1):79-86.
- Molden, D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. A. Hanjra, J. Kijne. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agric. Water Manag.* 97:528–535.

- Montaña, C., M. Carot, B. Martines-Alcantara, E. Primo-Millo, F. Legaz. 2005. Riego deficitario en goteo superficial y subterráneo. *Vida Rural*. 210:40-44
- Montemayor, T. J. A., M. A. O. Gómez, R. J. Olague, G. A. Zermeño, C. E. Ruiz, M. H. Fortis, S. E. Salazar, N. R. Aldaco. 2006. Efecto de tres profundidades de cinta de riego por goteo en la eficiencia de uso de agua y en el rendimiento de maíz forrajero. *Téc. Pecu. Méx.* 44: 359-364.
- Montemayor, T. J. A., M. J. L. Lara, R. J. L. Woo. L. J. Munguía. G. M. Rivera, C. R. Trucíos. 2012. Forage maize (*Zea mays* L.) production in three irrigation systems in the Comarca Lagunera of Coahuila and Durango. México. *Agrociencia*. 46:267-278.
- Morton, J. 1987. *Fruits of warm climates*. Miami, FL, UASA. 47–50pp.
- Nagaraju, Y., B. T. Sreenivas. 2003. Sustainable use of groundwater resource in Dry Agroclimatic Condition: Economics of groundwater Irrigation in Fig and Pomegranate Crops in Karnataka. *Indian J. Agric. Econ. Bombay*. 58(3): 491-492.
- Okubo, M., N. Utsunomiya. 1996. Effects of Sodium Chloride on Growth, Gas Exchange and Ion Concentration in Latex of Fig (*Ficus carica* L.). *Environ. Control in Biol.*, 34 (4):259-265.
- Ortiz-Villanueva, B., C. A. Ortiz-Solorio. 1990. *Edafología*. Edit. Universidad Autónoma Chapingo. 7ª Edición. Texcoco, Estado de México. México. 394 p.
- Parra-Quezada, R. A., P. Ortiz-Franco, J. P. Amado-Álvarez, N. Chávez-Sánchez. 2009. Productividad y crecimiento de manzano bajo déficit de riego controlado. *Terra Latinoam*. 27: 337-343.
- Pastor, M., J. Hidalgo, J. C. Hidalgo, V. Vega. 2006. Riego por goteo subterráneo y su aplicación al cultivo del olivar. *Vida rural*. 238:38-47
- Payero, J.O., C. D. Yonts, S. S. Irmak, D. Tarkalson. 2005. Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation. Division of Agriculture and Natural Resources *UNL*. Lincoln, Nebraska. USA. 8p.
- Pereira, C., M. J. Serradilla, A. Martín, M. C. Villalobos, F. Pérez-Gragera, M. López-Corrales. 2015. Agronomic behaviour and quality of six fig cultivars for fresh consumption. *Sci. Hortic*. 185:121–128.
- Pereira, C., M. J. Serradilla, F. Pérez-Gragera, A. Martín, M. C. Villalobos, M. López-Corrales. 2017. Evaluation of agronomic and fruit quality traits of fig tree varieties (*Ficus carica* L.) grown in Mediterranean conditions. *INIA*. 15(3):1-9.
- Podgornik, M., I. Vuk, I. Vrhovnik, D. Bandelj-Mavsar. 2010. A survey and morphological evaluation of fig (*Ficus carica* L.) genetic resources from Slovenia. *Sci. Hortic*. 125(3):380:389.
- Safi, B., M. R. Neyshabouri, A. H. Nazemi, S. Massiha, S. M. Mirlatifi. 2007. Water application uniformity of a subsurface drip irrigation system at various operating pressures and tape lengths. *Turk. J. Agric. For.* 31 (2007): 275-285.

- Salomón-Torres, R., N. Ortiz-Uribe, R. Villa Angulo. 2017. La producción de la palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.) en México. 2017. *Nueva Época*. 91:15-20.
- Santos, T.P., C. M. Lopes, M. L. Rodrigues, C. R. Souza, J. M. Ricardo-da-Silva, J. P. Maroco, J. S. Pereira, M. M. Chaves. 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Sci. Horticult.* 112: 321–330.
- Selim, T., F. Bouksila, R. Berndtsson, M. Persson. 2013. Soil water and salinity distribution under different treatments of drip irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77(4):1144-1156.
- SIAP, SAGARPA. 2016. <http://www.siap.gob.mx/index>. (Consulta: abril 2018).
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2016. Normales Climatológicas – Baja California Sur. S.M.N. [http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=162&tmpl=component](http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=162&tmpl=component). (Consulta: Diciembre 2016).
- Suleman, N., R. J. Quinell, S. G. Compton. 2014. Floral ratios in the figs of *Ficus montana* span the range from actively to passively pollinated fig trees. *Acta Oecol.* 57:67-72.
- Thompson, T.L., P. Huan-cheng, L. Yu-yi. 2009. The Potential Contribution of Subsurface Drip Irrigation to Water-Saving Agriculture in the Western USA. *Agric. Sci. China.* 8(7):850-854.
- Villalobos, M. C., M. J. Serradilla, A. Martín, S. Ruiz-Moyano, C. Pereira, M. G. Córdoba. 2014. Use of equilibrium modified atmosphere packaging for preservation of ‘San Antonio’ and ‘Banane’ breba crops (*Ficus carica* L.). *Postharvest Biol. Technol.* 98:14–22.
- Walkley, A., I. A. Black. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-37.
- Wang, Y., M. G. Bertelsen, K. K. Petersen, M. N. Andersen, F. Liu. 2014. Effect of root pruning and irrigation regimes on leaf water relations and xylem ABA and ionic concentrations in pear trees. *Agric. Water Manag.* 135:84–89.
- Zhang, Q., S. Wang, L. Li, M. Inoue, J. Xiang, G. Qiu, W. Jin. 2014. Effects of mulching and sub-surface irrigation on vine growth, Berrysugar content and water use of grapevines. *Agric. Water Manag.* 143:1–8.