



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

INGENIERÍA AGRÍCOLA

**El riego deficitario controlado en pimiento morrón
(*Capsicum annum* L. var. *annum*)**

TESIS

QUE PRESENTA:

JESÚS HERIBERTO SEVERIANO LEÓN

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

ASESOR: Dra. GLORIA MARIA SOLARES DIAZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, JUNIO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE



ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

El riego deficitario controlado en pimiento morrón (Capsicum annum L. var. Annum)

Que presenta el pasante: JESÚS HERIBERTO SEVERIANO LEÓN

Con número de cuenta: 41411129-7 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería Agrícola

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 08 de mayo de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Mtro. Vicente Silva Carrillo	
VOCAL	Dra. Gloria María Solares Díaz	
SECRETARIO	M. en C. Ana María Martínez García	
1er. SUPLENTE	Ing. Gustavo Mendoza Rivera	
2do. SUPLENTE	Dr. Homero Alonso Sanchez	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

Agradecimiento

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán y específicamente a la carrera de Ingeniería Agrícola por formarme como profesionista

A mis padres Heriberto Severiano Arellano y Bernardina León Rodríguez por su apoyo incondicional.

A los profesores M. en C. Ana María Martínez, M. en C. Laura Virginia Nuñez Balderas, M. en C. Juan Roberto Guerrero Agama e I.A. Gustavo Mendoza Rivera por su consejos y apoyo para la realización de este trabajo.

Al jurado calificador: Mtro. Vicente Silva Carrillo, Dra. Gloria María Solares Díaz, M. en C. Ana María Martínez García, I.A. Gustavo Mendoza Rivera y Dr. Homero Alonso Sanchez por sus apreciables observaciones y correcciones.

A los estudiantes Marlon Daniel Bonilla y Oscar Yael Gamiño por su disposición y ayuda para colaborar con las actividades que implicó esta tesis.

En especial quiero agradecer a la Dra. Gloria María Solares Díaz por su arduo trabajo, guía y consejo. Gracias por tantas facilidades, por confiar y apoyar mis ideas e inquietudes.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a mis padres Heriberto Severiano Arellano y Bernardina León Rodríguez, porque esto es la representación de veintitrés años de esfuerzo, gracias por ser la parte fundamental de mi desarrollo personal y profesional, sólo con sus consejos y apoyos pude llegar a donde estoy.

A mis hermanos José Heriberto Severiano León y Verónica Severiano León sé que juntos lograremos alcanzar grandes cosas.

A mi abuela Concepción Arellano Juárez a mis tías Ana Berta Rosales y Adriana Rosales y a sus esposos porque durante los años de carrera sin objeción me brindaron sustento.

A mis primos Mari, Marcos, Anayeli, Andrea, Adrián, Abril y Alan, sigan creciendo y alcanzando sus sueños.

Y a ti Cinthya Nayeli Rosas Silva te agradezco el que nunca me hayas dejado solo y estés aún en los momentos difíciles, gracias por ser el ala que me hace falta para volar y ayudarme a crecer mientras lo haces tú también

Índice general

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	4
2.1 Importancia económica y alimentaria del pimiento morrón	4
2.1.1 Internacional.....	4
2.1.1.1 Superficie y producción.....	4
2.1.1.2 Exportaciones e importaciones.....	6
2.1.1.3 Consumo y precio.....	7
2.1.2 Nacional.....	7
2.1.2.1 Superficie y producción.....	7
2.1.2.2 Exportaciones e importaciones.....	9
2.1.2.3 Precio y consumo.....	10
2.2 Características botánicas.....	11
2.2.1 Taxonomía y origen.....	12
2.3 Requerimientos edafoclimáticos.....	14
2.3.1 Temperatura.....	14
2.3.2 Humedad relativa.....	15
2.3.3 Luz.....	16
2.3.4 Fotoperiodo.....	16
2.3.5 Suelo.....	16
2.3.6 Características respecto al cambio climático.....	17
2.4 Fenología.....	17
2.5 El riego en pimiento morrón.....	18
2.5.1 Balance hídrico.....	21
2.5.2 Indicadores de la condición hídrica.....	21
2.5.3 Fracción de Abatimiento Máximo Permisible (FAM)	24
2.5.4 Estrategias de Riego Deficitario (RD)	25
2.5.4.1 Riego Deficitario Controlado (RDC)	25
2.5.4.1.1 Riego Deficitario Controlado (RDC) en pimiento morrón.....	25
2.6 Respuesta de las plantas al estrés hídrico.....	27

2.6.1 Respuesta del pimiento al déficit hídrico.....	32
III. OBJETIVOS.....	34
3.1 Objetivo general.....	34
3.2 Objetivos particulares.....	34
3.3 Hipótesis.....	34
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
4.1 Ubicación.....	35
4.2 Material vegetal.....	36
4.3 Parámetros edafológicos y climáticos.....	36
4.4 Manejo del cultivo.....	38
4.4.1 Sistema de riego.....	39
4.5 Fenología y componentes del rendimiento.....	39
4.6 Tratamientos y análisis estadístico.....	40
V. RESULTADOS.....	43
5.1 Parámetros climáticos y edáficos.....	43
5.1.1 Temperatura y Humedad Relativa (HR)	43
5.1.2 Evapotranspiración potencial (ET _o) y del cultivo (ET _c)	44
5.1.3 Humedad del suelo.....	46
5.2 Fenología.....	48
5.3 Altura.....	48
5.4 Número de bifurcaciones (NB)	50
5.5 Número de Flores Abiertas (FA) y Caídas (FC)	51
5.6 Rendimiento y calidad de frutos.....	53
5.7 Raíz.....	58
5.8 Eficiencia de utilización del agua (EUAg)	58
VI. DISCUSIÓN.....	60
VII. CONCLUSIONES.....	71
VIII. REFERENCIAS.....	72

Índice de figuras

- Figura 1. Superficie sembrada y producción de chiles, pimientos picantes y pimientos verdes. **5**
- Figura 2. Producción de chile verde en México de 2006 a 2017. **8**
- Figura 3. Exportaciones e importaciones de México de 2007 a 2016. **10**
- Figura 4. Valores de Kc para cultivo de pimiento morrón. **20**
- Figura 5. Temperatura y humedad relativa semanal en macro túnel durante el desarrollo de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos. **44**
- Figura 6. Tendencia de la humedad del suelo de un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **47**
- Figura 7. Evolución de la altura de plantas de un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **50**
- Figura 8. Número de bifurcaciones en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **51**
- Figura 9. Número de flores abiertas en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **52**
- Figura 10. Número de flores caídas en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **53**
- Figura 11. Número de frutos en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. **54**
- Figura 12. Frutos de pimiento morrón en un cultivo con diferentes regímenes hídricos. **57**

Índice de tablas

- Tabla 1. Producción promedio de pimiento verde (2004-2009) y de chiles, pimientos picantes y verdes (1994-2016) de los principales países. **6**
- Tabla 2. Producción de chile verde por estado en México para el 2004 y el 2016 y tasa de variación. **9**
- Tabla 3. Características morfológicas de las especies domesticadas del género Capsicum. **13**
- Tabla 4. Taxonomía del pimiento morrón. **14**
- Tabla 5. Tiempo de germinación (en días) de la semilla de chile de acuerdo a la temperatura del sustrato expresada en grados centígrados (°C). **18**
- Tabla 6. Fertilizantes utilizados y cantidades para 450 litros de agua. **39**
- Tabla 7. Evapotranspiración potencial (ET_o), Evapotranspiración potencial acumulada (ET_o ac), evapotranspiración del cultivo para pimiento morrón (ET_c) y evapotranspiración del cultivo para pimiento morrón (ET_c ac) por el método de Hargreaves para el periodo 21 septiembre – 15 de febrero (2017 - 2018). **45**
- Tabla 8. Lámina total aplicada y lámina promedio diaria de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos. **48**
- Tabla 9. Altura de plantas de pimiento morrón al inicio y al final del ciclo productivo bajo diferentes regímenes hídricos. **49**

Tabla 10. Número de frutos (NF), frutos cuajados (FCu), peso de fruto (PF), coeficiente de correlación (CoC) entre el NF y el PF, rendimiento por Planta (RP), rendimiento por hectárea (RHa), diámetro ecuatorial (DE) y diámetro polar (DP) de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos. **55**

Tabla 11. Porcentaje de frutos dentro de la categoría México calidad suprema (MCS) y dentro de las categorías Fancy (USF), No. 1 (US1) y No. 2 (US2) del United States Standards for Grades of Sweet Pepper del United States Department of Agriculture (USDA). **56**

Tabla 12. Porcentaje de frutos deformes (FD), frutos multicarpicos (FM) y frutos con *Blossom* (FB) por tratamiento en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes hídricos. **58**

Tabla 13. Longitud final de raíz (LR) en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes hídricos. **58**

Tabla 14. Eficiencia de utilización de agua en un cultivo de pimiento sometido a diferentes regímenes hídricos. **59**

I. RESUMEN

La población mundial se enfrenta a una situación hídrica compleja y desfavorable que experimenta una tendencia preocupante marcada por factores como: el aumento en la población, cambio en los patrones de consumo, contaminación (UNESCO, 2018) y cambio climático (IPCC, 2014). En datos, se prevé que la demanda hídrica de 4 600 Km³año⁻¹ aumente entre un 20% y un 30%, para el 2050 (Burek *et al.*, 2016) y que el número de personas que en 2010 (1 900 millones, 27% de la población mundial) vivían en áreas con potencial para la escasez severa de agua, aumentará hasta 2 700 y 3 200 millones en 2050 (Unesco, 2018).

A nivel nacional las perspectivas no difieren demasiado e indicadores como la disponibilidad natural media *per cápita* de agua que en 1950 era de 18 035 m³hab⁻¹año⁻¹ y en 2013 se redujo a 3 982 m³hab⁻¹año⁻¹ (cifra calificada como baja por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo) y el número de acuíferos sobreexplotados que creció 500% de 1975 al 2013, nos dan prueba de ello (SEMARNAT, 2014).

Para revertir esta tendencia se han desarrollado planes y estrategias como el Objetivo 6 de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible o las Soluciones Basadas en la Naturaleza (promovida por la UNESCO) a nivel mundial y como el Programa Nacional Hídrico que era parte del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 a escala nacional. Estos planes consideran prioritario el sector agrícola, por razones entre las que destacan: la fracción de agua dulce usada por este sector, que representa alrededor del 70% de total usado a nivel mundial y que se estima puede aumentar entre 23% y 42% si se mantienen las condiciones actuales de los sistemas de irrigación (FAO, 2011) o de 5.5% a disminuir si se mejora su eficiencia (OCDE, 2012), citado por UNESCO (2018); la contaminación por herbicidas, pesticidas y fertilizantes de los cuerpos de agua dulce (FAO, 1994) y su relación con la soberanía alimentaria (UNESCO, 2018).

Sin embargo, a pesar de la prioridad de este sector, su situación actual es poco favorable, con índices altos de riesgo en la rentabilidad, limitada capacidad de negociación de productores (Escalante y Catalán, 2008), degradación de suelos, cambios en los patrones de precipitación, aumento y disminución de temperatura, etc. Por lo que es importante

desarrollar y evaluar estrategias de manejo de cultivo que tengan como objetivo mejorar la eficiencia hídrica en los sistemas agrícolas sin dejar de lado la mejora en la productividad y rentabilidad.

Una estrategia que resulta prometedora bajo estos supuestos es el Riego Deficitario Controlado (RDC) o Déficit Hídrico Controlado (DHC) que consiste en reducir o suspender la aplicación de agua de riego durante etapas fenológicas poco sensibles al estrés hídrico (Contreras, 2007), dicha estrategia se ha utilizado en Pera (Día *et al.*, 2016), ciruela (Parra *et al.*, 2009), durazno y algunas hortalizas como tomate y brócoli (Villalobos *et al.*, 2005) con resultados prometedores. Sin embargo, se carece de información respecto a su viabilidad en la mayoría de los cultivos de importancia económica.

En México, el chile no sólo es importante por su relevancia económica, aunque nuestro país es el segundo productor a nivel mundial y el primer exportador según datos del FAOSTAT (2018), sino que sobresale su significado dentro de la cultura nacional y su uso como una pieza clave de la gastronomía mexicana. El pimiento morrón es una variedad de la especie *Capsicum annum* L. que se ubica como el cuarto tipo de chile en importancia en el país (SAGARPA, 2010) y es considerado uno de los cultivos estratégicos para el desarrollo de agro mexicano (SAGARPA, 2017b).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del RDC en plantas de pimiento morrón var. California Wonder en condiciones de macrotúnel. El estrés hídrico se aplicó a través de permitir una mayor disminución en el agua disponible del suelo, en otras palabras, aumentar el valor de Factor de Máximo de Abatimiento (FMA). Los tratamientos difirieron en el momento de aplicación del estrés, resultando cuatro si se considera el control. El tratamiento 1 no experimento estrés hídrico durante ninguna etapa, a su vez el tratamiento 2 fue sometido a estrés durante todo el ciclo, el tratamiento 3 lo experimento en la fase vegetativa y el tratamiento 4 en la fase reproductiva. Se registraron variables climáticas y morfológicas. Los resultados muestran que el efecto del déficit hídrico sobre el rendimiento y la calidad de frutos en pimiento morrón var. California Wonder depende de la etapa de aplicación. El manejo de estrés hídrico en la etapa vegetativa mejora el rendimiento en 36.46% y calidad de los frutos, mientras que aplicaciones de estrés hídrico durante la etapa reproductiva (T3) mejora el rendimiento en 20.39%, pero disminuye la calidad de los frutos.

El déficit hídrico sostenido (T2) disminuye el rendimiento en 14.6% y la calidad de los frutos. Con el uso de déficit hídrico durante la etapa vegetativa aumenta la productividad del agua, con lo que se consigue un ahorro del 45.24% por cada unidad de materia producida.

II. INTRODUCCIÓN

2.1 Importancia económica y alimentaria del pimiento morrón

Debido a la carencia de datos específicos para pimiento morrón, las estadísticas y datos de comercio mundial mostrados en este trabajo hacen referencia al grupo general de chiles y pimientos a menos que se especifique lo contrario.

2.1.1 Internacional

2.1.1.1 Superficie y producción

La FAO a través de la base de datos denominada FAOSTAT presenta datos de producción del pimiento morrón dentro del grupo llamado “Chiles, pimientos picantes y pimientos verdes”. La superficie sembrada y la producción a nivel mundial de este grupo experimentaron aumentos la mayoría de los años durante el periodo 2006-2016, a razón de 11.28 y 22.59% respectivamente, al pasar de 1 722 000 a 1 939 000 ha y de 26 703 00 a 34 497 000 Mg. Según Botta y Tort (2015), el aumento en la producción está relacionado con una tendencia similar en el consumo, principalmente de países desarrollados.

Las disminuciones en la superficie sembrada durante los años 2007, 2010, 2013 y 2015 no alteraron la tendencia de crecimiento de la producción (Figura 1), además de que la tasa de crecimiento de la producción duplicó la de la superficie, esto por un lado significa cierta independencia de los aumentos de producción respecto a la superficie cosechada y por otro, que los aumentos en la producción están relacionados con mejoras en los sistemas agrícolas.

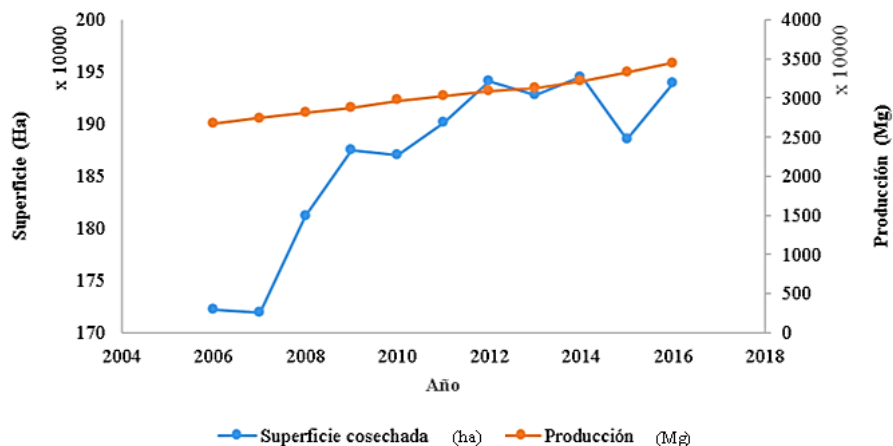


Figura 1. Superficie sembrada y producción de chiles, pimientos picantes y pimientos verdes
Elaboración propia con datos de FAOSTAT (2018).

Flores y Sánchez (2012) presentan datos específicos para pimiento morrón verde citando a la FAO (2010) para el periodo 2004-2009 (Tabla 1); sin embargo, estos datos representan valores similares a los encontrados en la FAOSTAT (2018) para todo el grupo de chiles, pimientos picantes y pimientos verdes para el periodo 1994-2016 por lo que probablemente los primeros autores sobreestimen la producción de pimiento verde. En ambos reportes, los principales países productores fueron, en orden de importancia: China, México, Turquía, Indonesia y España. Aunque en los datos presentados por Flores y Sánchez, México tiene una producción promedio anual menor que Turquía, ocupa el segundo puesto debido a que durante los últimos 3 años del reporte (2006-2009) muestra una producción mayor.

Asía concentra el 64.9% de la producción mundial de chiles, pimientos picantes y pimientos verdes y tan sólo la producción de China representa el 61.45% de la producción total de los principales 10 países productores (FAOSTAT, 2018). Estos porcentajes y la permanencia de China como el principal país productor, están relacionados con: la superficie dedicada a ese cultivo que para el 2014 representó 36.5% de la superficie total mundial (Botta y Tort, 2015), los apoyos gubernamentales para el control de las plagas y enfermedades más importantes y una estrategia de venta con altos volúmenes a bajos precios (Mulderij, 2017).

Tabla 1

Producción promedio de pimiento verde (2004-2009) y de chiles, pimientos picantes y verdes (1994-2016) de los principales países

País	Producción pimiento verde (Mg) (2004-2009)	Producción de Chiles, pimientos picantes y verdes (Mg) (1994-2016)
China	13 402 032	11 869 716
México	1 769 460	1 837 906
Turquía	1 793 930	1 717 952
Indonesia	1 110 750	1 165 313
España	1 045 421	974 858

Elaboración propia con datos de Flores y Sánchez (2012) y FAOSTAT (2018).

A pesar de que China es el mayor productor a nivel mundial, los mayores rendimientos para el 2007 corresponden a Holanda con 262.5 Mg ha⁻¹, muy separado de España, Japón, Hungría y Estados Unidos que son los países que siguen en esta lista con 42.36, 41.89, 28.75 y 28.42 Mg ha⁻¹, respectivamente. Los altos rendimientos en Holanda se derivan de los altos niveles tecnológicos en sus sistemas agrícolas (Botta y Tort, 2015).

2.1.1.2 Exportaciones e importaciones

Para el 2014 España ocupó el primer lugar por su volumen exportado con más de 250 000 Mg, seguido por México (229 000 Mg), Holanda (220 000 Mg) y Estados Unidos (62 000 Mg) (Botta y Tort, 2015). Sin embargo, para el 2017 las posiciones y volúmenes cambiaron y fue México el principal país exportados con 986 miles de Mg, seguido de España (790 300 Mg), Países Bajos (397 600 Mg), India (339 800 Mg) y China (269 400 Mg) (SAGARPA, 2017).

Mientras que España y Holanda dirigen sus exportaciones hacia la Unión Europea, México las orienta hacia Estados Unidos, Canadá (Botta y Tort, 2015) y Guatemala (SAGARPA, 2017). Estados Unidos, dirige sus exportaciones a países latinoamericanos, Europa y Asia. Alemania y Estados Unidos son los dos países con una mayor participación en las importaciones. Estados Unidos paso de acaparar el 46% de las importaciones

mundiales en el 2014 a 45% en el 2017 y en el caso de Alemania del 43% al 15% para los mismos años (Botta y Tort, 2015, SAGARPA, 2017).

2.1.1.3 Consumo y precio

Desde hace algunos años se ha generado una tendencia a cambiar los hábitos de consumo, dirigiéndose hacia productos verdes y frescos porque estos se relacionan con una buena salud, lo que ha beneficiado el consumo de productos como el pimiento morrón (Flores y Sánchez, 2012; Pino, 2018). En Estados Unidos el consumo de esta hortaliza ha crecido de los 3.40 Kg *per capita* en el 2000 a 5.17 en el 2017 (Statista, 2018). Según Pino (2018) es en los sectores con más poder adquisitivo donde se ha experimentado este comportamiento. El aumento del consumo en los sectores con mayor capacidad adquisitiva podría ser uno de los motivos junto con los pocos sustitutos en el mercado, los que expliquen el comportamiento inelástico del consumo del pimiento morrón respecto al precio, es decir que la tendencia de consumo no se vea afectada por la variación en los precios (Galeano *et al.*, 1996 citado por Namesny, 1997). A su vez, este comportamiento sirve para explicar aumentos en el consumo a pesar de aumentos en el precio. Se estima que en Estados Unidos el precio ha pasado de 0.62 en el año 2000 a los 0.95 dólares por Kg en el 2015 (Biswas *et al.*, 2018).

Existe una estrecha relación entre el aumento del consumo de chile con los aumentos en producción; el incremento en el consumo de los países desarrollados está altamente relacionado con los flujos migratorios, ya que es en los países en vías de desarrollo donde el chile es un condimento de uso común (Botta y Tort, 2015).

Se estima que el consumo de chile *per capita* a nivel mundial está entre los 8 y 9 Kg, de los cuales 75% se consume en fresco (González, 2010 citado por Castellón *et al.*, 2012)

2.1.2 Nacional

2.1.2.1 Superficie y producción

México ocupa el segundo puesto como productor mundial de chile (FAOSTAT, 2017). La producción nacional ha experimentado aumentos del 31.1% para el periodo 2007-2017

pasando de 2 260 000 a 3 280 000 Mg (SAGARPA, 2017a) (Figura.2), esta tasa de crecimiento es superior casi en 10 puntos porcentuales a la experimentada a nivel internacional en los mismos años. Considerando lo anterior, el cultivo de chile representa una gran oportunidad de competitividad para el país a nivel internacional, plasmada en la Planeación Agrícola Nacional 2017-2030 donde se le considera como uno de los cultivos con mayor potencial comercial para el país (SAGARPA, 2017b). Según datos de la SAGARPA (2017b), en México existen más de 100 000 000 de hectáreas con potencial para el cultivo de chile.

El cultivo de chile genera el 3.5 % del PIB agrícola nacional (SAGARPA, 2017b) y ocupa el octavo lugar en la lista de cultivos con mayor valor agregado (SAGARPA, 2015).

Específicamente para el pimiento morrón la producción es de 104.4 mil toneladas con un valor de mil 491 millones de pesos y los estados que se destacan en su generación son Guanajuato, Jalisco, Querétaro, Durango y Coahuila (SAGARPA, 2016).

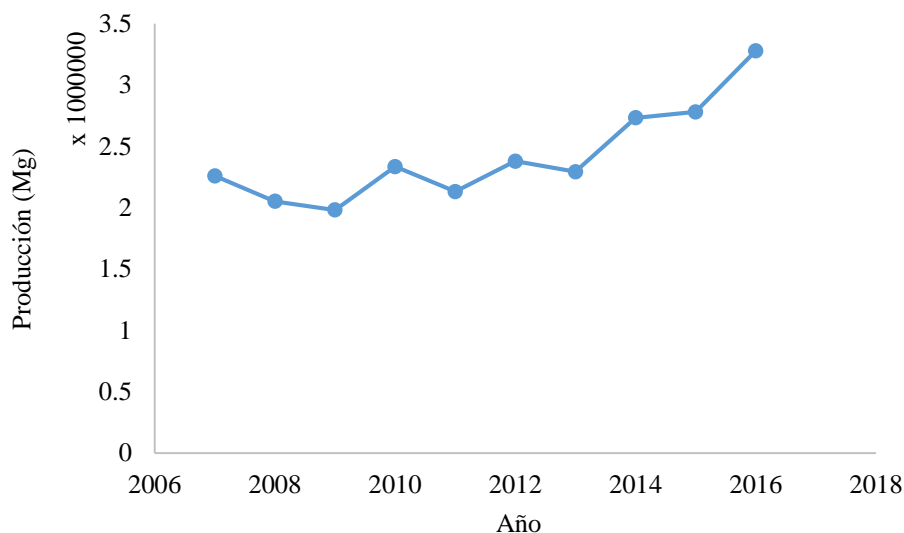


Figura 2. Producción de chile verde en México de 2006 a 2017
Elaboración propia con datos de SAGARPA (2017b)

Dentro del país, los estados con la mayor producción de chile son: Chihuahua, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí y Sonora (Tabla 2). El estado que ha aumentado mayormente su producción dentro de los 9 principales es Sonora, con una tasa de cambio de 356%, muy lejos del 184% de Michoacán que ocupa el segundo lugar. Este aumento está

relacionado con un importante incremento en los rendimientos, pues la superficie cosechada se mantuvo casi sin cambios y el rendimiento paso de 14.96 a 29.33 Mg ha⁻¹ sólo durante el periodo 2004-2010 (SIAP, 2018).

Tabla 2

Producción de chile verde por estado en México para el 2004 y el 2016 y tasa de variación

Estado	Producción (Mg)		Tasa de cambio
	2004	2016	
Chihuahua	450 015.50	991 917	120%
Sinaloa	319 841.30	637 924	99%
Zacatecas	271 247.90	419 323	55%
San Luis Potosí	159 330.25	296 298	86%
Sonora	35 982.00	164 061	356%
Jalisco	77 097.40	130 287	69%
Michoacán	43 420.50	123 403	184%
Guanajuato	45 112.70	101 449	125%

Elaboración propia con datos de SIAP (2018) y SAGARPA (2017b)

2.1.2.2 Exportaciones e importaciones

Para el 2016, México fue el mayor exportador a nivel mundial (FAOSTAT, 2017), en ese mismo año se exportó el 29.71% de la producción total (SAGARPA, 2017b). En la Figura 3 se presenta la tendencia de las importaciones y las exportaciones para el periodo 2007-2016. Como puede verse, las exportaciones se han mantenido en crecimiento todos los años, mientras que las importaciones se han mantenido constantes con excepción del periodo 2012-2015. Según la SAGARPA (2017a), el aumento en las importaciones del periodo 2012-2015 está relacionado con el aumento de las exportaciones para ese año y no a una escasez de chiles.

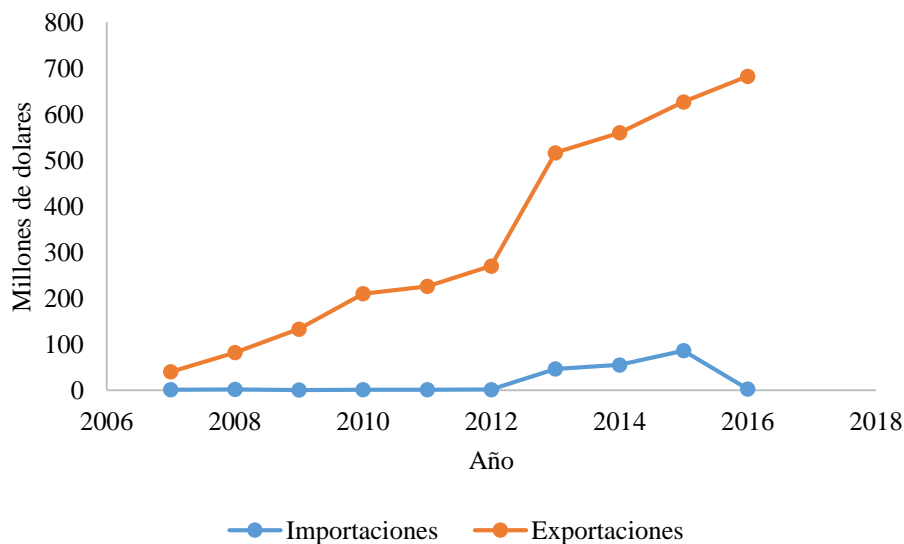


Figura 3. Exportaciones e importaciones de México de 2007 a 2016

Elaboración propia con datos de la SAGARPA (2017a)

En 2009, el producto nacional fue adquirido por 52 países de los cinco continentes. Estados Unidos compró 98.3%, por el cual pagó 705 millones de dólares. Reino Unido, Canadá y Alemania representan en conjunto un punto porcentual de las compras, con volúmenes entre 2 100 y 2 600 Mg. Al relacionar el volumen de producción con el valor de la misma para calcular el precio unitario del producto mexicano, resalta que Japón pagó 6.4 miles de dólares por Mg, seis veces más que países como Canadá, Alemania y Reino Unido. Son proveedores de Chile 41 países. China es el principal con 26 243 Mg (62.6% de las adquisiciones). En el continente americano destacan Perú (10 258 Mg) y Estados Unidos (1 385 Mg). De los siete países que más venden a México, España cobra 2,8 dólares por cada kilo del picante y China la mitad. Entre las variedades que se importan predominan los productos secos con 95,3%. El Chile ancho y Anaheim seco provienen principalmente de Perú. Todo el morrón proviene de Estados Unidos (Botta y Tort, 2015).

2.1.2.3 Precio y consumo

México se encuentra dentro de los países que más consumen Chile; para el 2017, el consumo *per capita* fue de 18.7 kg (SAGARPA, 2017a) y se ha mantenido casi constante fluctuando entre 14 y 18 Kg del 2000 al 2014 (Botta y Tort, 2015), este valor representa casi el doble del consumo mundial para el 2010 (González, 2010 citado por Castellón *et al.*, 2012) En el

2016 sólo con la producción nacional se pudo cubrir el 100% de la demanda interna que ascendió a 2 330 Mg, a razón de esto las importaciones han permitido aumentos en las exportaciones de 32.55% en la última década, principalmente a los Estados Unidos (SAGARPA, 2017b).

El Precio Medio Rural (PMR) pagado depende del estado considerado, de los cinco principales productores (Chihuahua, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí y Sonora) en el 2010, Zacatecas fue el estado con el mejor precio (8 269 pesos por Mg) y Chihuahua consiguió el menor (3 556 pesos por Mg). Durante el periodo que va del 2004 al 2010, el PMR en estos estados no experimentó grandes variaciones, lo más sobresaliente es una contracción del 22% para el estado de Sinaloa y del 10% para el Estado de San Luis Potosí (SIAP, 2018).

2.2 Características botánicas

Las plantas cultivadas de pimiento morrón generalmente son anuales, se consideran herbáceas (Benítez, 2015), pero cuando llegan a cierta edad, los tallos pueden lignificarse resultado una planta semileñosa (Zapata *et al.*, 1992, de Vilmorín, 1980). La altura promedio va de los 70 a 90 cm (Benítez, 2015) aunque puede haber ejemplares de 50 cm (de Vilmorín, 1980) o hasta de 150 cm (Zapata *et al.*, 1992). Los tallos son erectos (Benítez, 2015, Zapata *et al.*, 1992) con ramificaciones vigorosas, dicotómicas y simpódicas (Benítez, 2015, de Vilmorín, 1980).

La raíz es de tipo pivotante que puede medir entre 50 y 120 cm, aunque el 85% se encuentra en los primeros 20 cm (Zapata *et al.*, 1992).

Las hojas son oblongas, lanceoladas o un poco anchas, terminadas en un ápice muy pronunciado (acuminado), estas se van adelgazando en la base para formar un peciolo más o menos alargado (de Vilmorín, 1980) o que a veces puede ser poco aparente (Zapata *et al.*, 1992).

Las flores poseen una corola blanca (de Vilmorín, 1980, Zapata *et al.*, 1992) aunque puede ser cremas (Benítez, 2015) de cinco pétalos, con cáliz en una sola pieza formado por

5 sépalos verdes que persisten y se endurecen hasta madurar el fruto, androceo con 5 u 8 estambres y gineceo con 2 o 4 carpelos (Vidal, 2006) son solitarias, localizadas en la inserción de las hojas (de Vilmorín, 1980) con inserción axilar y de fecundación autógena (Zapata *et al.*, 1992).

El fruto es una baya semicartilaginosa, con pared carnosa (Zapata *et al.*, 1992) y posición colgante, generalmente con costillas, aunque algunos son lisos y brillantes, de forma semiesférica, truncados, con el ápice y base emarginada. El color de los frutos diferencia las variedades, los cuales pueden ser verdes, amarillos, anaranjados, rojos (Benítez, 2015) o violeta obscuro. Los colores diferentes al verde los obtienen en la madurez pues en un principio todos son verdes. A diferencia de la mayoría de las especies del género *Capsicum*, no tiene un sabor picante. Cada fruto contiene alrededor de 150 semillas (1 gramo) de color blanco o amarillo pálido, aplanadas, redondeadas y ligeramente reniformes, de entre 3 y 5 mm de longitud, que se insertan sobre una placenta cónica de disposición central y que expresan una duración germinativa de tres o cuatro años (Zapata *et al.*, 1992, Benítez, 2015).

2.2.1 Taxonomía y origen

Comúnmente en México se denomina chile a las especies del género *Capsicum* que tienen la característica de picar y pimiento a los tipos dulces (Mendoza, 2006). Todas las especies del género *Capsicum* son originarias de las zonas tropicales y subtropicales de América (Pino, 2018). Existe cierta confusión respecto a la clasificación taxonómica del chile, aunque se considera que en el género *Capsicum* se incluyen 33 especies y 10 variantes, que se han diferenciado principalmente por su fenotipo, como la morfología de la flor y el fruto (Mendoza, 2006, Pérez *et al.*, 2015). De estas se han reconocido cinco especies domesticas (el resto se consideran silvestres): *C. baccatum* L., *C. pubescens* R., *C. annum* L., *C. chinense* Jacq. y *C. frutescens* L. (Tun, 2001). Las características morfológicas que difieren a estas especies se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3Características morfológicas de las especies domesticadas del género *Capsicum*

Especie	Características
<i>C. baccatum</i> L.	Corola blanca, pequeña, fruto variado en forma
<i>C. pubescens</i> R.	Corola violácea. Frutos carnosos, verdes, rojos, amarillos, ovales, esféricos, picantes y con semillas negra. Incluye manzano
<i>C. annum</i> L.	Corola blanca, una flor por nudo. Frutos variados por color y forma. Incluye las no picantes como el pimiento
<i>C. chinense</i> Jacq.	Corola generalmente amarillosa o verdosa, frutos verdes, rojos en la madurez y negruzcos al secar, picantes. Incluye habanero
<i>C. frutescens</i> L.	Corola blanca, dos flores por nudo, cultivares picantes. Incluye tabasco

Elaboración propia con información de Mendoza (2006) y Pino (2018)

Las especies de *Capsicum* presentan dos centros de variación: las regiones tropicales y subtropicales de Meso-América, como el caso de los pimientos con escaso picor y otros picantes, llamados chiles; el área Andino Central, correspondiente a los países de Bolivia y Perú, donde se han desarrollado especies como *C. chinense* y *C. pubescens*. (Tun, 2001; Mendoza, 2006).

Considerando a Pérez *et al.* (2015) y a Mendoza (2006), la taxonomía del pimiento morrón se muestra en la Tabla 4.

Se cree que la especie *Capsicum annum*. L. se originó en México (7000 A.C.) de acuerdo a los restos arqueológicos hallados en regiones de Tehuacán, Puebla, y en Ocampo, Tamaulipas (Aguirre y Muñoz, 2015, De la Cruz, 2001, Kaft *et al.*, 2014 citado por Pérez *et al.*, 2015), además de que en dicha región también se ubica el centro de diversidad filogenética del Proto-Otomanguean, lengua hablada en épocas del Holoceno Medio y que es la protolengua más antigua de la que se origina la palabra 'chile' con base en lingüística histórica (Kraft *et al.*, 2014 citado por Pérez *et al.*, 2015).

Tabla 4

Taxonomía del pimiento morrón

Jerarquía	Nombre
Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Subclase	Asteridae
Orden	Solanales
Familia	Solanaceae
Genero	Capsicum L.
Especie	<i>Capsicum annum</i> L. var. annum

Elaboración propia con información de Pérez *et al.* (2015) y Benítez (2015)

2.3 Requerimientos edafoclimáticos

2.3.1 Temperatura

La temperatura es uno de los factores ambientales que más influyen en la velocidad de crecimiento y desarrollo de la planta de pimiento, además de posibilitar o impedir procesos fundamentales para la producción como la germinación de semillas y polen. De manera general, la FAO (1994) citada por el Ruiz *et al.* (2013) menciona como temperatura óptima para este cultivo los 18°C, la mínima como 7°C y la máxima como 29°C. Esta planta no soporta heladas, helándose a 1°C (Ibar y Juscafresa, 1987, citados por SEDEA, 2017).

El rango óptimo para la germinación de semillas de pimiento oscila entre 20 y 30°C, inhibiéndose a los 7°C (Zapata *et al.*, 1991) y a los 35°C (Cavero *et al.*, 1995; Zapata *et al.*, 1992; SAGARPA, 2017). Dentro de este rango, la germinación y emergencia se produce de los 9 a los 12 días. Para que la planta crezca las temperaturas van de los 16 a los 32°C (SAGARPA, 2017). Se ha encontrado que si la temperatura durante la germinación baja más allá de los 18°C se tiene un efecto perjudicial en los primeros frutos (Zapata *et al.*, 1991).

Las temperaturas inferiores a 15°C tienen un efecto perjudicial en el crecimiento vegetativo, deteniéndose por completo a temperaturas menores a los 10°C (Pilatti *et al.*,

1991). Específicamente, durante el día la temperatura debe oscilar entre 20 y 25°C y entre 16 y 18°C durante la noche, con un diferencial térmico día – noche entre 5 y 8°C (Pilatti *et al.*, 1991). Esta especie es altamente sensible a las bajas temperaturas (Gil, 1991), las que provocan efectos negativos en su productividad, con reducciones en la longitud y peso seco del brote y raíz, el número de hojas, además de que se manifiesta un aumento en el número de brotes axilares, según Mercado *et al.* (1997) citados por Vidal (2006) y pueden presentarse desordenes como pudrición apical, pie de elefante, manchado de frutos, bajado de frutos y frutos deformes (Jovicich *et al.*, 2004) enanismo y endurecimiento (Vidal, 2006).

Nuez (1996) indica que las temperaturas inferiores a 15°C retrasan o bloquean el desarrollo, al contrario, este se posibilita con temperaturas diurnas óptimas entre 23-25°C y nocturnas entre 18-20°C, con un diferencial térmico día-noche entre 5-8°C. La temperatura media para la formación de la flor va de los 18 a los 27°C (Zapata *et al.*, 1991); el desarrollo del botón floral entre los 10 y los 15°C genera anomalías en las flores como pétalos sin desarrollar o curvados, formación de ovarios que pueden evolucionar en frutos distribuidos alrededor del principal o fusión de anteras o pistilos, a temperaturas mayores de 30°C no se desarrollan flores y los botones se caen antes de la antesis (Vidal, 2006), con temperaturas de los 5 a los 7°C se reduce drásticamente el porcentaje de viabilidad de granos de polen, así, en el cuajado de flores la temperatura óptima es 25°C, con una mínima de 18 y una máxima de 35°C (Nuez, 1996) Para el crecimiento y maduración de los frutos, una temperatura adecuada está en el rango de los 15 a los 35°C (Nuez, 1996), aunque algunos autores mencionan que va de los 13 a los 27°C (Doorenbas y Kassam, 1979 citados por SEDEA, 2017).

2.3.2 Humedad relativa

La humedad relativa óptima es de 50 a 70% (Ruiz *et al.*, 2013, Zapata *et al.*, 1991), que se requiere especialmente durante la floración y el cuajado de frutos. Valores altos de humedad relativa y abundante follaje favorecen el ataque de enfermedades y dificultan la fecundación de las flores, mientras que la humedad baja ocasiona frutos deformes y pequeños, si a esta se añan altas temperaturas, se provoca caída de flores y frutos (Ruiz *et al.*, 2013). Durante las primeras fases del desarrollo precisa y tolera una humedad relativa más elevada que en fases posteriores (Zapata *et al.*, 1991). Se ha encontrado que humedades relativas bajas promueven

aumentos de necrosis apical, una fisiopatía de importancia en este cultivo y que es originada por deficiencia de calcio en las primeras etapas de crecimiento del fruto (Muñoz *et al.*, 2004).

2.3.3 Luz

Es exigente en luminosidad durante todo su ciclo vegetativo, especialmente en la floración, ya que si esta se ve reducida las flores son más débiles en situaciones de escasa luminosidad (Zapata *et al.*, 1991). Necesita de luz solar directa, la cantidad requerida va de los 32.3 a 86.1 Klux (Barasa, 1994 citado por SEDEA, 2017)

2.3.4 Fotoperiodo

En general, se menciona que las plantas del género *Capsicum* son plantas de día corto, pero existe algunas que son de fotoperiodo neutro (FAO, 1994 citada por Ruiz *et al.*, 2013). En el caso específico del pimiento morrón, la inducción floral no es afectada por el fotoperiodo, produciéndose principalmente por acumulación de temperaturas superiores a la temperatura base del cultivo y luego de que la planta ha producido entre 8 y 12 hojas según la variedad o híbrido (Pilatti *et al.*, 1991).

2.3.5 Suelo

La planta crece y se desarrolla mejor en un suelo de textura ligera a media (dado que requiere un buen drenaje y no soporta el encharcamiento) con profundidad moderada mínima de 35 a 50 cm. Se desarrolla adecuadamente en pH de 4.3 a 8.3 siendo el mejor 6.3 (FAO, 1994, citada por Ruiz *et al.*, 2013). En etapa de plántula es muy sensible a la salinidad, algunos autores mencionan que en etapas posteriores se vuelve moderadamente sensible (Doorenbas y Kassam, 1979 citados por SEDEA, 2017) aunque algunos la consideran como altamente sensible durante todo el ciclo (Zapata *et al.*, 1991). Se reportan reducciones del rendimiento conforme aumenta la conductividad eléctrica en el siguiente orden: 0% para 2.2 mmhos cm⁻¹, 25% para 3.3 mmhos cm⁻¹, 50% para 5.1 mmhos cm⁻¹ y 100% para 8.5 mmhos cm⁻¹ (Doorenbas y Kassam, 1979 citados por SEDEA, 2017), además de la reducción del rendimiento con aumentos de la salinidad. Se ha reportado que el pasar de 2 a 4 mmhos cm⁻¹ puede generar incrementos del 8% de necrosis apical, y que si a esto se le suma una

humedad relativa baja, la incidencia puede acrecentarse hasta en un 68% (Muñoz *et al.*, 2004).

2.3.6 Características respecto al cambio climático

A concentraciones de 1 200 ppm de CO₂ el rendimiento se incrementa respecto a una concentración de 350 ppm (Krupa y Kickert, 1989). Según Mota (2011) “Bajo una densidad de plantación de 2.2 plantas m⁻², los valores de carbono y CO₂ por planta para las distintas partes de ésta son: 13.1 y 48 g, respectivamente, en raíz; 109.8 y 402.6 g en tallo; 95.2 y 349.1 g en hojas; 62.5 y 229.2 g en fruto; para un total por planta de 281 g C y 1,029 g CO₂”. En presencia de ozono (0.12 y 0.20 ppm), el rendimiento en fruto puede disminuir hasta 54%, a pesar de que se incrementa la altura de la planta y el número total de hojas (Lee y Yun, 2006 citados por Ruiz *et al.*, 2013). Algunas variedades son tolerantes a los rayos UV-B, por lo que no tiene efectos negativos en el rendimiento (Krupa y Kickert, 1989). Según Orellana *et al.* (2012) “Este cultivo se considera susceptible a la sequía ya que sólo puede tolerar el estrés hídrico por periodos cortos. Periodos más prolongados de sequía pueden ocasionar caída de hojas, flores y frutos, por lo que disminuye el rendimiento y la calidad del fruto”.

2.4 Fenología

Las plantas de pimiento que se cultiva son de tipo anual (Benítez, 2015) con un ciclo que va desde los 75 hasta los 150 días para variedades precoces y tardías, respectivamente, dentro de este rango se encuentran variedades con ciclo intermedio (Ruiz *et al.*, 2013).

La germinación y la emergencia ocurren entre los 9 y 12 días, respectivamente, después de la siembra, dependiendo de la temperatura (SAGARPA, 2017) (Tabla 5) la emergencia del hipocótilo se presenta seis días después de la germinación. La verticalidad del hipocótilo y los primeros pares de hojas aparecen al octavo día. Once días después de la siembra y cinco días de germinación, se observan raíces laterales o de primer orden (Mundarai *et al.*, 2005).

Tabla 5

Tiempo de germinación (en días) de la semilla de chile de acuerdo a la temperatura del sustrato expresada en grados centígrados (°C)

Temperatura del sustrato en °C	10 o menos	15	20	25	30	35	40 o más
Días a germinación	No germina	25	23	8	8	9	No germina

Fuente: Reveles *et al.*, 2012

En un experimento con 11 híbridos diferentes de pimiento en hidroponía Moreno *et al.* (2011) encontraron que en promedio los materiales evaluados, presentaron la emergencia a los 16 días después de la siembra; la primera, segunda y tercera hojas verdaderas a los 37, 47 y 61 días después de la siembra, respectivamente; la primera, segunda, tercera y cuarta bifurcaciones a los 10, 17, 25 y 30 días después del trasplante, en cada caso; por su parte, la floración, fructificación, cambio de color del fruto e inicio de cosecha, a los 33, 44, 93 y 102 días después del trasplante, respectivamente.

Soto *et al.* (2006) trabajaron con pimiento bajo riego en diferentes localidades con el objetivo de crear modelos de correlación entre la Unidades Calor Acumuladas después de la Plantación (HUAP, por sus siglas en inglés) y la fenología de este cultivo. Encontrando que la primera floración se produjo a 1369 ± 72 HUAP, la floración temprana a 1667 ± 79 HUAP, la floración máxima a 1998 ± 84 HUAP; madurez fisiológica a 2285 ± 159 HUAP, y se identificó que la cosecha de chile rojo ocurrió a 3295 ± 216 HUAP.

2.5 El riego en pimiento morrón

Algunos autores mencionan que la lámina media que requiere el pimiento morrón es igual a 759 mm durante todo el ciclo (Necdet *et al.*, 2004) sin embargo, este valor depende de del clima, del suelo, del cultivo y del manejo del riego por lo que no puede considerarse como una constante.

La tecnificación del riego agrícola plantea tres preguntas básicas: ¿Cuándo?, ¿Cuánto? y ¿Cómo? regar un cultivo para obtener la máxima eficiencia y productividad del agua. La programación del riego trata de dar respuesta a las dos primeras (Catalán *et al.*, 2007). De la respuesta a estas dos preguntas se determina la frecuencia y el tiempo de

duración del riego que son la base para establecer una programación adecuada en función de la especie, del suelo y de las variables climáticas que indican en la evaporación del suelo y transpiración del cultivo (Ortega y Acevedo, 1999).

Con el fin de poder planificar esta programación, es necesario conocer las necesidades hídricas de los cultivos, es decir, la cantidad de agua que requieren para un desarrollo productivo máximo (Pérez, 2015). La evapotranspiración expresa las necesidades hídricas del cultivo y se define como la suma del agua perdida a través de la superficie del suelo por evaporación y la transpiración del cultivo (FAO, 1999) y generalmente se presenta en milímetros de altura de agua durante un lapso de tiempo, un milímetro de agua, equivale a un litro por metro cuadrado (Redondo y Redondo, 2010).

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}). ET_o es la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia (cultivo hipotético de pasto con características específicas) que ocurre sin restricciones de agua. ET_c se refiere a la evapotranspiración de un cultivo cualquiera en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas. ET_c requiere generalmente una corrección, cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo dando como resultado la ET_{caj} (FAO, 1999).

Debido a que existe poca información para estimar directamente la ET_c , se suele utilizar una relación entre ésta y la ET_o , que se designa como “ K_c ” y equivale al cociente de ET_o entre ET_c . Debido a variaciones en las características del cultivo durante los diferentes periodos de crecimiento, para un determinado cultivo, K_c cambia desde la siembra hasta la cosecha convencionalmente. Se diferencia un K_c inicial, uno medio y uno final. Para el caso específico del pimiento morrón los valores reportados por la FAO (1999), que son valores promedios a partir de varios estudios en todo el mundo son 0.6, 1.05 y 0.9, respectivamente. Es importante señalar que estos datos difieren de los obtenidos experimentalmente por

Sánchez (2003) citado por Casilimas *et al.* (2012), los cuales son: 0.4 de en la etapa inicial, 0.85 en la etapa media y 0.6 en la etapa final (Figura 4).

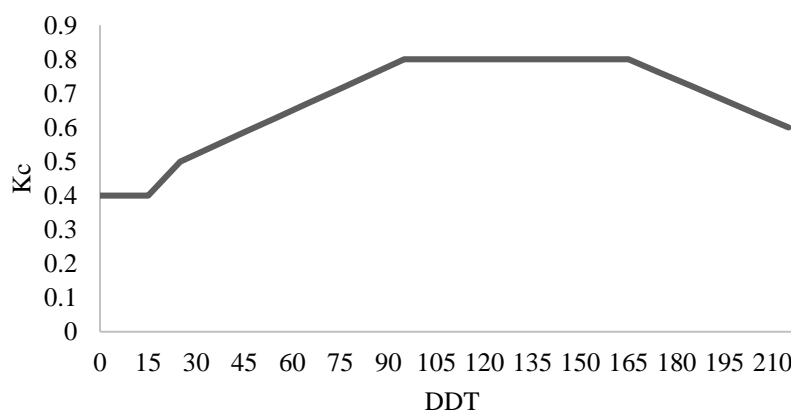


Figura 4. Valores de Kc para cultivo de pimienta morrón. DDT = Días Después del Trasplante y Kc = ETo/ ETc, donde ETo = evapotranspiración potencial y ETc = Evapotranspiración del cultivo. Fuente: Casilimas *et al.*, 2012.

Existen diferentes métodos para evaluar las necesidades hídricas de los cultivos, Pérez (2015) los diferencia en: climatológicos, balance hídrico e indicadores del estado hídrico. En los climatológicos distingue:

- Basados en la temperatura del aire. Útiles debido a la escasez de datos meteorológicos. Entre estos se encuentran el de Blaney-Criddle modificada por Phelan.
- Basados en la radiación solar. Se basan en el supuesto de que la energía para producir la evapotranspiración proviene de la radiación. En este grupo se encuentran el de regresión y el de Makkink.
- Combinados. Uno de los más importantes de este grupo es el de Penman-Monteith que fue modificado por la FAO y actualmente es el recomendado por esta institución y más ampliamente usado. Dentro de este grupo puede considerarse el propuesto por Hargreaves que sólo necesita datos de temperatura y radiación solar y la fórmula propuesta por la FAO en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos No. 56 es:

$$Et_o = 0.0023 * (T_{Med} + 17.8) * (T_{Max} - T_{Min})^{0.5} * R_a$$

Donde:

Et_o = Evapotranspiración potencial (mm día⁻¹)

TMed = Temperatura media (°C)
TMax = Temperatura máxima (°C)
TMin = Temperatura mínima (°C)
Ra = Evaporación equivalente (mm día⁻¹).

El valor de Ra se calcula con la siguiente ecuación, también descrita en la guía mencionada:

$$R_a = 0.408 * \text{Radiación extraterrestre}$$

Donde:

Ra = Evaporación equivalente (mmdía⁻¹)

- Tanque de evaporación. Emplea un tanque clase A, estima la evaporación de una superficie de agua que se corrige utilizando un factor Kp según la ubicación del tanque y las características climáticas existentes.

2.5.1 Balance hídrico

Según la FAO (1999) “el método de balance hídrico del suelo consiste en evaluar los flujos de agua que entran y salen de la zona radicular del cultivo dentro de un determinado periodo de tiempo. El riego (R) y la precipitación (P) proporcionan agua a la zona radicular. Parte de R y P pueden perderse por escurrimiento superficial (ES), y percolación profunda (D) la cual eventualmente recargará la capa freática. El agua también puede ser transportada hacia la superficie mediante capilaridad (C) desde la capa freática subsuperficial hacia la zona de raíces o ser incluso transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia dentro (FSin) o fuera (FSout) de la zona radicular (ΔFS). Si todos los otros flujos aparte de la evapotranspiración (ET) pueden ser evaluados, la evapotranspiración se puede deducir a partir del cambio en el contenido de agua en el suelo (ΔSW) a lo largo de un periodo de tiempo según la siguiente ecuación:

$$ET = R + P - ES - D \pm \Delta FS \pm \Delta SW$$

2.5.2 Indicadores de la condición hídrica

Dentro del grupo de indicadores del estado hídrico Pérez (2015) distingue entre dos tipos: indicadores del estado hídrico de la planta e indicadores del estado hídrico del suelo. Para fines ilustrativos se da una breve descripción de algunos de los métodos para medir el estado hídrico de las plantas, los cuales son:

- ⇒ Contenido relativo de agua. Relaciona la cantidad de agua en un tejido con respecto al contenido máximo a plena turgencia (Barrs y Weatherley, 1962 citados por Pérez, 2015).
- ⇒ Celda de aislamiento o porómetro. Mide la cantidad de vapor de agua transpirada por una hoja encerrada en una cámara en un lapso de tiempo. El vapor de agua transpirado por la hoja resulta ser igual al cambio de contenido de agua del aire dentro de la cámara que se calcula a través de la medida de la humedad relativa y la temperatura del aire. Si junto con esas medidas se mide la temperatura de la hoja, puede estimarse la conductancia estomática, que representa el grado en que están abiertos o cerrados los estomas. Con los datos antes mencionados más un analizador de CO₂, que mida las cantidades de CO₂ que entran y salen del sistema por la absorción de longitudes de onda específica de radiación en la proporción infrarroja, es posible medir la fotosíntesis (Salisbury y Ross, 1994).
- ⇒ Temperatura foliar. La temperatura en las hojas ha sido acreditada ampliamente como indicador de la respuesta de las plantas a factores ambientales adversos. La escasez de agua en el suelo hace que las plantas transpiren a una menor tasa que la demanda evaporativa de la atmósfera, lo que supone un calentamiento de la hoja ya que disminuye el efecto refrigerante de la transpiración (Kramer, 1974).
- ⇒ Flujo de savia o flujo en el tallo. Aunque hay varios métodos similares, el básico consiste en aplicar un pulso de calor en un punto determinado y después se mide la temperatura en un punto situado más arriba. El tiempo que se requiere para que el incremento de temperatura llegue al segundo punto es el indicativo de la velocidad con la que fluye la savia que, junto con el diámetro del tallo y otras constantes, permite estimar la transpiración (Salisbury y Ross, 1994).

Contenido de clorofila. Se ha reportado que existe una relación inversa entre plantas expuestas a déficit hídrico y la concentración de clorofila (Rodríguez, *et al.*, 2016), específicamente en pimiento. Varios autores han reportado disminución en el contenido de clorofila en plantas de pimiento morrón sometidas a déficit hídrico. Flexas *et al.*, 2005, Li *et al.*, 2017, Ashraf *et al.*, 2007, y Szira *et al.*, 2008, encontraron que conforme aumenta el déficit hídrico disminuye la concentración de clorofilas, lo que puede estar relacionado con

la disminución de la fotosíntesis de plantas con estrés hídrico (Salisbury y Ross, 1994), sin embargo, hacen falta estudios para estimar la naturaleza de esta relación.

Los métodos para indicar la condición hídrica del suelo miden directa o indirectamente el contenido de agua en este. Pérez (2015) los clasifica en dos tipos: mátricos y volumétricos, pero para fines de este trabajo consideraremos que los de tipo mátrico y volumétrico son indirectos y que un tipo más llamado gravimétrico es directo.

El método gravimétrico consiste en tomar una muestra del suelo a una profundidad determinada, pesar la muestra húmeda y luego secarla en una estufa a 105°C hasta que tenga un peso constante, cuando se alcance esta condición se registra el peso del suelo seco y la diferencia entre el peso del suelo húmedo y del suelo seco es igual al peso de agua en la muestra inicial (Ótero *et al.*, 2017), con el uso de la densidad aparente del agua y del suelo puede calcularse el contenido de agua en el suelo expresando en volumen. La dificultad de este método para usarlo en la programación del riego es la duración del tiempo de secado.

Los instrumentos que miden el potencial mátrico del suelo se basan en que el agua es retenida por la matriz del suelo, en forma de películas alrededor y entre las partículas del mismo. Conforme el suelo pierde humedad, la película de agua se hace más fina y se adhiere con más fuerza a las partículas de la matriz del suelo. El más usado de estos instrumentos es el tensiómetro, que está compuesto principalmente por una cápsula de cerámica, un tubo conductor lleno de agua y un medidor de vacío, los cambios en la tensión de humedad del suelo se transmiten al agua contenida en el tubo y así, son cuantificados por el medidor de vacío (Villalobos *et al.*, 2004). Una de las ventajas más importantes de este instrumento es que la medida no está influenciada por el contenido de sales en el suelo (Ótero *et al.*, 2017) y que el potencial mátrico del suelo más que el contenido del agua en este, expresa la disponibilidad de agua para las plantas; sin embargo, debido a que el estado hídrico de las plantas es controlado por diferentes procesos biológicos hace que su validez como indicador único sea cuestionable (Pérez, 2015).

En los sensores que miden el contenido volumétrico del agua en el suelo están la sonda de neutrones y la sonda de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR). La sonda de neutrones consiste principalmente en dos partes: la sonda con su blindaje y el sistema

electrónico de contaje. La sonda es un cilindro metálico sellado de 20 a 30 cm de longitud que contiene una fuente radioactiva de ^{241}Am - ^9Be que emite neutrones rápidos, un detector de neutrones lentos y un preamplificador. La sonda es bajada hasta la profundidad deseada del perfil, a través de un tubo de acceso de aluminio por el que pueden pasar los neutrones rápidos. Una vez en el suelo, los neutrones emitidos por la fuente son dispersados hasta una distancia de 30 a 50 cm, colisionando con los átomos de hidrogeno y se vuelven lentos. Cerca de la fuente de neutrones rápidos hay un detector que cuenta sólo los neutrones lentos, los impulsos electrónicos que salen del detector son preamplificados dentro de la sonda y enviados para el sistema de contaje electrónico, a través de los neutrones lentos cuantificados se puede estimar el contenido de humedad (OIEA, 2003). Debido a que utiliza material radioactivo y no es de fácil mantenimiento, su uso sólo es en laboratorios especializados (Pérez, 2015).

El TDR consta de varias varillas metálicas que se introducen en el suelo y un emisor y receptor de impulsos electromagnéticos. Genera un pulso electromagnético y se mide el tiempo que tarda en recorrer las varillas, que será mayor o menor según lo sea el contenido de agua del suelo. La señal, finalmente, es traducida a humedad del suelo o contenido de agua (Gómez, 2010).

2.5.3 Fracción de Abatimiento Máximo Permissible (FAM)

Cuando se programa el riego bajo métodos climáticos, de balance hídrico o de indicadores de la condición hídrica del suelo, es necesario establecer un parámetro que indique el momento a regar, este es el Agotamiento Máximo Permissible (AMP) (FAO, 1999) o Fracción de Abatimiento Máximo de la humedad aprovechable (FAM) (Catalán *et al.*, 2007). El término se deriva de considerar que del total de agua disponible en la zona radicular del suelo (TAD) (la diferencia entre el agua del suelo a capacidad de campo y en punto de marchitez permanente), sólo una porción es fácilmente aprovechable por las plantas, además de factores económicos y de manejo agrícola. Si no se consideran los factores económicos y de manejo agrícola del cultivo, el AMP es igual a el agua fácilmente aprovechable en la zona radicular del suelo (AFA) que se define como el porcentaje de TAD que puede ser agotada en la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico en las plantas (FAO, 1999). En resumen, la FAM o AMP se define como la cantidad máxima de agua en el suelo que se permite agotar dentro

de un programa de manejo agrícola sin producir reducción significativa en el rendimiento. Para fines de este trabajo expresaremos la FAM en porcentaje del TAD.

2.5.4 Estrategias de Riego Deficitario (RD)

El riego deficitario (RD) consiste en la disminución de la cantidad de agua para el riego de los cultivos tratando de influir negativamente lo menos posible en el rendimiento y la calidad de la producción (Molina, 2012).

Fernández *et al* (2015) diferencia 5 estrategias de RD: Riego suplementario o complementario, se dan sólo 2 o 3 riegos durante todo el ciclo del cultivo cuando más se necesita, es una estrategia a usar en zonas con muy poca agua; Riego deficitario de baja frecuencia, se deja que el cultivo agote el agua acumulada en el suelo hasta poco antes de que la falta de agua en el suelo produzca una reducción inaceptable del rendimiento del cultivo; Riego parcial y alternante (PRD) esta estrategia consiste en regar la mitad del suelo explorado por las raíces durante 2 o 3 semanas y después regar la otra mitad, Riego deficitario sostenido (RDS) donde se riega sólo con una fracción constante del riego que necesita el cultivo y Riego Deficitario Controlado (RDC) que es el usado en este trabajo.

2.5.4.1 Riego Deficitario Controlado (RDC)

El RDC es una estrategia de riego que se basa en reducir los aportes hídricos al cultivo en aquellos periodos fenológicos considerados no críticos para la producción y la calidad de la cosecha, cubriendo plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo (Pérez, 2015; Pagán, 2012; Fernández, 2015). Se aplica a cultivos en los que se ha estudiado su tolerancia a la falta de agua y se conocen los momentos del ciclo más sensibles a la sequía (Fernández *et al.*, 2015), por eso es que se considera con un enfoque más fisiológico que el resto de las estrategias de RD.

Según Pagán (2012) y Pérez (2015) surge en 1981 con los trabajos de Chalmers *et al.*, en los que se pretendía controlar el crecimiento vegetativo en árboles de durazno en Australia sin comprometer la calidad y el rendimiento de la producción. Desde entonces, la investigación que se ha desarrollado en torno a este tema ha dejado clara su viabilidad para maximizar la producción por unidad de agua empleada (Domingo *et al.*, 2005 citados por

Pagán, 2012) principalmente en cultivos leñosos y hortícolas de gran valor comercial cultivados en zonas áridas y semiáridas (Pagán, 2012) como manzano (Parra *et al.*, 2009), durazno (Díaz *et al.*, 2016), ajo (Barrios *et al.*, 2006), brócoli (Villalobos *et al.*, 2005), tomate (Montoya, 2000) y pimiento.

2.5.4.1.1 Riego Deficitario Controlado (RDC) en pimiento morrón

Los experimentos que se desarrollan en torno al RDC evalúan el momento o la etapa fenológica en la que se aumenta la FAM (para disminuir la disponibilidad hídrica) y los niveles del FAM que puede soportar la planta sin disminuciones en el volumen y la calidad de la producción con mejoras en la eficiencia del agua. Estos dos aspectos, más el sistema de riego y las condiciones climáticas imperantes durante del desarrollo del cultivo, son claves en la planeación y desarrollo del RDC (Pérez, 2015).

En el caso del pimiento morrón, existe cierta divergencia respecto a la etapa óptima para la reducción de la disponibilidad hídrica en un programa de RDC. Se ha reportado que puede ser al inicio de la fructificación y hasta el final de la madurez fisiológica (Boicet *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2014; Ngouajio *et al.*, 2008) pues un ligero estrés en la etapa de maduración puede incrementar la calidad del fruto (Peng *et al.*, 2015 citado por Li *et al.*, 2017). Sin embargo, en otros trabajos se reporta que esta etapa es sensible a la sequía (Ferrara *et al.*, 2011, Song *et al.*, 2002 citado por Li *et al.*, 2017) ya que la disponibilidad de agua durante la floración y fructificación influyen directamente la calidad del fruto (Chen *et al.*, 2009 citado por Li *et al.*, 2017) y el rendimiento final con disminuciones de 30 y 28%, respectivamente (Necdet *et al.*, 2004). Por otro lado, se ha encontrado que la reducción del contenido de agua en la primera parte del ciclo vegetativo no afecta el crecimiento de la planta e incluso puede mejorar el rendimiento de los primeros frutos (Delfine *et al.*, 2001). No obstante, Ferrara *et al.* (2011) encontraron que reducciones hídricas durante este período perjudican la producción final. Las divergencias en estos resultados pueden deberse a los niveles de déficit hídrico usados y a las variedades, pues se han encontrado susceptibilidades diferentes al estrés hídrico, según el genotipo considerado (Pino, 2015).

Respecto a los momentos más sensibles al estrés hídrico de la planta de pimiento morrón, existe más consistencia y se considera que son el trasplante (Ngouajio *et al.*, 2008)

y la plena floración (Necdet *et al.*, 2004; Rodríguez *et al.*, 2014), pues cuando se reduce el riego en los periodos de formación de flores se observan reducciones de hasta 30% del rendimiento (Necdet *et al.*, 2004; Dagdelen *et al.*, 2004 citados por Rodríguez *et al.*, 2014).

Respecto al nivel del FAM que puede soportar la planta de pimiento morrón se menciona que sin disminuciones del total de agua disponible (TAD) en la zona radicular del suelo menores al 85 % durante todo el ciclo, los rendimientos en pimiento se mantienen constantes (Boicet *et al.*, 2001) y que el mantener la humedad del suelo sin disminuciones más allá de 10 y 12% disminuye entre 7 y 62% el agua usada regando según el criterio de los productores, manteniéndose además los rendimientos (Zotarelli *et al.*, 2011).

En el mismo sentido, se ha observado que la disminución del 40% de la ET_c durante todo el ciclo no se perjudica el número de frutos por planta, el peso de cada fruto y el rendimiento total, además de que aumenta casi en 56% la eficiencia en el uso del agua en kg de materia producida por metro cubico de agua aplicada respecto al riego con 100% de ET_c durante todo el ciclo (Rodríguez *et al.*, 2014).

Por su parte Smittle *et al.* (1994) encontraron aumentos de rendimiento en pimiento morrón cuando este se rego a 25 KPa en comparación con tensiones de 50 y 75 KPa en suelos con predominante arena (92.1 y 80.4%). Sin embargo, Simonne *et al.* (2006) reportan como óptimo considerar el límite de la FAM los 15 KPa y Montoya (2000) encontró en un experimento con diferentes tensiones del suelo en el cultivo de jitomate que se obtienen los mejores resultados en rendimiento si estas tensiones se mantienen entre 10 y 20 KPa. Por su parte Li *et al.* (2017) encontraron que a 5 KPa se mejora el crecimiento, desarrollo, la actividad de las raíces, se promueve la absorción de nutrientes, así como una mejora en la eficiencia de utilización del agua.

En estudios realizados en ajo se obtuvieron buenos resultados cuando el suelo se rego a 20 y 30 KPa (Barrios *et al.*, 2006) y Villalobos *et al.* (2005) encontraron como límite de tensión de humedad en el suelo 20 KPa para brócoli ya que tensiones inferiores disminuyen el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua.

2.6 Respuesta de las plantas al estrés hídrico

Hay diferentes términos y expresiones usadas para referirse a la sequía y temas relacionados. Sequía propiamente dicha es un término meteorológico y agrícola que significa un periodo de tiempo sin lluvia importante. Déficit hídrico es usado cuando el agua es insuficiente para el metabolismo de la planta y, por lo tanto, se afecta su crecimiento y desarrollo. Desecación se refiere a la pérdida de agua libre en la planta (10% del contenido total de agua) y estrés hídrico se utiliza cuando se reduce el contenido de agua de la planta de manera que disminuye su potencial hídrico y la presión de turgencia (Moradi, 2016). El estrés hídrico se produce en las plantas cuando la tasa de transpiración excede a la toma de agua. Bajo este supuesto, esta condición puede deberse a: falta de agua en el sistema derivado de bajas precipitaciones o a una baja capacidad de retención de agua del suelo, temperaturas extremas, baja presión de vapor atmosférica o elevada salinidad en el suelo, esta última situación también puede denominarse estrés osmótico (Levitt, 1980 citado por Moreno, 2009).

Los mecanismos de adaptación de las plantas al estrés hídrico pueden clasificarse de diferentes maneras. Según la naturaleza del mecanismo, teniendo: escape, evasión y tolerancia (Moradi, 2016), según su nivel de complejidad, resultando: nivel morfológico, anatómico, celular y molecular (Moreno, 2009) y por la velocidad de respuesta. Esto conduce a que el efecto del estrés hídrico sobre las plantas pueda ser discutido conforme a cambios producidos de tipo: morfológico, fotosintético, proteico, lipídico, nutritivo y respecto a las especies oxígeno reactivas (ROS) (Moradi, 2016).

Considerando la primera clasificación, los mecanismos de evasión son empleados para el mantenimiento del balance entre el agua tomada y el agua perdida, los de escape involucran cambios en los ciclos biológicos para evitar los momentos de estrés, ya sea durante todo el ciclo o sólo durante una etapa específica que casi siempre es la reproductiva, mientras que los de tolerancia mantienen a la planta funcionando como si no estuviera en condiciones de estrés (Cajumban, 2018). Tanto los de evasión como los de tolerancia son de importancia en programas de mejoramiento genético (Moradi, 2016).

Las respuestas tempranas de la planta involucran percepción y señales para mejorar la protección inicial, mientras que las respuestas tardías involucran la acción de genes para aclimatación, consistiendo en respuestas fisiológicas, bioquímicas y morfológicas (Bhargava y Sawant, 2013).

En general, los mecanismos resultantes de la adaptación a las condiciones de déficit hídrico son: el desarrollo del metabolismo C4 o CAM, la disminución de la expansión foliar, el aumento del crecimiento radicular, el cierre de estomas, la captura de especies oxígeno reactivas (ROS), producción de metabolitos secundarios (ácido salicílico, ácido jasmonico y poliamidas), cambio en la síntesis y catabolismo de lípidos así como cambios en la expresión de genes que codifican: proteínas protectoras, enzimas clave en la vía de síntesis de osmolitos, enzimas antioxidantes y factores de transcripción que regulan la expresión de genes inducidos por el estrés (Moreno, 2009, Moradi, 2016). La mayoría de las respuestas de las plantas al estrés hídrico están reguladas por el ácido abscísico (ABA) aunque hay vías de regulación independientes de esta hormona (Moreno, 2009).

Los compuestos involucrados en el estrés hídrico (aminoácidos, carbohidratos, lípidos y metabolitos secundarios) se denominan productos clave de las plantas y tienen un papel muy importante en este proceso (Moradi, 2016).

El desarrollo de los metabolismos C4 y CAM conducen a un uso más eficiente del agua que está relacionado con la disminución de la fotorrespiración y con una mayor concentración de dióxido de carbono en la zona de asimilación (Moreno, 2009), esto supone adaptaciones morfológicas y metabólicas para mejorar la eficiencia de utilización del agua.

Existen otras estrategias morfológicas de las plantas para hacer frente al déficit hídrico tales como cambio en la dinámica de crecimiento foliar (Potters *et al.*, 2007 citado por Moreno, 2009), disminución en la densidad estomática, aumento de pelos radiales, aumento en la densidad de las pubescencias de las hojas, espacio intercelular menor y menores células del mesófilo, cutícula más gruesa, tejidos lignificados (Moradi, 2016) y mayor crecimiento de la raíz (Potters *et al.*, 2007 citado por Moreno, 2009) aunque en algunos trabajos se ha encontrado un menor crecimiento de esta (Vandoome *et al.*, 2012).

El más importante de los cambios morfológicos debido al estrés hídrico es la disminución en la producción de materia fresca y seca que está altamente relacionada con afectaciones en fotosíntesis, respiración, translocación, captación de iones, carbohidratos, metabolismo nutricional y promotores del crecimiento (Farroq *et al.*, 2009 citados por Moradi, 2016), aspectos que pueden perjudicar, entre otros, el cierre de estomas, mecanismo

que a su vez está regulado por la hormona ABA de la siguiente manera; con una acumulación mayor de ABA en las células de guarda de los estomas que proviene tanto de la descompartmentalización y redistribución desde los cloroplastos de las células del mesófilo como de las raíces se producen pérdidas en iones K^+ , aniones Cl^- o malato $^{2-}$ y así, el cierre de los estomas (Roelfsema y Hedrich, 2002).

El ajuste osmótico, también es una respuesta al déficit hídrico que consiste en una disminución del potencial hídrico en los tejidos vegetales por acumulación de osmolitos orgánicos de bajo peso molecular (polioles, metilaminas, aminoácidos libres y derivados de aminoácidos), iones, fundamentalmente K^+ , generalmente en la vacuola y cuya acumulación en grandes concentraciones no afectan la estructura y funcionalidad de las macromoléculas. En algunos casos, la acumulación de osmolitos también lleva consigo una función de osmoprotección de proteínas y membranas celulares (Ashraf y Foolad, 2007). Este mecanismo se basa en que el agua se mueve de zonas de mayor a menor potencial hídrico y que una concentración de solutos mayor produce un menor potencial hídrico, previniendo pérdidas de agua en las células y conservando el gradiente con el suelo.

Como se mencionó, existe una respuesta al estrés hídrico a nivel genético, con modificaciones específicas; aumentos o disminución, en la expresión de genes y que depende de la naturaleza, duración y severidad del estrés. Específicamente es la alteración en la expresión de las proteínas la que se considera como respuesta a diferentes tipos de estrés y las investigaciones se centran en su aumento durante estas condiciones ya que se cree tienen una función adaptativa o de protección. Entre las más importantes por su efecto protector potencial están las proteínas LEA (Late Embriogenesis Abundant Proteins), las involucradas en las vías de síntesis de los osmolitos y las que funcionan como antioxidantes (Bartles y Kotchoni, 2003). Las funciones que realizan estas proteínas se clasifican según Moradi (2016) dentro del grupo de tolerancia a la deshidratación (*dehydration tolerance*) que involucra todas las estrategias de la planta para prevenir el daño celular debido a pérdida de agua y que es el último tipo de estrategia a la que la planta puede recurrir en casos severos de estrés.

Las proteínas LEA son varias familias de proteínas que se acumulan durante la etapa madura de la embriogénesis, justo antes de la desecación de la semilla y en algunos tejidos

vegetativos en respuesta al estrés osmótico. La inducción de los genes que codifican a las LEA está mediada por el ABA y se ha propuesto que protegen proteínas y membranas del daño debido a la deshidratación, por dos mecanismos: sustituyendo al agua y manteniendo la estructura de las proteínas y las membranas formando una estructura “random coil” y actuando como trampas de iones, secuestrando iones que están concentrados durante la desecación (Baker *et al.*, 1988 citado por Moreno, 2009).

En condiciones de estrés, se produce una sobreexpresión de enzimas clave en la biosíntesis de osmolitos como la prolina y otros aminoácidos, las poliaminas y los compuestos cuaternarios de amonio como la glicina betaina, la sacarosa, los polioles y otros oligosacáridos que son compuestos tipo osmolito que representan una función importante en el ajuste osmótico y protegen las células de las especies reactivas de oxígeno (Moreno, 2009).

Otro grupo de proteínas que se sobre expresan durante el estrés hídrico son las enzimas antioxidantes que, junto con compuestos no proteicos, detoxifican a las plantas de los radicales libres. Estos radicales como el superóxido y el peróxido de hidrógeno se generan debido a un aumento en la tasa de fotorreducción del O en los cloroplastos (Robinson y Bunce, 2000). Entre las principales enzimas están la superóxido dismutasa (SOD), la catalasa (CAT), la ascorbato peroxidasa (APX), la peroxidasa (POD), la glutatión reductasa (GR) y la monodehidroascorbato reductasa (MDAR) (Apel y Hirt, 2004). Además de las proteínas señaladas anteriormente tenemos a las proteínas transportadoras de iones, las que permiten el transporte de agua (acuaporinas), las proteasas, las kinasas, fosfatasas, y las involucradas en el metabolismo de los fosfolípidos y los factores transcripcionales (Moreno, 2009).

Los compuestos lipídicos también se ven afectados en condiciones de estrés hídrico. Se han encontrado resultados variables según la especie estudiada, pero en general se tiene que el estrés hídrico reduce la cantidad de fosfolípidos, glucolípidos y ácido linoleico, pero incrementan los triglicéridos en el tejido de las hojas (Moradi, 2016).

Por otro lado, condiciones ambientales estresantes interrumpen el metabolismo normal de las células, lo que genera un aumento en la producción de especies oxígeno reactivas (ROS) o radicales libre tales como: O^{-2} , OH^{-} , H_2O_2 y O_2 . Estas moléculas dañan a las células por oxidación de macromoléculas vitales como proteínas, membranas, lípidos,

ADN y pigmentos. Por lo que las plantas usan mecanismos enzimáticos y no enzimáticos antioxidantes para mitigar daños oxidativos, tales como las enzimas guaiacol peroxidasa (GPX), monodehydroascorbato reductasa (MDHAR) dehydroascorbato reductasa (DHAR) y glutathion reductasa (GR). Se ha encontrado que existe una relación entre la tolerancia a la sequía por las plantas y una concentración pequeña de ROS o una alta concentración de productos que capturan ROS (Moradi, 2016).

2.6.1 Respuesta del pimiento al déficit hídrico

Los efectos del estrés hídrico en plantas de pimiento morrón dependen de la variedad (Ismail y Davies, 1997), la severidad (Boicet *et al.*, 2001; Zotarelli *et al.*, 2011; Smittle *et al.*, 1994), la etapa fenológica (Boicet *et al.*, 2001; Necdet *et al.*, 2004; Rodríguez *et al.*, 2014; Ngouajio *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2009 citado por Li *et al.*, 2017; Delfine *et al.*, 2001) y la porción de la raíz sometida (Chamú *et al.*, 2011). Estos factores pueden ser los responsables de las controversias en los parámetros evaluados en diferentes experimentos.

Algunos autores como Pino (2018) consideran que el pimiento morrón es una planta sensible al estrés hídrico, esto se debe a que se ha encontrado que cuenta con un sistema radical poco desarrollado (Pino, 2018) y que el estrés hídrico inhibe el crecimiento de la raíz (Kulkarni, *et al.*, 2009 citado por Li *et al.*, 2017), sin embargo, algunos autores señalan que la sequía promueve la distribución preferencial de fotoasimilados a la raíz con un aumento continuado de su longitud en esta planta (Poorter *et al.* 2009 citado por Li *et al.*, 2017). Por su parte Chamú *et al.* (2011) y Necdet *et al.* (2004) reportan que no hay diferencia entre los pesos secos relativos de raíz bajo diferentes regímenes de disponibilidad hídrica lo que, sumado a una longitud radical considerable, hasta 1.20 m según Zapata *et al.*, (1992), significaría que la planta de pimiento puede no ser sensible al estrés hídrico, por lo menos considerando estos aspectos morfológicos. Por otro lado, es importante señalar que una raíz poco profunda no representa una limitante para aplicar el RDC, esto por dos aspectos, primero, porque para establecer un programa exitoso de RDC es necesario usar riego localizado, lo que involucra la aplicación de alta frecuencia de láminas pequeñas para evitar pérdidas por percolación en zonas profundas y segundo, porque una raíz menos profunda en un suelo con alta velocidad de infiltración significaría que los cambios en regímenes hídricos son más drásticos, lo que a su vez representa una ventaja si se pretende utilizar los efectos

del estrés hídrico como factor de manejo, por ejemplo en el control de ramas laterales en árboles frutales (Zapata y Segura, 1995).

Con incrementos de estrés hídrico, decrece la tendencia de ganancia de peso en la planta y el área foliar (Ashraf *et al.*, 2007; Szira *et al.* 2008), sin embargo, si el estrés hídrico solo es en una parte de la raíz, no hay diferencia significativa (Chamú *et al.*, 2011). El grosor del tallo, el contenido relativo de agua en el tejido (Ashraf *et al.*, 2007; Szira *et al.* 2008), el contenido de clorofilas (Flexas *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2017; Ashraf *et al.*, 2007; Szira *et al.* 2008) también se ven afectados, esto puede estar relacionado con una disminución de la fotosíntesis y conductancia estomática (Delfine *et al.*, 2002), parámetros que tampoco se ven afectados cuando solo una parte de las raíces está sometida a condiciones hídricas desfavorables (Chamú *et al.*, 2011).

El contenido de ABA aumenta conforme lo hace el estrés hídrico en esta planta (Ismail y Davies, 1997) y no hay cambios en la distribución de materia seca relativa de todas las partes de la planta (Necdet *et al.*, 2004; Chamú *et al.*, 2011).

Peng *et al.* (2005) indicaron que un leve estrés hídrico durante la etapa de maduración podría incrementar la calidad del fruto, incrementando compuestos como la capsaicina. Por su parte Pino *et al.* (2018) encontraron que disminuciones sostenidas del régimen de riego a 80 y 60% de la ET_c en pimiento morrón, no tienen efectos diferenciales en el color del fruto y grosor del pericarpio y aumentan los sólidos solubles totales y el contenido de materia seca en proporciones del 50 y 60%, respectivamente. Pino *et al.* (2017) y Chamú *et al.* (2011) usando una técnica de secado parcial de la raíz, coinciden en los aumentos en la concentración de sólidos solubles, sin embargo difieren en los aumentos de materia seca y agregan que no existen cambios respecto a la firmeza y el pH. Cambios en los regímenes hídricos, pueden generar o no diferencias en el volumen y longitud de los frutos (Necdet *et al.*, 2004). Dorji *et al.* (2005) en un trabajo con *Capsicum annum* Ancho St. Luis, muestran que a pesar de que se mantiene el contenido en materia seca de los frutos con déficit hídrico, hay disminuciones hasta del 34.7% del peso fresco, que el número de frutos disminuye en alrededor de 20%, ya que hay hasta un 50% más de abortos de flores y que los daños por blossom en frutos aumentan llegando a ser igual a 29.3% y 20.4%, para déficit hídrico sostenido y secado parcial de la raíz, respectivamente.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del Riego Deficitario Controlado (RDC) sobre el pimiento morrón var. California Wonder en condiciones de macrotúnel.

3.2 Objetivos particulares

- Describir el efecto del Riego Deficitario Controlado sobre la dinámica de crecimiento y desarrollo de plantas de pimiento morrón var. California Wonder.
- Analizar el efecto del Riego Deficitario Controlado sobre el número de flores abiertas y caídas en pimiento morrón var. California Wonder.
- Analizar el efecto del RDC sobre el rendimiento y la calidad de frutos (peso y diámetro ecuatorial y polar) de pimiento morrón var. California Wonder.

3.3 Hipótesis

Si el déficit hídrico afecta el rendimiento de pimiento morrón en función de la etapa fenológica en que se presenta, entonces habrá por lo menos una de ellas con mayor susceptibilidad al estrés hídrico que redunde en la producción.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se utilizó el método cuantitativo, por lo que, la evaluación de las variables involucradas se realiza a través de elementos numéricos y su comparación mediante métodos estadísticos. La técnica involucrada fue la de experimentación en campo ya que ésta permite la cuantificación numérica y directa de las variables de interés.

4.1 Ubicación

El presente experimento se realizó en Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FES-C), ubicada en el municipio de Cuautitlán Izcalli en el Estado de México, en la longitud oeste $99^{\circ} 11' 42''$ y en la latitud norte $19^{\circ} 4' 35''$. La zona se caracteriza por tener un clima templado subhúmedo con clave C(wo), el más seco de los subhúmedos, con lluvias de verano, una temperatura promedio de 15.2°C ; una precipitación promedio de 607.9 mm y la presencia de heladas principalmente en la época de invierno (Rodríguez, 2014).

Las instalaciones utilizadas fueron dos: el laboratorio de Técnicas de Mejoramiento Genético (L-112) y una estructura de agricultura protegida clasificada como macrotúnel o túnel alto según Jiménez *et al.* (2011), ambas se encuentran a cargo de la carrera de Ingeniería Agrícola de la FES-C. El macrotúnel mide alrededor de 30 m de longitud y 5 m de ancho, su estructura está compuesta por tubos de herrería pintados cubierta con polietileno blanco tipo lechoso. Cuenta con cortinas laterales removibles para cuyo fin utiliza malacates y bajo las cuales tiene malla antiafidos. El área interior está dividida en 4 camas de ladrillo de 28 m de longitud por 1 m de ancho en cuyo interior hay suelo y cinco pasillos de entre 0,2 y 0.3 m de ancho. Su nivel tecnológico es bajo (Jiménez *et al.*, 2011) y su condición general es regular.

El experimento se realizó durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre de 2017, incluyendo el mes de enero de 2018, por lo que el cultivo abarco las estaciones de otoño e invierno en las cuales se presentan temperaturas bajas y heladas.

4.2 Material vegetal

En la presente investigación se utilizó la variedad de pimiento morrón California Wonder de frutos rojos, proveniente de semilla tratada con thiram, producida en el 2016 en Francia y empacada por el Rancho Los Molinos en Cuernavaca, México.

4.3 Parámetros edafológicos y climáticos

Durante el experimento se midieron la Humedad Relativa Máxima (HRMa), la Humedad Relativa Mínima (HRMi), la Temperatura Máxima (TMa) y la Temperatura Mínima (TMi) con un higrómetro-termómetro digital de la marca Acurite modelo 00613 y precisión ± 1 . Se midió el pH y la conductividad eléctrica del suelo antes de establecer el cultivo.

Para establecer la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se realizaron pruebas de densidad aparente (Da) y Capacidad de Campo (CC) en las 4 camas del invernadero con por lo menos 3 repeticiones en cada una, el valor utilizado para los cálculos de riego fue igual a la media aritmética de los valores obtenidos en todas las camas. El punto de marchitez permanente (PMP) se calculó mediante la siguiente fórmula propuesta por Silva *et al.* (1988) citado por Petillo *et al.*, 2000, este autor omite a la Densidad aparente (Da) en la fórmula en suelos cuyo valor sea muy cercano a 1:

$$\text{PMP} = \text{CC} * 0.74 - 5$$

Donde:

PMP = Punto de Marchitez Permanente (%)

CC = Capacidad de Campo (%).

La Da se estimó con el método de la probeta propuesto por el Laboratorio de Física de suelos del Instituto de Geología de la UNAM en el Manual de Procedimientos Analíticos 2010 y la CC a través de la metodología de Petillo *et al.* (2000) que es de tipo gravimétrica.

La humedad del suelo se monitoreo con un medidor que tiene dos sondas, una de aluminio y otra de cobre, colocado en cada cama que cuenta con una sonda de 0.21 m. A pesar de que los fabricantes establecen que dicho medidor mide el contenido de agua en el suelo en valores del contenido volumétrico, se realizó una calibración con el método gravimétrico para cada uno de los nueve niveles de humedad con los que cuenta el medidor. El procedimiento usado consistió en colocar el medidor en un área de un metro cuadrado de suelo dentro de las camas limitado por bordes de tierra, que se llevó a saturación, para luego tomar 3 muestras de suelo dentro del área establecida en cada uno de los niveles del medidor

conforme disminuía la humedad y calcular el contenido de agua mediante el método gravimétrico. Con los valores obtenidos se realizó un análisis de regresión lineal en el programa Excel de Microsoft, de donde resultó la siguiente ecuación de mejor ajuste tipo logarítmica, con un $R = 0.8034$:

$$Hg = 8.2326 * \ln (W) + 10.119$$

Donde:

Hg = Humedad gravimétrica del suelo (%)

W= Nivel del medidor de humedad.

Con esta ecuación se corrigieron los valores de humedad muestreados en campo durante todo el ciclo con revisiones visuales del nivel del medidor de humedad.

Con los datos de temperatura se estimó la E_{t_0} con el método de Hargreaves, propuesto por la FAO en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos No. 56 con la fórmula:

$$E_{t_0} = 0.0023 * (T_{Med} + 17.8) * (T_{Max} - T_{Min})^{0.5} * R_a$$

Donde:

E_{t_0} = Evapotranspiración potencial (mm dia^{-1})

T_{Med} = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Max} = Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)

T_{Min} = Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$)

R_a = Evaporación equivalente (mm dia^{-1}).

El valor de R_a se calculó con la siguiente ecuación, también descrita en la guía mencionada:

$$R_a = 0.408 * \text{Radiación extraterrestre}$$

Donde:

R_a = Evaporación equivalente (mmdia^{-1})

Considerando que la Radiación extraterrestre ($\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$), estimada para 20° de latitud norte (el valor más próximo de tablas encontrado) para septiembre, octubre,

noviembre, diciembre, enero y febrero es 36, 34, 29, 26, 26, 29 y 32 respectivamente. La razón por la que se usó este método fue porque sólo requiere de datos de temperatura que se midieron dentro del invernadero.

4.4 Manejo del cultivo

La germinación de las semillas se realizó en charolas de poliestireno expandido de 200 cavidades con sustrato en proporción 2:1.5:0.5 de turba, vermiculita y agrolita, respectivamente, en una germinadora SEEDBURO 1022 W. Jacson a $25\pm 3^{\circ}\text{C}$. El riego se realizó por lo menos cada dos días, después del 30% de emergencia (14 Días Después de la siembra) se hicieron aplicaciones foliares de Q foska foliar (10-4-7) en dosis de 20 ml por litro de agua por lo menos 3 veces a la semana.

La preparación de las camas de cultivo consistió en un laboreo con azadón, una rotura de terrones y un surcado de tipo manual. En cada cama se levantó un surco al que se le colocaron dos cintillas y una cubierta plástica negro/gris con la parte negra hacía el suelo. Las plántulas se trasplantaron a los 56 días después de la siembra (DDS), cuando tenían una longitud promedio de la base del tallo hasta la última hoja de 14.95 cm y 4.29 pares de hojas verdaderas cada 0.30 m en hilera simple, para tener una densidad de siembra de 3.3 plantas por metro cuadrado y con un total de plantas por cama de 70. Las plantas se tutoraron a dos tallos con rafia de color negro y se hicieron podas semanales de los brotes laterales.

En macrotúnel, la fertilización se realizó con base en la solución nutritiva estándar de Hoagland (1938) (Tabla 6) que se mantuvo en un pH entre 5.5 y 6 con ácido sulfúrico. Los fertilizantes usados fueron: Nitrato de potasio, fosfato monoamónico, nitrato de calcio y sulfato de magnesio. Se aplicó por lo menos 3 días a la semana y se aumentó 25% de sulfato de magnesio y nitrato de calcio a los 34 y 56 días después del trasplante (DDT) ya que se presentaron deficiencias nutrimentales. Se hicieron 5 aplicaciones de Q foska foliar en dosis de 25 ml por litro de agua y una de Grow green a razón de 1 gramo por cada 2 litros de agua para prevenir problemas con micronutrientes.

Se hicieron aplicaciones de Foley Rey (Clorpirifos + Permetrina) y Diazinon 25 E (Diazinon) debido a presencia de minador y mosca blanca. También se presentó araña roja,

pero el control sólo fue de tipo cultural, eliminando las plantas afectadas ya que se presentó casi al final del ciclo.

Tabla 6
Solución universal de Hoaglan (1950)

Elemento	mmol L ⁻¹
NO ₃ ⁻	15
H ₂ PO ₄ ⁻	1
SO ₄ ²⁻	4
K ⁺	6
Ca ⁺	10
Mg ²⁺	4

Fuente: López *et al.*, 2011

4.4.1 Sistema de riego

El sistema de riego utilizado fue goteo. Consta de dos tanques de 250 y 450 litros, el primero utilizado para preparar la solución nutritiva, una bomba eléctrica de 0.5 Hp, tubos conectores de PVC de una pulgada de diámetro nominal, válvulas independientes para cada cama y 2 cintillas Netafim con goteros integrados cada 0.20 m con presión nominal de 1 bar. Para la programación de riego se hicieron mediciones del área de mojado y el gasto por gotero en cada una de las camas. El área de mojado se midió con una regla después de 1 min de riego en 10 goteros a lo largo de cada cama y el gasto se cuantificó con 5 vasos de precipitados a lo largo de cada cama con cintillas regando durante un minuto (0.03 L min⁻¹).

4.5 Fenología y componentes del rendimiento

Se hicieron observaciones visuales semanales para identificar las fases fenológicas del cultivo. También, semanalmente se midió la altura de la planta, Número de Bifurcaciones (NB), número de Flores Abiertas (FA), Número de Frutos (NF), número de Flores Caídas (FC). La Longitud de Raíz (LRA) se midió a los 158 días DDT y el Peso por Fruto (PF), el Diámetro Ecuatorial (DE) y el Diámetro Polar (DP) de los frutos, el número de Frutos Deformes (FD), los Frutos Partenocarpicos (FP) y los Frutos con *Blossom* (FB) en las 3 cosechas realizadas (141, 147 y 155 DDT) cuando los frutos alcanzaron por lo menos el 50%

de color rojo. Para medir todas las variables se seleccionaron 20 plantas al azar de las 70 en cada cama. La altura se cuantificó con una regla de acero desde la base del tallo hasta el último nudo de la planta. Para el DE y DP de los frutos se usó un vernier de acero y para el PF se empleó una balanza Sartorius modelo SAR ED EXTEND de precisión 0.0001g.

Todas las medidas se realizaron entre las 10:00 y las 14:00 horas. Debido a daños por heladas (0°C) el día 82 DDT se perdieron 2, 7, 1 y 1 plantas de los tratamientos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

4.6 Tratamientos y análisis estadístico

La programación de riego se basó en el contenido de agua en el suelo medida con los instrumentos que se calibraron bajo el procedimiento que se describió anteriormente. La lámina de riego neta de reposición a aplicar se calculó con la siguiente ecuación (Zermeño *et al.*, 2007):

$$LNA = (W_{CC} - W_{PMP}) * FMA * (Da/Dw) * Z * P / 100$$

Donde:

LNA = Lámina Neta de agua a aplicar (mm)

W_{CC} = Capacidad de Campo gravimétrica (%)

W_{PMP} = Punto de Marchitez Permanente gravimétrico (%)

FMA = Fracción Máxima de Abatimiento permisible (%)

Da = Densidad aparente del suelo (Kgm^{-3})

Dw = Densidad aparente del agua (Kgm^{-3})

Z = profundidad radical (mm) que se consideró como 200 mm según lo reportado por Zapata *et al.* (1992).

P = Porcentaje de suelo mojado para riego por goteo

Considerando la lámina de riego neta a aplicar, el área de mojada derivada del diámetro de mojado por cada gotero y el gasto total por cama (cuyo aforo ya se describieron), se calculó el tiempo de riego para cada cama con la siguiente fórmula:

$$TTR = (LNA * AM) / Q$$

Donde:

TTR = Tiempo Total de Riego (s)

LNA = Lámina Neta de riego (m)

AM = Área de mojada (m²)

Q = Gasto (m³ s⁻¹)

Aumentos en la FMA genera que la extracción del agua por la planta sea más difícil, lo que puede ocasionar una condición de estrés hídrico, pues conforme aumenta, disminuye el agua fácilmente aprovechable en la zona radicular. En este trabajo las diferencias entre los tratamientos fueron en dos aspectos: el valor de FMA y el momento donde el valor de FMA se hizo mayor (inicio de la maduración de los frutos). Los tratamientos considerados fueron:

- T1: FMA igual a 12% durante todo el ciclo.
- T2: FMA igual a 47% durante todo el ciclo.
- T3: FMA igual a 12% hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial.
- T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

Se realizó una pequeña modificación a la fórmula propuesta por Zermeño *et al.*, (2007) que consistió en aumentar 12% el valor de la CC cuando la FMA fue igual a 12%, esto para garantizar que durante estos periodos las plantas no estuvieran sometidas a estrés hídrico. La aplicación de los tratamientos se hizo después de 21 DDT debido a que se reporta que el déficit hídrico en este periodo tiene efectos altamente perjudiciales para el cultivo de pimiento (Ngouajio *et al.*, 2008).

Las revisiones de humedad en todos los tratamientos se realizaron todos los días y la lámina de riego a aplicar se dividió en dos: la mitad a las 10:00 y el resto a las 16:00 horas.

El tiempo de reposición de humedad o de riego en el T1 fue de 85 segundos durante todo el ciclo, el del T2 de 160 segundos, en el T3 de 77 segundos antes del inicio de la maduración de frutos y de 191 segundos desde ese momento hasta la madurez comercial de

los frutos, en el caso del T4 de 172 segundos hasta antes del inicio de la maduración, de 87 segundos hasta el 119 DDT, y de 172 de ese momento hasta el trasplante.

Debido a las condiciones de infraestructura a cada cama se le asignó un tratamiento que se asignó aleatoriamente y la comparación entre medias de las variables obtenidas se realizó mediante la prueba de *t-student* para muestras independientes (Infante y Zarate, 1990).

V. RESULTADOS

5.1 Parámetros climáticos y edáficos

5.1.1 Temperatura y Humedad Relativa (HR)

La germinación y emergencia de semillas de pimiento morrón se llevaron a cabo a una temperatura de 25 ± 3 °C. Desde la emergencia hasta el trasplante, la temperatura promedio fluctuó entre 19 y 26°C, con una temperatura máxima promedio (TMax) de 24.78°C, una mínima promedio (TMin) de 20.05°C y una media (TMed) de 22.42°C.

Durante la fase de campo los valores de temperatura fluctuaron entre los 47 y los -3°C. Con una TMax de 39.6°C, una TMin de 6.2°C y una TMed de 22.9°C. En la Figura 5, se observa la tendencia semanal de la temperatura desde el inicio del trasplante hasta la madurez comercial. En la tendencia de la TMin pueden diferenciarse 3 fases, una de disminución progresiva desde la primera semana hasta el día 63 DDT, seguida de una con fluctuaciones casi simétricas, pero sin superar los 5°C, por último, se aprecia una fase de aumento progresivo desde el día 119 DDT hasta el final del experimento. La tendencia de la TMin se reproduce en la TMed con valores suavizados por efecto de la TMax, que presenta valores más o menos constantes desde la semana cuatro hasta la diecisiete.

La humedad relativa (HR) presentó valores extremos de 91 y 16 % durante la fase de campo. La tendencia de los valores promedios semanales máximos, mínimos y medios se observan en la Figura 5. Tanto la humedad relativa máxima (HRMax) como la mínima (HRMin) presentan tendencias casi constantes, variando sólo 5.8 y 4.9 unidades, respectivamente. Los valores máximo, medio y mínimo promedio fueron 86.1, 46.2 y 17.4 %, respectivamente. Aunque no se hicieron registros horarios de la temperatura y la HR, se observó que la TMax se presentaba entre las 14:00 y las 16:00 que correspondía con la HRMin y la TMin entre las 4:00 y 7:00 horas. Esta relación inversa se enmascara en la Figura 5 debido a que se realizó con promedios.

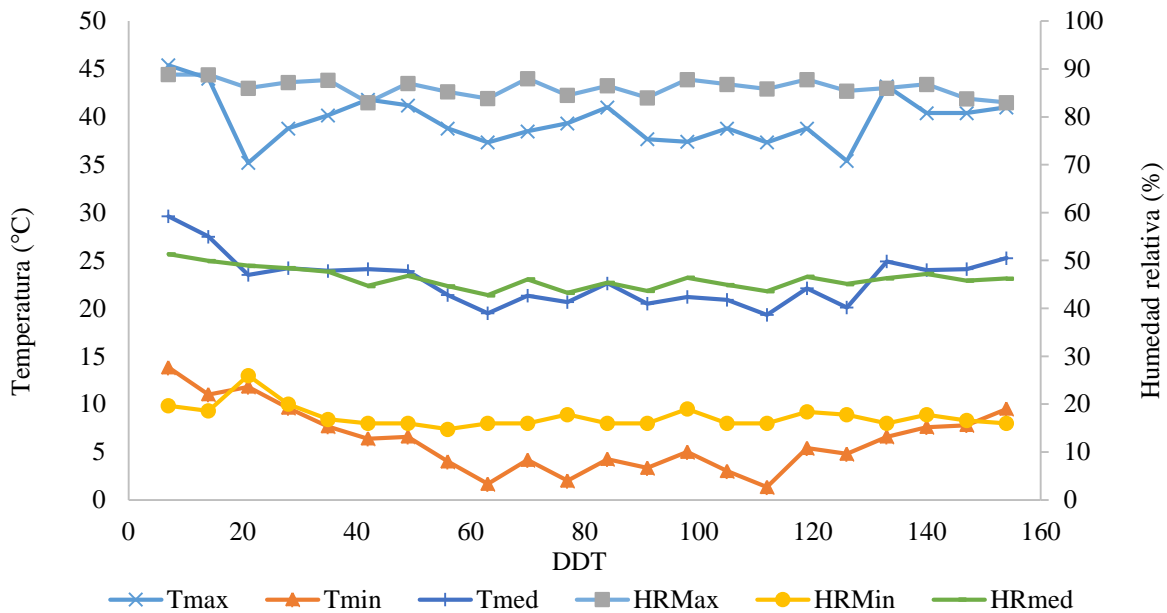


Figura 5. Temperatura y Humedad Relativa semanal en macro túnel durante el desarrollo de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos. Tmax = Temperatura máxima, Tmin = Temperatura Mínima, Tmed = Temperatura media, HRMax = Humedad Relativa máxima, HRMin = Humedad Relativa mínima, HRmed = Humedad Relativa media y DDT = Días Después del Trasplante

5.1.2 Evapotranspiración potencial (ET_o) y del cultivo (ET_c)

Con los valores de temperatura registrados en el presente experimento, se calculó la evapotranspiración potencial (ET_o) (Tabla 7) con el método de Hargreaves propuesto por la FAO en la guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos No. 56, este valor ha de tomarse con restricción debido a que fue recomendado para condiciones de cielo abierto.

Como puede observarse también en la Tabla 7, la ET_o total para el ciclo del cultivo fue igual a 510.66 mm. Recordando la ecuación presentada en la sección de riego en pimiento morrón que relaciona los valores de ET_o con los valores de ET_c , que los valores de Kc para el pimiento morrón son 0.6, 1.05 y 0.9 para la etapa inicial, media y final, respectivamente y que la duración de estas etapas es 35, 92, 26 para fines de este trabajo, calculadas como porcentaje del ciclo del cultivo según lo reportado por la FAO (1999) tenemos que la ET_c acumulada para todo el ciclo fue de 463.878 mm. La ET_o experimento disminuciones durante la mayor parte del ciclo de tal manera que la pendiente de una línea de mejor ajuste para estos

datos es de -0.6%. En el caso de la ET_c pueden diferenciarse 3 etapas, una de valores más o menos constantes hasta el día 35 DDT, seguido de una rápida subida para el día 42 DDT y al final, desde ese día hasta el final del ciclo, una disminución progresiva con pendiente de -0.9%.

Tabla 7

Evapotranspiración potencial (ET_o), evapotranspiración potencial acumulada (ET_o ac), evapotranspiración del cultivo para pimiento morrón (ET_c) y evapotranspiración del cultivo para pimiento morrón (ET_c ac) por el método de Hargreaves para el periodo 21 septiembre – 15 de febrero (2017 - 2018)

DDT	ET_o (mmd^{-1})	ET_o ac (mm)	ET_c (mmd^{-1})	ET_c ac (mm)
7	3.975	27.823	2.385	16.694
14	4.064	56.271	2.438	33.762
21	3.232	78.895	1.939	47.337
28	3.610	104.168	2.166	62.501
35	3.809	130.831	2.285	78.499
42	3.975	158.658	4.174	107.717
49	3.352	182.123	3.520	132.355
56	3.362	205.656	3.530	157.065
63	3.403	229.480	3.574	182.080
70	3.339	252.855	3.506	206.623
77	3.122	274.707	3.278	229.569
84	3.097	296.389	3.252	252.335
91	2.994	317.345	3.143	274.339
98	2.908	337.703	3.054	295.715
105	3.057	359.103	3.210	318.184
112	3.066	380.562	3.219	340.716
119	2.953	401.232	3.100	362.419
126	2.826	421.016	2.968	383.193
133	3.091	442.653	2.782	402.666
140	3.264	465.500	2.937	423.228

147	3.254	488.277	2.928	443.727
154	3.198	510.666	2.879	463.878

DDT = Días Después del trasplante

5.1.3 Humedad del suelo

De las pruebas realizadas en campo resultó que la capacidad de campo (CC) y la densidad aparente (Da) del suelo en los cuales se llevó a cabo este experimento fue de 22.83 % en peso y 1.1 gcm⁻³, cada uno. Como se mencionó en la metodología, el valor del punto de marchitez permanente (PMP) se calculó con una fórmula que lo relaciona con el valor de CC, así, resultó que el PMP es igual a 11.89% en peso.

La tendencia de la humedad en el suelo dependió de cada tratamiento, en el momento donde la planta se sometió a un mayor factor de abatimiento máximo permisible (FMA), puede observarse la disminución de la humedad (Figura. 6).

Hasta el día 21 DDT la humedad registrada de todos los tratamientos no es estadísticamente diferente, ya que durante este periodo la aplicación de agua fue la misma, después de estos días se observa una disminución drástica del T2 que, a pesar de diversas fluctuaciones se mantuvo por debajo de los demás tratamientos con un promedio en todo el ciclo de 16.38%, el caso opuesto se manifiesta en el T1 que durante la mayoría del ciclo presentó valores que se ubican por arriba de los demás tratamientos y con un promedio de 18.41%, estadísticamente diferente al T2 ($\alpha = 0.05$).

En el T3 se pueden distinguir dos fases, separadas en el día 70 DDT, la primera con promedio de 19.20% que no es estadísticamente diferente al T1 (19.34%) y una segunda con 15.21% la cual tampoco difiere estadísticamente del promedio (15.62%) del T2.

Para el T4 se diferencian 3 fases, divididas por los 63 y 119 DDT, con promedios de 18.32, 18.92 y 15.74%, respectivamente, que no son diferentes estadísticamente a los promedios del T2 (17.84%), T1 (18.12%) y T2 (15.75%) para estos mismos periodos.

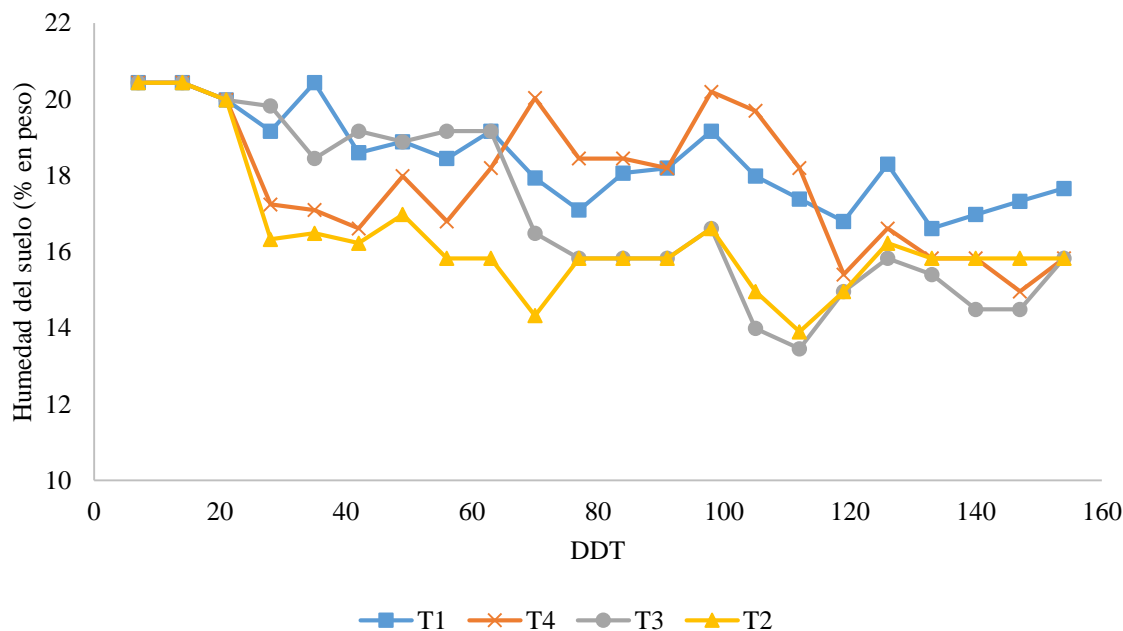


Figura 6. Tendencia de la humedad del suelo de un cultivo de pimienta morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

En la Tabla 8 se muestran las láminas totales aplicadas para cada tratamiento durante todo el ciclo y el consumo diario promedio. En los tratamientos 1 y 3 se aplicaron las láminas de agua más altas, con valores muy cercanos, por otro lado, el T2 y T4 requirieron las láminas de riego más bajas, con un valor ligeramente mayor al 75% del registrado en el T1 Y T4. A pesar de estas diferencias, estadísticamente, el T1, T2 y T3 no son diferentes estadísticamente y el T2 es igual al T4. Todas las láminas de riego encontradas en este experimento son mayores a los 463.878 mm de ET_c calculados para este mismo periodo.

Tabla 8
Lámina total aplicada y lámina promedio diaria de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	Lámina total (mm)	Lámina promedio diaria (mmd ⁻¹)
1	648.16a	4.37
2	503.52ab	3.40
3	640.58a	4.32
4	484.61b	3.27

*Medias seguidas por la misma letra no son diferentes estadísticamente según *t-student* ($\alpha = 0.05$)

5.2 Fenología

La emergencia de las plántulas de pimiento var. California Wonder se observó a los 14 Días Después de la siembra (DDS), a los 28, 40, 46 y 55 DDS se presentaron el primero, segundo, tercer y cuarto par de hojas verdaderas, respectivamente. A los 56 DDS se trasplantaron las plántulas. El séptimo par de hojas se presentó a los 27 DDT, la primera bifurcación a los 35 DDT, la floración a los 54 DDT, el inicio de la fructificación a los 70 DDT y la madurez comercial a los 147 DDT.

5.3 Altura

La altura promedio de las plantas al inicio del ciclo y al final se muestra en la Tabla 9. Al inicio del ciclo, la altura de las plantas en todas las camas fue estadísticamente igual, condición que cambia para el final del ciclo. El T2, sometido durante todo el experimento a déficit hídrico, presenta la mayor reducción en la altura, el resto de los tratamientos, tanto el T1 con humedad favorable y el T3 y T4 sometidos durante alguna de sus fases a carencia de agua, presentan valores estadísticamente similares.

Tabla 9
 Altura de plantas de pimiento morrón al inicio y al final del ciclo productivo bajo diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	Altura inicio (cm)	Altura final (cm)
1	8.9a*	33.69ab
2	7.9a	31.63b
3	7.85a	36.80a
4	8.15a	37.11a

Medias seguidas por la misma letra no son diferentes estadísticamente según *t-student* ($\alpha = 0.05$)

La Figura 7 muestra la tendencia en el crecimiento en la altura de plantas para cada tratamiento a lo largo del ciclo, la cual se asemeja a una curva sigmoideal. En ella puede observarse que todos los tratamientos experimentan patrones de cambio similares. Se aprecian tres fases, una que dura hasta el día 35 de valores comunes, que puede derivarse de que durante los primeros 21 días todas las plantas estuvieron sometidas a condiciones hídricas favorables y que coincide con valores relativamente bajos y constantes de ET_c , seguida de una donde se acelera el crecimiento desde el día 35 y hasta el día 63 y que coincide con la presencia de la primera bifurcación, desde el final de este periodo y hasta la cosecha, las tasas de crecimiento se diferencian para cada tratamiento y coinciden con el periodo de fructificación.

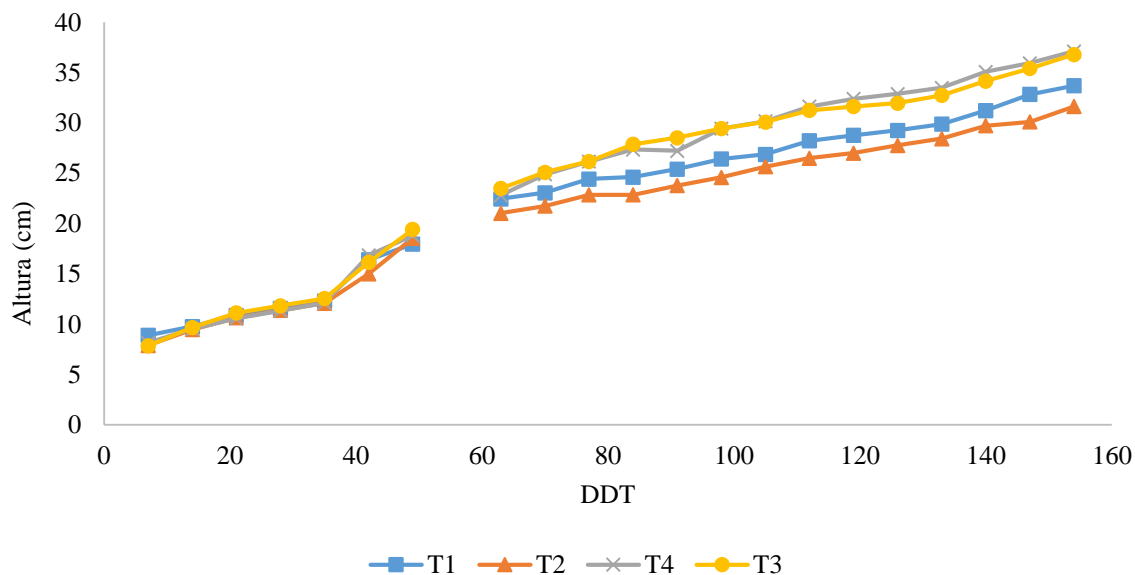


Figura 7. Evolución de la altura de plantas de un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

5.4 Número de bifurcaciones (NB)

Estadísticamente no se encontraron diferencias significativas en el NB. En los tratamientos se observa un crecimiento lineal de este parámetro, con una pendiente de 11.04% para el T4, que presentó el mayor número de bifurcaciones (15.11) y una de 9.42% para el T2 que presentó un valor de 12.63. (desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%. Ver la siguiente Figuraura.

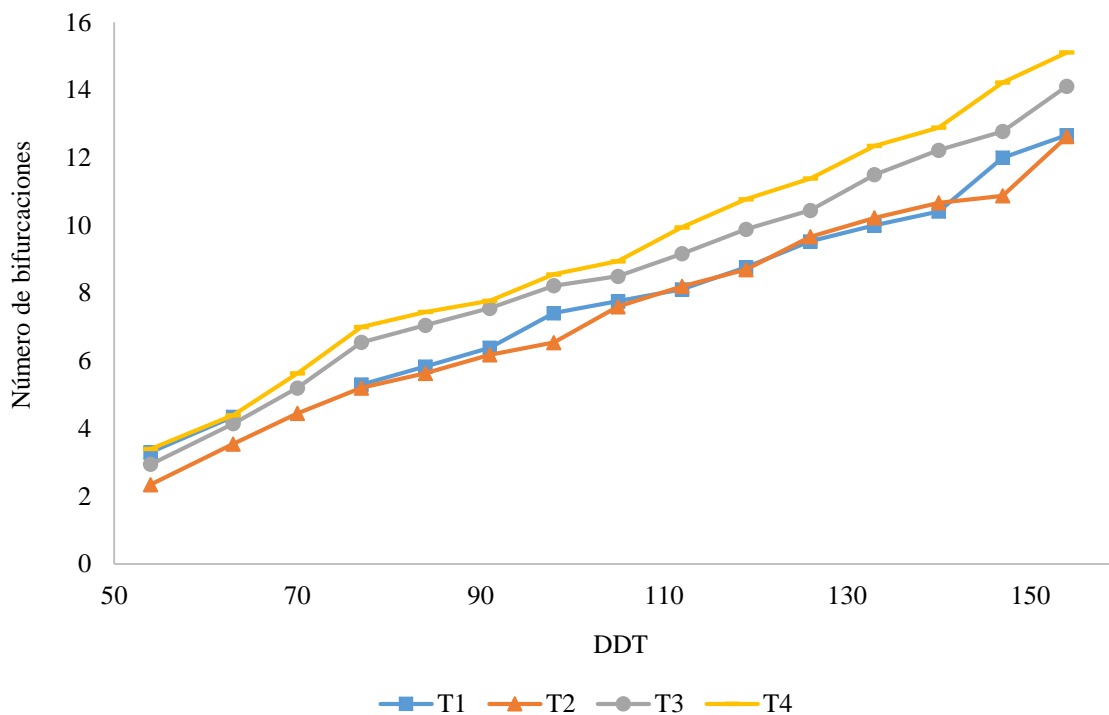


Figura 8. Número bifurcaciones en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12%

4.5 Número de Flores Abiertas (FA) y Caídas (FC)

En las Figuras siguientes (9 y 10) se muestra la frecuencia acumulada del número de flores abiertas (FA) y caídas (FC). El tratamiento con el menor FA es el T1, seguido por el T3 y el T2, con 30.47, 9.6 y 8.7% menos flores que el T4 (36.8), respectivamente. Sin embargo, todos los tratamientos son estadísticamente iguales. En esta variable como en algunas mencionadas anteriormente, los tratamientos experimentan una tendencia similar. Pueden observarse tres etapas, dos etapas donde el número de flores aumentó más rápido (desde el día 63 hasta el día 91 y del 126 al 154 DDT) y una intermedia con una tasa de cambio más lenta.

El T1 presentó el menor número de FC (14.06), en el T2, T3 y T4 se cayeron 29.16, 28.16 y 21.1% más flores que en el T1, respectivamente. Aunque el análisis estadístico muestra que estos datos no son diferentes al 95% de confianza. La tasa de cambio de esta variable es casi constante en todos los tratamientos durante todo el ciclo.

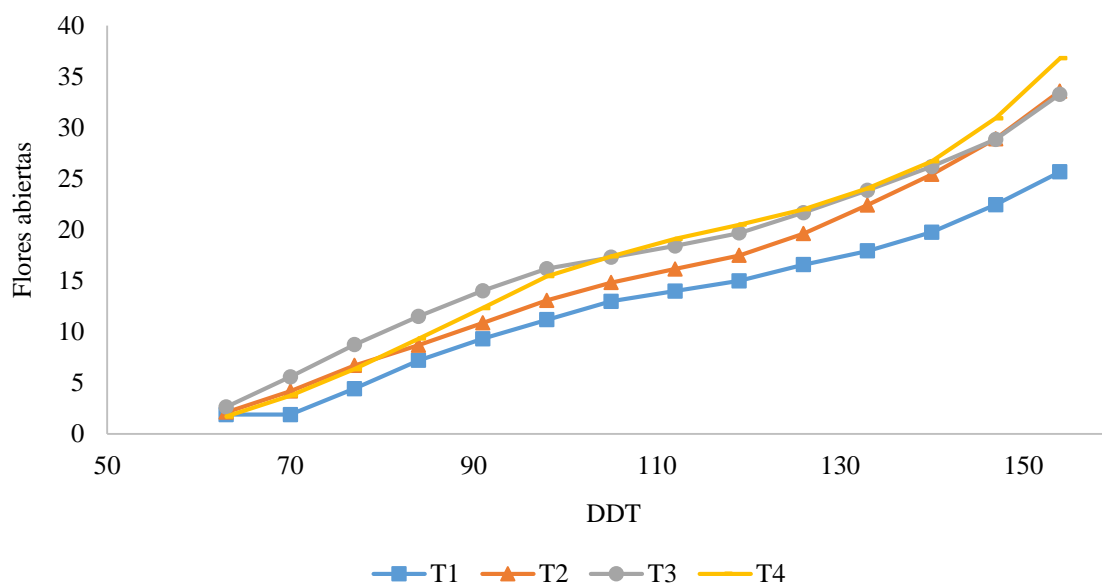


Figura 9. Número de flores abiertas en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

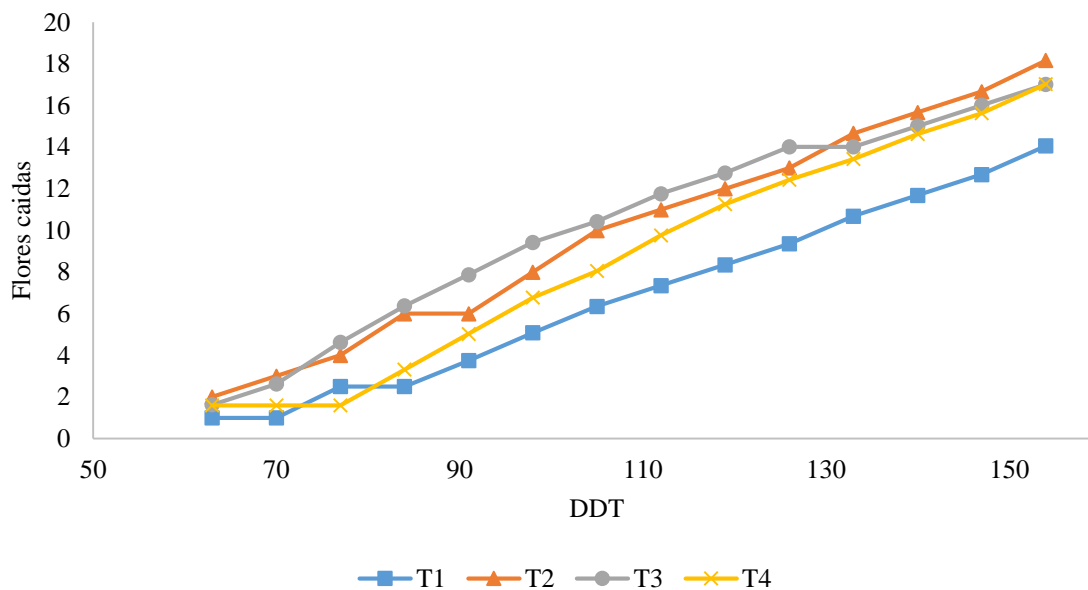


Figura 10. Número de flores caídas en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

5.6 Rendimiento y calidad de frutos

El Número de Frutos por planta (NF) durante todo el ciclo estuvo afectado por el régimen hídrico, esto puede apreciarse en la Figura 11 que muestra la dinámica del NF hasta antes de la primera cosecha. Estadísticamente, el tratamiento 3 es diferente a los demás que a su vez son iguales. Esta diferencia puede deberse a que durante los primeros 100 DDT el T3 presentó la mayor cantidad de flores abiertas, 23.62, 25.6 y 12% más que los T1, T2 y T4, esto permitió cuajar un número mayor de frutos que se mantuvieron hasta la cosecha y que representa en una tasa de crecimiento alta del número de frutos en los primeros 100 DDT con una pendiente de 7.19% y que se vuelve sólo del 2.79% para el resto de los días del cultivo.

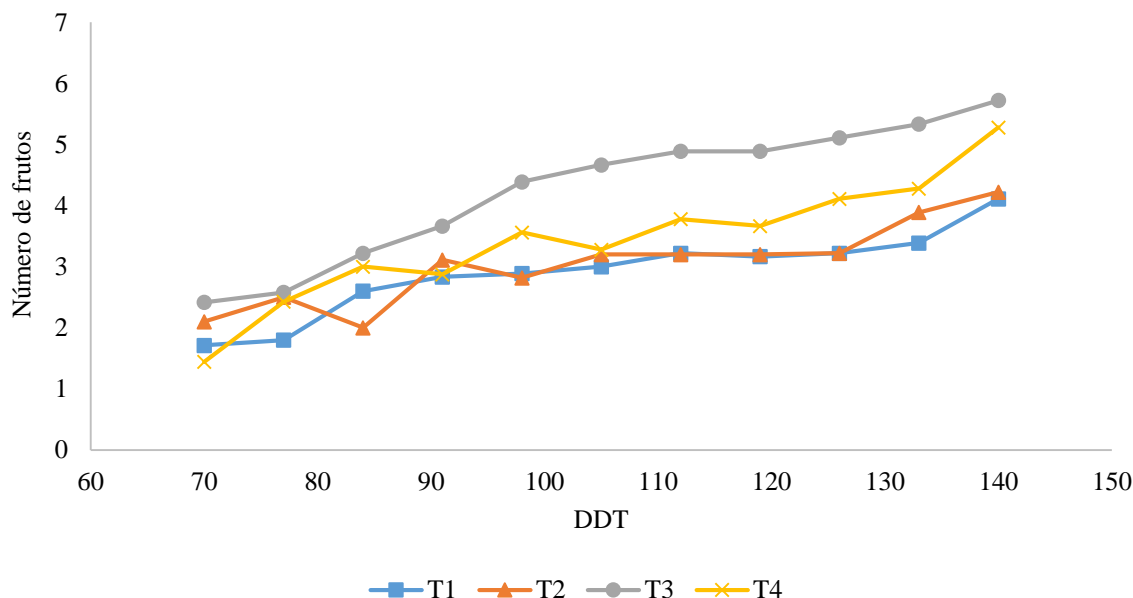


Figura 11. Número de frutos en un cultivo de pimienta morrón sometido a diferentes regímenes de riego. DDT = Días Después del Trasplante, T1= FMA igual a 12% durante todo el ciclo, T2 =FMA igual a 47% durante todo el ciclo, T3 = FMA igual a 12% desde después de 21 DDT hasta el inicio de la maduración de frutos y 47% desde el inicio de la maduración de frutos hasta la madurez comercial y T4: FMA igual a 47% desde el inicio del ciclo hasta el inicio de la floración, 12% desde el inicio de la floración hasta el 119 DDT y desde el 119 DDT hasta el final del ciclo 47%.

El T3 presentó el mayor NF pero el menor peso de fruto (PF), a su vez, los frutos del T4, menores en número al T3, fueron los más pesados y más grandes (según el DE y DP), esto podría llevar a pensar que existe una relación inversa entre las variables NF y PF, sin embargo, considerando el coeficiente de correlación (CC) resulta que, si bien existe una correlación negativa, esta no es significativa estadísticamente (Tabla 10).

El porcentaje de frutos cuajados (FCu) fue más alto en el T3 y T1, mientras que los valores más bajos fueron para el T2 y T4, que experimentaron déficit hídrico durante la etapa vegetativa. Las diferencias entre ambos grupos son alrededor de 5 unidades porcentuales (Tabla 10).

Influenciado por el NF el RP del T3 no es estadísticamente diferente al RP del T4, sin embargo, ha de considerarse que los frutos del T3 son de menor peso que los del T4 y el T1, lo que se demuestra en los porcentajes de frutos según categorías de calidad que se presenta en los siguientes párrafos. Las plantas del T2 que estuvieron sometidas durante todo el ciclo

a déficit hídrico presentaron los valores más bajos en todos los parámetros evaluados excepto en el NF.

Tabla 10

Valores de parámetros de fruto y coeficientes de correlación entre estos, así como rendimiento de un cultivo de pimiento morrón bajo diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	NF	FCu (%)	PF (g)	CC	RP (g)	RHa (Kgha ⁻¹)	DE (cm)	DP (cm)
1	4.43c*	17.24	80.330a	-0.116	356.246b	1079.533	6.76ab	5.23bc
2	4.48bc	13.47	67.929b	-0.172	304.205b	921.832	6.29b	5.10c
3	6.48a	19.48	66.184b	-0.320	428.874a	1299.616	6.52b	6.39ab
4	5.04b	13.97	96.389a	-0.195	486.138a	1473.143	7.04a	6.65a

NF= Número de frutos, FCu= Frutos cuajados, PF= peso de fruto, CC= Coeficiente de Correlación entre el NF y el PF, RP= Rendimiento por Planta, RHa= Rendimiento por Hectárea, DE= Diámetro Ecuatorial, DP= Diámetro Polar
*Medias seguidas por la misma letra no son diferentes estadísticamente según *t-student* ($\alpha = 0.05$)

Para categorizar el efecto de los tratamientos sobre la calidad de los frutos se elaboró la Tabla 11 que considera las dimensiones para establecer el porcentaje de frutos dentro de México calidad suprema y las tres categorías del *United States Standards for Grades of Sweet Pepper* del *United States Standards for Grades of Sweet Pepper* (2005) del *United States Department of Agriculture* (USDA). Según el Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial México calidad suprema en pimiento morrón, los frutos que se incluyen bajo la denominación de México calidad suprema no deben ser menores a 6.4 cm de longitud y de ancho. El *United States Standards for Grades of Sweet Pepper* menciona que los frutos dentro de la categoría *Fancy* deben tener un largo y ancho mayor a 7.62 cm (3 in), los de la categoría No. 1 mayor a 5.08 cm (2 in) y que frutos con dimensiones menores se encuentran dentro de la categoría No.2.

Los porcentajes resultantes de la clasificación por norma coinciden con los grupos de diferencias estadísticas del DE y DP. Los tratamientos con el mayor número de frutos en México calidad suprema y las categorías *Fancy* y No.1 del USDA son el T4 y el T1, que además tienen menos del 75% del NF en la categoría No.2. Sin embargo, más de la mitad de los frutos de todos los tratamientos se encuentran dentro de la categoría No. 2 del USDA y más del 95% de todos los frutos se encuentran en la categoría No. 1 y 2. Lo anterior sugiere

que además de que hubo un efecto del déficit hídrico, existen más factores que perjudicaron la calidad de los frutos en el experimento.

Tabla 11

Porcentaje de frutos dentro de la categoría México calidad suprema (MCS) y dentro de las categorías Fancy (USF), No. 1 (US1) y No. 2 (US2) del *United States Standards for Grades of Sweet Pepper* del *United States Department of Agriculture* (USDA)

Tratamiento	MCS	USF	US1	US2
1	15.20	2.94	32.84	64.22
2	4.85	0.00	21.36	78.64
3	10.58	1.95	21.45	76.60
4	20.18	3.92	42.77	53.31

Los frutos que se cosecharon se clasificaron en 4 grupos, según el tipo de anomalía observada: Frutos Normales (FN), Frutos Deformes (FD), Frutos Multicarpicos (FM) y Frutos con *Blossom* (FB). Los frutos multicarpicos presentaron más de 4 lóculos característicos de la variedad, eran aplanados y sólo mostraban vestigios de semillas. En la Figura 12 que a continuación se presenta, se muestran frutos representativos de estos grupos. El T1 y el T4, que fueron los tratamientos que no experimentaron limitaciones hídricas durante el crecimiento del fruto, presentaron los porcentajes más altos de FD, mientras que el T2 y el T3 difieren casi en 10% de los primeros (Tabla 12). El T1 presentó el porcentaje más alto de FM, difiriendo en casi 10% de T2 y T3 y casi en 20% del T4, lo que significa una disminución del porcentaje de FM en los tratamientos que presentaron por lo menos un periodo de escasez hídrica. Los porcentajes más altos de FB los presentan los tratamientos que experimentaron cambios en el régimen hídrico (T3 y T4).



a) Fruto normal



b) Fruto con *Blossom*



c) Vista superior de fruto multicarpico (derecha)



d) Vista lateral de fruto multicarpico (izquierda)



e) Vista interior de frutos multicarpicos



f) Vista lateral de fruto deforme

Figura 12. Frutos de pimiento morrón en un cultivo con diferentes regímenes hídricos: a) fruto normal, b) fruto con mancha de *Blossom* c) vista superior de un fruto normal (izquierda) y uno multicarpico (derecha), d) vista lateral de un fruto normal (derecha) y uno multicarpico (izquierda), e) vista interior de dos frutos multicarpicos y f) vista lateral de un fruto deforme

Tabla 12

Porcentaje de Frutos Deformes (FD), Frutos Multicarpicos (FM) y Frutos con *Blossom* (FB) por tratamiento en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	FD (%)	FM (%)	FB (%)
1	25.98	38.24	0.49
2	16.50	25.24	0.00
3	17.27	27.30	1.39
4	27.59	18.53	3.02

5.7 Raíz

El régimen hídrico tuvo efectos sobre la longitud de la Raíz (LR), la raíz del T4 fue 15% más larga que la del T1 y 15.5% que la del T3, sin embargo, estos tres tratamientos no son diferentes estadísticamente. El T2 sometido durante todo el ciclo a déficit hídrico fue el único que difirió estadísticamente, con casi el doble del valor del T1 y el T3 y 29.03% más que el T4 (Tabla 13).

Tabla 13

Longitud final de Raíz (LR) en un cultivo de pimiento morrón sometido a diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	LR (cm)
1	21.85b*
2	32.40a
3	21.74b
4	25.11a

*Medias seguidas por la misma letra no son diferentes estadísticamente según *t-student* ($\alpha = 0.05$)

5.8 Eficiencia de utilización del agua (EUAg)

La eficiencia de utilización del agua definida como la materia producida por cada litro de agua aplicada o la cantidad de agua requerida para producir un gramo de materia seca en cada tratamiento se muestra en el Tabla 14. El tratamiento que requirió la menor cantidad de agua para producir un gramo de materia fresca fue el T4 utilizando sólo 0.299 L, en otras palabras, por cada litro de agua se produjeron 3.34 g de fruto. En el caso contrario está el T1, que

utilizó 83% más agua para producir un gramo de materia fresca. El T2 y el T3 requirieron 66.6% y 50% más agua que el T4, respectivamente.

Dado que el valor de EUAg se deriva de la lámina de agua utilizada y del rendimiento por planta, resulta lógico que el valor obtenido para el T4 sea mayor; pues presentó el mayor rendimiento y requirió la menor lamina de riego. De esta manera, la aplicación de estrés hídrico durante la etapa vegetativa genera un aumento en la EUAg, lo que significa un ahorro de agua del 45.24% por cada unidad de materia producida. Aunque en el T2 y en T3 aumento la EUAg, hay algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta. El T2 presentó valores bajos de rendimiento y calidad de la producción y el aumento del rendimiento en el T3 está relacionado con una mayor producción de frutos de bajo peso y tamaño.

Tabla 14

Eficiencia de utilización de agua en un cultivo de pimiento sometido a diferentes regímenes hídricos

Tratamiento	EUAg (gL⁻¹)	EUAg (Lg⁻¹)
1	1.83	0.546
2	2.01	0.499
3	2.23	0.448
4	3.34	0.299

VI. DISCUSIÓN

El régimen hídrico tuvo efecto sobre las variables evaluadas en este experimento, sin embargo, existen algunas que parecen no sólo responder a esta condición, si no, a su interacción con otros factores y al efecto individual de estos. El factor ambiental que más influyó, además del déficit hídrico, fue la temperatura, debido a que presentaron los valores más alejados de las condiciones óptimas. Esta tuvo efecto en la mayoría de las variables evaluadas. Dentro de otras consideraciones por su influencia en procesos claves para el rendimiento final como el crecimiento y desarrollo de las plantas de pimiento, la producción de fotoasimilados y la germinación del polen (determinante del cuajado de frutos y en la producción de frutos deformes y multicarpicos) (FAO, 1994 citada por el Ruiz *et al.*, 2013).

Desde la siembra hasta el trasplante las plantas de pimiento no experimentaron problemas con la temperatura. La temperatura de 25°C durante la germinación y la de 24.78° desde la emergencia hasta el trasplante estuvieron dentro del rango óptimo (Cavero *et al.*, 1995, Zapata *et al.*, 1992 y SAGARPA, 2017). El número de días para emerger (14 DDS) fue semejante a los 12 DDS reportados por la SAGARPA (2017).

El problema de la temperatura se presentó en la fase de campo. El diferencial térmico máximo y promedio diario fue de 50° y 33.4°C, respectivamente. Aunque estos valores difieren entre sí en más de 15 unidades, son demasiado altos si se considera que el diferencial día-noche recomendado para el cultivo de pimiento sólo debe variar entre 5 y 8°C (Pilatti *et al.*, 1991). La TMed de 22.9°C y la TMax de 39.6°C fueron más altas que los 18 y 29°C respectivamente, recomendados por la FAO (1994) citado por el Ruiz *et al.* (2013) para el crecimiento del cultivo de pimiento. El valor de 6.2°C de TMin, estuvo por debajo del 7°C recomendado por esta misma institución para ese periodo. Así también, la TMin en este experimento está dentro del rango de TMin en el que se reduce drásticamente el porcentaje de viabilidad de granos de polen en esta especie (de 5 a 7°C) y la TMax fue más alta que los 35°C mencionados como temperatura máxima para la correcta germinación de granos de polen (Nuez, 1996).

Sumado a lo anterior, en doce días durante el ciclo del cultivo se presentaron temperaturas iguales o menores a 1°C; de estos, cinco fueron menores o iguales a 0°C y un

día se reportó una temperatura de -3°C . Lo que significó daños importantes para las plantas que se hiela a temperaturas menores a 1°C (Snyder *et al.*, 2010, Ibar y Juscafresa, 1987 citados por SEDEA, 2017). Aunque no se reporta en los resultados, pero sí en la metodología, el tratamiento más afectado por las heladas fue el T2, con un daño severo al 36% de las plantas, mientras que para el T4 fue del 6.6% y de 5.3% para los T1 y T3, esto sugiere que existe una relación entre la resistencia a las heladas y el régimen hídrico, de tal manera que plantas con un déficit hídrico sostenido durante todo el ciclo son más susceptibles que plantas bien regadas o que sólo experimentan déficit en una etapa. Esto podría estar relacionado con una menor producción de fotoasimilados durante todo el ciclo (que se discutirá más adelante) y a una translocación preferencial durante la floración (Aloni *et al.*, 1999) lo que significaría que en el T2 disminuyó el contenido de solutos en las células de los tejidos y así, la capacidad de las plantas de pimiento para resistir bajas temperaturas por acumulación de solutos en las células o endurecimiento. Bajo este supuesto, la presencia de bajas temperaturas, no extremas antes de presentarse los -3°C , significaría una fase de preparación para resistir el congelamiento por endurecimiento. Aunque en tomate se ha reportado que este proceso es poco frecuente (Larcher, 1982, citado por Snyder *et al.*, 2010) podría presentarse en pimiento morrón o estar influenciado por el déficit hídrico controlado. Por otro lado, Snyder *et al.* (2010) mencionan que hay una relación entre las plantas tolerantes a la sequía y las que son tolerantes al congelamiento. Esto tiene que ver con las membranas celulares que evitan la pérdida de agua o resisten en condiciones de plasmólisis, previniendo los daños de células por desecación secundaria en congelamiento extracelular y la pérdida de agua en sequía. Sin embargo, dado que en pimiento morrón ya se ha reportado que el enfriamiento genera daños en los fosfolípidos de las membranas celulares (Kong *et al.*, 2018), sumado a que las altas temperaturas modifican la fluidez de las membranas (Nilsen y Orcutt, 1996) y que no se encontró una gran diferencia entre los tratamientos con déficit hídrico en una parte del desarrollo y el que no experimentó déficit hídrico, la resistencia al congelamiento en cada tratamiento estaría más relacionada con el endurecimiento antes mencionado. Es importante mencionar que los trabajos dedicados a evaluar el efecto del frío en pimiento morrón están encaminados principalmente a evaluar el daño en frutos en almacenamiento (Shin *et al.*, 2007) dado que se da por sentado que el cultivo en campo es altamente susceptible (Snyder *et al.*, 2010).

En este experimento, la altura final fue diferente significativamente sólo en el tratamiento sometido durante todo el ciclo a déficit hídrico (T2) que presentó un valor promedio de 31 cm. El tratamiento con la mayor altura fue el T4 (estadísticamente igual al T3 y T2) con 37.11 cm. Esta variedad puede crecer de 50 hasta 150 cm (Moreno *et al.*, 2011; de Vilmorín, 1980; Benítez, 2015; Zapata *et al.*, 1992), lo que significó una reducción de la altura de por lo menos el 25.78% para los tratamientos T1, T3 y T4 y de 38% para el T2. El estrés hídrico (que no llega a agotar las reservas de agua en el suelo) por sí solo puede o no tener efectos adversos sobre la altura en *Capsicum* (Paongpetch *et al.*, 2010; Nieto *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2016; Delfine *et al.*, 2001) si los primeros 30 DDT se mantiene una alta humedad disponible (Villegas, 2013). Por otro lado, se reporta una reducción de la altura en pimiento por efecto de altas temperaturas (Hasanuzzaman *et al.*, 2016, Saha *et al.*, 2010), lo que se debe a un efecto perjudicial en el crecimiento a través de una afectación directa en la división celular, la elongación celular y la fotosíntesis (Nilsen y Orcutt, 1996). A partir de esto resulta conveniente considerar que la reducción de la altura en el T2 se debe a que durante más tiempo actuó un efecto combinado del estrés térmico e hídrico, que según Hasanuzzaman *et al.* (2016) es más perjudicial que si cada factor actúa independientemente y que la reducción de altura en los tratamientos 1, 3 y 4 se atribuye a la temperatura (Saha *et al.*, 2010). El mayor daño por combinación de estrés hídrico y térmico está ampliamente relacionado con la dificultad para aumentar la conductancia de las hojas (g_s) mecanismo usado para disminuir la temperatura de la planta (Hasanuzzaman *et al.*, 2016) y que disminuye cuando el pimiento se encuentra sometido a estrés hídrico (Delfine *et al.*, 2001) lo que significaría un daño mayor por aumento de temperatura.

Como se mencionó antes, el estrés por calor afecta el crecimiento por efecto directo sobre, la división celular, la elongación y la fotosíntesis. El efecto del estrés por calor sobre la alteración de la división celular está relacionado con la teoría cinética enzimática ya que la actividad enzimática es sensible a los cambios de temperatura (Nilsen y Orcutt, 1996). Específicamente se ve afectada la fase G_1 donde la célula se dedica a sintetizar proteínas, lípidos, carbohidratos, etc. La teoría cinético enzimática establece que aumentos en la temperatura provocan un aumento en las reacciones enzimáticas (de las que se sintetizan las macromoléculas antes mencionadas) hasta cierta temperatura óptima, pero después de esa temperatura, alrededor de los 45°C, comienza a producirse una desnaturalización térmica

(Grajales, 2005) que beneficia la velocidad de degradación en comparación con la de síntesis (Morales, 2006). La temperatura afecta la tasa de acción enzimática en dos sentidos, con daños a los sustratos y a las enzimas. La falta de división celular repercute en el número de células final con posibilidad de llevar a cabo la elongación.

El efecto sobre la elongación celular por las temperaturas altas está relacionado con la fluidez de las membranas (Nilsen y Orcutt, 1996) o permeabilidad de las membranas hacia el agua y con la síntesis de materiales para el crecimiento de la pared celular y de algunos compuestos que pueden ayudar a mantener un potencial de soluto negativo dentro de las células (Salisbury y Ross, 1994). El efecto sobre la síntesis de materiales de la pared celular y solutos es el mismo explicado anteriormente.

La reducción de la altura por efecto del calor sobre la fotosíntesis se debe a que en esta se generan los compuestos de donde la planta obtiene tanto energía como bloques de estructura para la biosíntesis de macromoléculas y a que el proceso de división celular (determinante del crecimiento) es altamente demandante de los dos (Grajales, 2004). Las razones de la disminución de fotosíntesis bruta cuando aumenta la temperatura son: un mayor incremento de la respiración, un efecto negativo sobre el fotosistema II (PSII) y la disminución de la acción de las enzimas Rubisco, Fructosa bifosfato y fosfatasa (Nilsen y Orcutt, 1996). Los principales sitios de inhibición son los tilacoides y el estroma (Wise *et al.*, 2004 citados por Durner, 2013).

En pimiento morrón el número de hojas está correlacionado con el número de nudos o bifurcaciones (Hernández, *et al.*, 2011). En este experimento no se encontró diferencia significativa entre tratamientos respecto al NB a pesar de que se ha reportado que el estrés hídrico disminuye el número de hojas en *Capsicum* (Khan *et al.*, 2008) y el área foliar total (Delfine *et al.*, 2001). Sin embargo, la tendencia es la disminución de nudos –y por lo tanto de hojas– en el tratamiento con déficit hídrico, T2. De cualquier forma, el que no exista diferencia estadística significativa en éste parámetro puede ser debido al efecto de la temperatura, ya que hay reportes que indican un efecto en el número de hojas, incrementándolo o disminuyéndolo, según sea la temperatura alta o baja, respectivamente (Prasad *et al.*, 2008 citados por Hasanuzzaman *et al.*, 2016, Mercado *et al.*, 1997 citados por Vidal, 2006).

Los valores de FA para el final del ciclo no muestran diferencia estadística significativa, lo que concuerda con los resultados obtenidos respecto al NB, ya que en pimiento morrón en cada bifurcación se genera una flor solitaria (de Vilmorín, 1980). Al contrario de lo observado en este trabajo, Ferrara *et al.* (2011) reportan que el déficit hídrico en pimiento morrón tiende a disminuir el número de flores si se aplica en el periodo vegetativo, esta diferencia puede derivarse del agotamiento de agua permitido, pues estos autores admitieron que el ADT disminuyera hasta valores de entre 15 y 35%, mientras que en este experimento se mantuvo hasta antes de llegar al 50%. Erickson y Markhart (2001) concuerdan con los resultados de este experimento, pues encontraron que el déficit hídrico no genera un efecto adverso en el número de flores en pimiento. El efecto del estrés hídrico puede o no influir en el momento de la aparición de las primeras flores; Jaimez *et al.* (2000) encontraron un retraso en la floración de plantas de *Capsicum chinense*, mientras que Pérez *et al.* (2016) reportan un adelanto de dos días para algunas variedades en esta misma especie y concluyen que el efecto del déficit hídrico sobre el momento y cantidad de aparición de las flores depende del genotipo. En este experimento el T3, muestra una mayor generación de flores durante los primeros días después de iniciado este proceso, lo que significaría que el genotipo usado (California Wonder) tiende a aumentar la producción de flores durante los primeros días de floración cuando experimenta un cambio de régimen hídrico negativo en la etapa reproductiva, aunque al final el número de flores totales es igual.

El pimiento morrón tiene el inconveniente de presentar un bajo porcentaje de frutos cuajados (FCu) (Zapata *et al.*, 1992) con valores promedio entre el 20 y 25% (Ferrara *et al.*, 2011; Breulis y Pochard, 1975). Se ha demostrado que el déficit hídrico en diferentes etapas puede (Dorji *et al.*, 2005) o no generar un efecto en esta variable (Ferrara *et al.*, 2011; Erickson y Markhart, 2001). Esto concuerda con lo obtenido en este experimento, donde no se encontraron diferencias significativas de los tratamientos sobre el FC. Dado que el porcentaje de FCu en todos los tratamientos es menor que el reportado en bibliografía, dicha disminución puede atribuirse a la temperatura ya que se ha comprobado que las bajas temperaturas en pimiento disminuyen el porcentaje de frutos cuajados (Aloni *et al.*, 1999; Vidal, 2006) y que ese mismo efecto lo tienen las altas temperaturas (Nuez, 1996; Erickson y Markhart, 2002; Wien, 1999 citado por Moreno *et al.*, 2011) sobre todo cuando están asociadas con bajas humedades relativas (Erickson y Markhart, 2002). La reducción de frutos

cuajados por efecto de altas temperaturas está relacionada con una extensión del estilo más allá del de las anteras o acortamiento de los estambres, lo que podría resultar en la falta de autopolinización, o una disminución de la concentración en los niveles de auxinas en los órganos reproductivos (Huberman *et al.*, 1997 citado por Saha *et al.*, 2010) y a una redirección de asimilados (Wahind *et al.*, 2007; Vidal, 2006); existe cierta controversia acerca de la redirección de los asimilados, Wahind *et al.* (2007) y Vidal (2006) mencionan que es lejos del tejido reproductivo, sin embargo, Aloni *et al.* (1999) encontraron que puede ser en dirección a los botones florales y que esto generaría los frutos partenocarpicos aplanados y sin semillas.

Así, las bajas temperaturas en pimiento morrón durante el desarrollo del botón floral producen frutos con ovarios múltiples o frutos que se distribuyen alrededor del principal (Aloni *et al.*, 1999, Vidal, 2006, Zamora, 2016). Estos frutos pueden resultar de un proceso denominado partenocarpia estimulante, donde la temperatura inhibe la fertilización y del que resultan frutos sin semillas viables o pueden derivarse de una deformación de los botones florales que se hacen más anchos por una mayor acumulación de reservas (Aloni *et al.*, 1999). Además de tener múltiples ovarios y vestigios de semillas, estos frutos se caracterizan por ser de un tamaño pequeño ya que se reduce la producción de giberelinas (GA) provenientes de semillas, hormonas involucradas en el crecimiento normal de los frutos (Durner, 2016). Tanto la baja fertilización de los granos de polen como el ensanchamiento de los botones florales pueden ser procesos que actúen al mismo tiempo (Polowick and Sawhney, 1985 citados por Aloni *et al.*, 1999). En este trabajo, el FD y FM parece no responder a los tratamientos, por lo que la presencia de estos frutos se atribuye al efecto térmico.

Aunque las condiciones adversas de temperatura pueden generar un efecto sobre la presencia de FB (Jovicich *et al.*, 2004) en este experimento esta variable estuvo relacionada con el régimen hídrico, en los resultados puede apreciarse que los tratamientos que experimentaron cambios en el régimen hídrico (T3 y T4) presentaron los mayores porcentajes de estos frutos. Dorji *et al.* (2005) en un trabajo con *Capsicum annum* Ancho St. Luis encontraron que el déficit hídrico aumenta la cantidad de FB en casi 30%. Debido a que en este experimento el aumento de los FB fue mayor al encontrado por Dorji *et al.* (2005), podría

pensarse que el efecto del estrés hídrico sobre esta variable se ve aumentado por su interacción con la temperatura.

Los diámetros del fruto en pimiento morrón están altamente influenciados por el genotipo y el manejo agronómico según Moreno *et al.* (2011) y Saha *et al.* (2010), dentro de un grupo de híbridos Moreno *et al.* (2011) encontraron que los DP o largo del fruto pueden ir desde los 8.5 hasta los 5 cm y el DE o ancho del fruto de los 9.2 a los 7.4 cm. Por su parte Saha *et al.* (2010), en un experimento con 12 variedades diferentes de pimiento dulce, reportan valores de DP promedios en condiciones normales desde 12.1 hasta 5.95 cm y de DE desde los 6.6 a los 2.3 cm. En el presente experimento los DP de los frutos de todos los tratamientos están dentro del rango descrito por Moreno *et al.* (2011), mientras que solo los T3 y T4 son parte del grupo que menciona Saha *et al.* (2010) para esta variable. Por otro lado, los valores de DE para todos los tratamientos, son más bajos que el valor inferior en el grupo de Moreno *et al.* (2011) y a excepción del T2 y el T3 (que están dentro de del rango) son superiores a los valores mostrados por Saha *et al.* (2010). Las diferencias pueden estar relacionadas con la variedad usada, ya que Moreno *et al.* (2011) usaron variedades mejoradas, o con el manejo agronómico, pues estos mismos autores llevaron a cabo su experimento en condiciones de hidroponía. Saha *et al.*, (2010) reportan que hay una mayor relación entre el genotipo y el DP y DE que entre estos dos parámetros y la temperatura, lo que significaría cierta independencia entre estos parámetros y las condiciones estresantes de temperatura, sin embargo, Hasanuzzaman *et al.* (2016) menciona una disminución de los parámetros de calidad en pimiento morrón por efecto de altas temperaturas.

Así como el genotipo usado y el manejo agronómico influyen en los diámetros de los frutos, también tienen efecto en el PF. Moreno *et al.* (2011) reportan valores que van de los 98.0 g hasta los 178.7 g, mientras que Saha *et al.* (2010) encontraron valores que van de los 7.44 hasta los 125.00 g. Los PF de todos los tratamientos en este experimento están dentro del rango manejado por Saha *et al.* (2010), sin embargo, son menores a los encontrados por Moreno *et al.* (2011),

El tratamiento con los frutos más pequeños según el DE, el DP y el PF fue el T2 –nuevamente el tratamiento con déficit hídrico–, con casi todos estos parámetros significativamente iguales al T3. A partir de esto queda de manifiesto que el déficit hídrico

durante todo el ciclo y durante la maduración de los frutos de pimiento tienen efectos negativos sobre la calidad de los frutos, mismo comportamiento que se observa en la clasificación elaborada a partir de México Calidad Suprema y del *United States Standards for Grades of Sweet Pepper del United States Department of Agriculture (USDA)*, donde los porcentajes más altos de estos dos tratamientos se encuentran dentro de las categorías de menor calidad. El caso contrario está en el T4, que fue sometido sólo durante la etapa vegetativa a déficit hídrico y que muestra las mejores características de calidad del fruto, estadísticamente iguales o superiores al tratamiento control. Estos comportamientos difieren de lo hallado por Boicet *et al.* (2001), Rodríguez *et al.* (2014) y Peng *et al.* (2015) citado por Li *et al.* (2017) quienes establecen que el estrés hídrico durante la maduración del fruto puede beneficiar o no afectar la calidad de los frutos de pimiento. También, es contrario a lo reportado por Rodríguez *et al.* (2014) quien menciona que disminuciones constantes de agua durante todo el ciclo no tienen efectos sobre estos parámetros. Por otro lado, nuestros resultados concuerdan con Ferrara *et al.* (2011), Song *et al.* (2002) citado por Li *et al.* (2017) y Chen *et al.* (2009) citados por Li *et al.* (2017) quienes mencionan que la falta de disponibilidad de agua durante la floración y fructificación perjudica la calidad del fruto, y con Delfine *et al.* (2001) y Ngouajio *et al.* (2008), quienes indican que la reducción del agua durante el periodo vegetativo no perjudica las características de los frutos. Las divergencias en estos resultados pueden deberse a los niveles de déficit hídrico usados y a las variedades utilizadas, ya que, como se mencionó anteriormente, existe diferente susceptibilidad al estrés hídrico de acuerdo al genotipo considerado (Pino, 2015).

En el trabajo de Moreno *et al.* (2011) los RP se encuentran entre los 958.2 g y los 1 922.2 g en el de Saha *et al.* (2010) van de los 82.33 a los 242.50 g y en el de Nuez *et al.* (1996) son en promedio de 1666.7 g. Los rendimientos en este trabajo (304.205 a 486.138 g) son superiores a lo obtenidos por Saha *et al.* (2010), pero están por debajo del rango mostrado por Moreno *et al.* (2011) y Nuez *et al.* (1996).

Debido a que el rendimiento por planta se deriva del NF y el PF, las consideraciones del párrafo anterior sirven para explicar las diferencias en este parámetro. Es necesario mencionar algunos aspectos más. El tratamiento con el mayor NF fue el T3, que experimento déficit hídrico durante la etapa reproductiva, como se mencionó antes, esto puede estar

relacionado con un aumento de las FA durante los primeros días de la etapa reproductiva, lo que le permitió a este tratamiento cuajar una mayor cantidad de frutos antes que los demás tratamientos. Además, el tratamiento control mostro el valor más pequeño de NF por lo que a pesar de presentar frutos de la mayor calidad significo un RP estadísticamente igual al T2 (déficit hídrico). Considerando que el momento de aparición de las primeras flores depende del genotipo (Pérez *et al.*, 2016) esto indicaría que la variedad usada en este experimento tiende a aumentar el número de flores durante los primeros días en respuesta al déficit hídrico, a pesar de que al final, el número de flores total sea igual al de plantas que son o no sometidas a este tipo de estrés. A razón de esto Pérez *et al.* (2016) observaron un adelanto de la floración por efecto de estrés hídrico en chile habanero. Ferrara *et al.* (2011) encontraron disminuciones del NF tanto para plantas bajo déficit hídrico durante la etapa reproductiva como en la etapa vegetativa, mientras que Ngouajio *et al.* (2008) no encontraron cambios en el NF según el régimen hídrico.

En resumen, el T4, sometido solo durante la etapa vegetativa a estrés hídrico mostro los mayores rendimientos y calidad de frutos, los valores de calidad de este tratamiento son similares al tratamiento control, tratamiento que difiere en rendimiento con el T4 porque mostró el menor NF. El rendimiento del T3 es similar al del T4, sin embargo, la calidad de los frutos es menor. El T2 presentó los valores más bajos de rendimiento y calidad de frutos, pero debido a un valor más o menos elevado de NF su rendimiento es similar al del tratamiento control. La reducción en el rendimiento del T2 respecto a los demás tratamientos o el mayor rendimiento en los tratamientos T3 y T4 comparado con el T2 puede deberse a una menor producción de biomasa en el T2 por efecto dañino del estrés hídrico y térmico combinado, además de una mayor producción de fotoasimilados de los T3, T4 y control debido a que una disponibilidad hídrica permite mantener más tiempo abiertos los estomas junto con una mayor facilidad de toma de nutrimentos en suelos más húmedos (Nilsen y Orcutt, 1996) que además beneficia la producción de compuestos como ATP que según Delfine *et al.* (2001) es el causante de la limitación de la fotosíntesis cuando el estrés hídrico se desarrolla lentamente, a una translocación de fotoasimilados preferencial que se derivaría de una modificación de los sumideros de carbono (Aloni *et al.*, 1999, Delfine *et al.*, 2001) hacia los sitios reproductivos y a los efectos específicos del estrés hídrico por etapa como la ausencia de daño al aparato fotosintético si el déficit hídrico es aplicado durante los primeros

dos meses (Delfine *et al.*, 2001). El menor rendimiento en el tratamiento control respecto a los T3 y T4, podría deberse a una lixiviación o percolación de nutrientes en el suelo por mayor aplicación de agua (Ngouajio *et al.*, 2008) que concordaría con las láminas reportadas en los resultados. A su vez, la diferencia entre el tratamiento control y el T4 podría estar relacionado con el mayor crecimiento de la raíz cuando se aplica déficit hídrico en la etapa vegetativa (la longitud de la raíz final fue similar entre el T2 y el T4) lo que le permitiría una mayor disponibilidad de nutrientes y agua en la etapa reproductiva (Pace *et al.*, 1999 citado por Ngouajio *et al.*, 2008). La diferencia entre el T3 y el tratamiento control estaría explicada por la translocación de fotoasimilados preferencial a los sitios reproductivos cuando la planta es sometida a estrés hídrico durante la etapa reproductiva (Delfine *et al.*, 2001, Aloni *et al.*, 1999) efecto que también se ha observado en arroz y trigo (Hasanuzzaman *et al.*, 2016). Y la diferencia entre el T3 y el T4 se debería a una correlación negativa entre el NF y el PF que se muestra a través del coeficiente de correlación y que también es mencionado por Moreno *et al.* (2011), a la mayor longitud de raíz y al efecto dañino sobre el fotosistema.

Necdet *et al.* (2004) recomienda una lámina de riego de 759 mm para pimiento durante todo el ciclo, mientras que Jim (2010) recomienda la aplicación de 600 mm. La lámina de agua aplicada para el tratamiento control es algo mayor a los 600 mm recomendados por Jim (2010) y la lámina diaria en este tratamiento un poco superior a la recomendada en campo, igual a 4 mm diarios en este tipo de cultivos. Es importante mencionar que las láminas fijas recomendadas son valores arbitrarios y lo más prudente es realizar cálculos para medir la ET_c que representa los requerimientos reales del cultivo. El valor de ET_c calculado a partir del método de Hargreaves en este trabajo (463.878 mm) es menor a todas las láminas de riego aplicadas en los tratamientos. Esto, por una parte, podría significar que se cubrieron las necesidades hídricas en todos los tratamientos, sin embargo, se ha demostrado que el método de Hargreaves puede subestimar los valores de ET_c en invernadero, pues se basa en el uso de valores de temperatura cuando la ET_c en estas condiciones está más relacionado con la radiación (Esmeral, 2011).

El tratamiento con el que se consiguió la mayor EUag fue el T4, debido a que presentó el mayor rendimiento y requirió de la lámina más baja de agua. Esto coincide con Ngouajio *et al.*, (2008) y Delfine *et al.* (2001) quienes reportan que cuando el estrés hídrico es aplicado

durante la etapa vegetativa, aumenta la eficiencia de utilización del agua. Uno de los factores claves para conseguir el aumento en la eficiencia cuando se somete la planta a déficit hídrico durante la etapa vegetativa puede ser el uso de acolchado ya que se disminuye la pérdida de agua por evaporación del suelo (Delfine *et al*, 2001).

VII. CONCLUSIONES

El efecto del déficit hídrico sobre el rendimiento y la calidad de frutos en pimiento morrón var. California Wonder depende de la etapa de aplicación. El manejo de estrés hídrico en la etapa vegetativa (FMA igual a 47% del agua total disponible en el suelo) mejora el rendimiento en 36.46% y calidad de los frutos, mientras que aplicaciones de estrés hídrico durante la etapa reproductiva (FMA igual a 47% del agua total disponible en el suelo cuando comienza el cuajado de frutos) mejora el rendimiento en 20.39%, pero disminuye la calidad de los frutos. El déficit hídrico sostenido (FMA de 47% del agua total disponible en el suelo) disminuye el rendimiento en 14.6% y la calidad de los frutos.

Con el uso de déficit hídrico durante la etapa vegetativa aumenta la eficiencia de utilización del agua, con lo que se consigue un ahorro del 45.24% por cada unidad de materia producida.

La temperatura más baja o alta que la óptima para las plantas de pimiento tienen efectos negativos sobre parámetros de crecimiento y desarrollo, como en: la altura, el número de brotes, el número de flores caídas y el número de frutos multicarpicos y deformes.

VIII. REFERENCIAS

- Aguirre H.E. y Muñoz O.V. 2015. El chile como alimento. En:
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/66_3/PDF/Chile.pdf Fecha de consulta el 17 de octubre de 2018.
- Aloni B., Pressman E. y Karni L. 1999. The effect of fruit load, defoliation and night temperature on the morphonology of pepper flower and fruit shape. *Annals of Botany*. 83(5): 529-534.
- Apel K. y Hirt H. 2004. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Annu. Rev. Plant. Biol.* 55: 373-399.
- Ashraf M. y Foolad M.R. 2007. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Expe. Bot.* 59, 206-216.
- Barrios D.J.M., García L.M.C., Castellanos J.Z., Alcántara G.G., Tijerina C.L. Rodríguez M.L. y de las Nieves M. 2006. Efecto del sistema de riego y tensión de humedad del suelo en rendimiento y calidad del ajo. *Terra Latinoamericana*. 24 (1): 75-81.
- Bartles D. y Kotchoni S.O. 2003. Water stress induces the up-regulation of a specific set of gens in plants: aldehyde dehydrogenases as an example. *Bulg. J. Plant Physio., Special Issue*, 37-51.
- Bhargava S. y Sawant K. 2013. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding*. 132: 21 – 32.
- Benítez V.S. 2015. Los chiles de México (del género *Capsicum*). UNAM. Primera edición. Estado de México, México.
- Biswas T., Zhengfei G y Wu F. 2018. An overwiev of the U.S. bell pepper Industry. Universidad de Florida. En: <https://grec.ifas.ufl.edu/media/grecifasufledu/images/zhengfei/FE---Bell-Pepper.pdf> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Boicet F. T., Verdecia S. J., Pujol O. P., Alarcón Z. A., Boudet A. A. D. 2001. Respuesta de producción del cultivo del pimiento (*Capsicum annum* L.) al riego deficitario en un periodo fuera de la época. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 10 (4): 75-78.
- Botta A. y Tort V. 2015. El chile en el mundo. Trabajo final de la carrera Técnico Superior en Gestión Gastronómica. Instituto Superior N° 4044 “Sol”. En:
<http://repotur.yvera.gob.ar/bitstream/handle/123456789/5668/El%20Chile%20en%20el%20Mun>

[do%2C%20completa%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#) Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.

Burek P., Satoh Y., Fischer G., Taher K.M., Scherzer A., Tramberend A., Nava F.L., Wada Y., Eisner S., Florke M., Hanasaki N., Magnuszewski P., Cosgrove B. y Wiberg D. 2016. Water Futures and Solution. International Institute for Applied Systems Analysis. En: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/1/WP-16-006.pdf> Fecha de consulta el 12 de octubre de 2018.

Cajumban A.A. 2018. Plant stress physiology. ArclerPress. 1^{era} ed. New York, United States of America.

Casilimas H., Bojacá C. R. y Monsalve O. 2012. Manual de producción de pimiento morrón bajo invernadero. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Primera edición. Colombia.

Castellón M.E., Chávez S.L., Carrillo R.J.C. y Vera G.A.M. 2012. Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. Rev. Fitotec. Mex. 35(5): 27-35.

Catalán V.E.A., Sánchez C.I., Villa C.M., Inzunza I.M.A. y Mendoza M.S.F. 2007. Programa para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico No 7. INIFAP. Gómez Palacio, Durango.

Cavero J., Gil O.R., Zaragoza C. 1995. Efecto de la temperatura en la germinación y la emergencia de tres variedades de pimiento para industria. Invest. Agr.: Prod. Pret. Veg. 10 (2): 155 – 166

Chamú B.J.A., López O.A., Ramírez A.C., Trejo L.C. y Martínez V.E. 2011. Respuesta del pimiento morrón al secado parcial de la raíz en hidroponía e invernadero. Rev. Mex. De Cien. Agr. 2(1): 97-110.

De Vilmorin D.F. 1980. El cultivo de pimiento dulce tipo bell. Editorial Diana. México.

Delfine S. Loreto F. y Alvino A. 2001. Drought-stress Effects on physiology, growth and biomass production if rainfed and irrigated bell pepper plants in the Mediterranean region. J. Amer. Soc. Hort.Sci. 126 (3): 297-304.

Díaz A. D. M., Vélez S. J. E., Rodríguez H. P. 2016. Efecto de la aplicación de riego controlado en la producción y calidad de fruto de *Pyrus communis* L. cv Triunfo de Viena. Acta agronómica. 65 (2): 156-163.

Dorji K., Behboudian M.H. y Zegbe D.J.A. 2005. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. Scientia Horticulturae. 104: 137-149.

- Durner E.F. 2013. Principles of Horticultural Physiology. CABI Publishing. 1era ed.
- Erickson A.N y Markhart A.H. 2001. Flower production, fruit set, and physiology of bell pepper during elevate temperature and vapor pressure deficit. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 126(6): 697 – 702.
- Escalante S.R.I. y Catalán H. 2008. Situación actual del sector agropecuario en México: perspectivas y retos. Economía informa. 350: 7-25.
- Esmeral V.Y.R. 2011. Análisis de la evapotranspiración real en el cultivo de rosa. Trabajo de grado para obtener el título de Magister en Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- FAOSTAT. 2018. Datos por cultivo. En: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC/visualize> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Fernández J.E., Romero R., Pérez A. y Cuevas M.V. 2015. Estrategias y programación de riego. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla. En: http://digital.csic.es/bitstream/10261/130206/1/Manual%20de%20riego_Jefer2015.pdf Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Ferrara A., Lovelli T., Di T. y Perniola M. 2011. Flowering, growth and fruit setting in green house bell pepper under water stress. Journal of Agronomy. 10(1): 12 – 19.
- Flores J.M.L. y Sánchez V.C. 2012. Inteligencia de mercado de pimiento morrón verde. Centro de Investigaciones biológicas del Noroeste. En: <http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/2791/inteligencia-mercado-pimiento.pdf> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1999. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Manual No 56. En: <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf> Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Gómez F.R. Manual de riego para agricultores: módulo 1. Fundamentos de riego. Consejería de Agricultura y pesca. Andalucía. España. En: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160941Fundamento_del_riego_1.pdf Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Infante S.G. y Zarate L.G.P. 1990. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Trillas. 2° ed. México.

- Ismail M.R. y Davies, W.J. 1997. Water relations of Capsicum genotypes under water stress. *Biology Plantarum*, 39(2), 293-297.
- Jiménez L.P., Bugarin M.R., Castro B.R., Sánchez M.A.L., Cruz C.E., Juárez R.C.R, Alejo S.G., Balois M.R. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. Universidad Autónoma de Nayarit. En: <http://fuente.uan.edu.mx/publicaciones/03-08/4.pdf> Fecha de consulta el 19 de agosto de 2017
- Jim R. 2010. Producción de pimiento bajo malla sombra. *Hortalizas*. En: www.hortalizas.com.mx Fecha de consulta el 2 de enero de 2019.
- Khan M.A.I., Farooque A.M., Haque M.A., Rahim M.A. y Hoque M.A. Effects of water stress at various growth stages on the physio-morphological characters and yield in chilli. *Agri. Res.* 33(2):353-362.
- Kong X., Wei B., Gao Z., Zhou Y., Shi F., Zhou X., Zhou Q. y Ji S. 2018. Changes in membrane lipid composition and function accompanying chilling injury in bell pepper. *Plant Cell Physiol.* 59 (1): 167-178.
- Krupa S.V. y Kickert R.N. 1989. The greenhouse effect: impacts of ultraviolet-B (UV-B) radiation, carbon dioxide y ozone on vegetation. *Environ. Pollut.* 61(4):263-293.
- López O.A., Baca C.G.A. y Fernández P.Y.L. Soluciones nutritivas para inducir cambios de concentración de N, P, K en plantas de mango. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 2 (6):867-883.
- Mendoza R. 2006. Sistemática e historia del ají Capsicum Tour. *Universalia* 11(2):80-88.
- Molina M. 2012. Riego deficitario. En: <http://lan.inea.org:8010/web/materiales/web/riego/anuncios/trabajos/Riego%20deficitario.pdf> Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Montoya A.G. 2000. Efecto de tensiones de humedad del suelo en tomate, variedad tequila, bajo condiciones de riego por goteo y sin acolchado plástico en suelos arcillosos compactados en el valle de Yaqui ciclo P/V 2000. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Instituto Tecnológico de Sonora.
- Moradi P. 2016. Key plant products and common mechanisms utilized by plants in wáter déficit stress responses. *Botanical Sciences.* 94 (4): 657 -671.
- Morales D., Rodríguez P., Dell'Ámico J.A., Torrecillas A. y Sánchez B.M.J. Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate. (*Lycopersicum esculentum* Mill. c.v. Amalia). *Cultivos Tropicales.* 27 (1): 45 – 48.

- Moreno F.L.P. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agron. Colomb. 27 (2): 179-191.
- Moreno P.E. del C., Mora A.R., Sánchez del C.F. y García P.V. 2011. Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón cultivados en hidroponía. Rev. Chapingo Ser. Hortic. 17 (2):5 – 8.
- Mota C.C. 2011. Fijación de CO₂ en cultivos y sus implicaciones en el cambio climático. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia, España. 210 p.
- Mulderij R. 2017. Descripción general del mercado de pimiento global. En: <http://www.freshplaza.com/article/178545/OVERVIEW-GLOBAL-PEPPER-MARKET/> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Mundarain S., Coa M. y Cañizares A. 2005. Phenology of growth and development of sweet pepper (*Capsicum frutescens* L.) seedlings. Revista Científica UDO Agrícola. 5.
- Muñoz P., Antón V.M.A. y Montero C.J.I. 2004. Cultivo de pimiento en invernadero. Influencia de la humedad y ambiental y la salinidad. En: https://www.researchgate.net/publication/36730987_Cultivo_de_pimiento_en_invernadero_Influencia_de_la_humedad_ambiental_y_de_la_salinidad Fecha de consulta el 23 de octubre de 2018.
- Namesny V.A. 1997. El pimiento en el mundo. En: <http://www.horticom.com/tematicas/pimientos/pdf/capitulo1.pdf> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Necdet D., Yilmaz E., Sezgin F. y Gurbuz T. 2004. Effects of water stress at different growth stages on processing pepper yield, water use and quality characteristics. Pakistan Journal of Biological Sciences. 7 (12): 2167-2172.
- Ngouajio M., Wang G., Goldy R. G. 2008. Timing of drip irrigation initiation affects irrigation water use efficiency and yield of bell pepper under plastic mulch. HortTechnology 18 (3): 397-402.
- Nielsen E.T. y Orcutt D.M. 1996. Physiology of plants under stress. Vol. 1: Abiotic Factors. John Wiley & Sons. 2nd ed.
- Nieto C.A., Troyo D.E., García H.J.L., Murillo A.B., Ruiz E.F.H. y Pimienta B.E. 2009. Efecto del estrés hídrico edáfico en emergencia y desarrollo de plántula en las especies de chile *Capsicum frutescens* L. y *Capsicum annum* L. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 10(3):405 – 413.

- Nuez V.F., Gil O.R., Costa G.J. 1996. El cultivo de pimientos, chiles y ajés. Ediciones Mundi-prensa. Madrid. Barcelona. México; 61, 76, 105, 111.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. 2003. Sondas de neutrones y gamma: sus aplicaciones en agronomía. 2da Ed. En: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-16S-2_web.pdf
Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Orellana B.F.E., Escobar B.J.C., Morales de B.A.J., Méndez de S.I.S., Cruz V.R.A. y Castellón H.M.E. 2012. Cultivo de chile dulce. Guía Técnica. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal. El salvador. 49p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 1994. Contaminación agrícola de los recursos hídricos. En:
<http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s03.htm#datos%20sobre%20la%20contaminaci%C3%B3n%20agr%C3%ADcola%20del%20agua%20en%20los%20pa%C3%ADseFecha> de consulta el 12 de octubre de 2018.
- Ótero A., Montoya F. y García C. 2017. Programación de riego. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Uruguay. Serie técnica 232.
- Pagán R.E. 2012. Uso de indicadores del estado hídrico de la planta para optimización del riego en cultivos leñosos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Parra Q. R. A., Ortiz F. P., Amado A. J. P., Chávez S. N. 2009. Productividad y crecimiento de manzano bajo déficit de riego controlado. Terra latinoamericana. 27 (4): 337-343.
- Paongpetch P., Suchila T., Saksit C. y Paul W.B. 2012. Impact of drought stress on the accumulation of capsaicinoids in Capsicum cultivars with different initial capsaicinoid levels. HortScience. 47(9):1204-1209.
- Parra Q. R. A., Ortiz F. P., Amado A. J. P., Chávez S. N. 2009. Productividad y crecimiento de manzano bajo déficit de riego controlado. Terra latinoamericana. 27 (4): 337-343.
- Parra Q. R. A., Robinson T. L., Osborne J., Parra B. L. B. 2008. Efecto de carga de fruto y déficit hídrico en la calidad y producción de manzana. Revista Chapingo serie de horticultura. 14 (1): 49-54.
- Peng Q., Tong, J.H, Bai L.Y y Xiao L.T. 2015. Effect of drought stress on capsaicin contents, dihydrocapsaicin and vitamin C in the C. annuum L. fruit. China Vegetables, 12, 44-47.
- Pérez S.F. 2015. Programación de riego y déficit hídrico controlado en frutales de hueso. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cartagena.

- Pérez C.L.M., Castañón N.G., Ramírez M.M. y Mayek P.N. 2015. Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad genética de *Capsicum spp.* Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 2(4):117-128.
- Pérez G.A., Garruña R., Vázquez P., Latournerie M.L., Andrade J.L. y Santamaría U.R. 2016. Growth, phenology and chlorophyll fluorescence of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) under water stress conditions. *Ecofisiología vegetal y Producción de Cultivos*. 66 (2): 214 – 220.
- Petillo G.M., Puppo L., Hayashi R. y Morales P. Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo. Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos Montevideo. En: <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Metodologia%20para%20determinar%20los%20parametros%20hidricos%20de%20un%20suelo%20a%20campo.pdf> Fecha de consulta el 10 de noviembre de 2018.
- Pilatti R.A., Pérez I., Gariglio N.F. y Favaro J. 1991. Cultivo de pimiento en invernáculo no calefaccionado: Tecnología para la obtención de frutos de buena aptitud comercial. *FAVE G*; 39-45; 59-71
- Pino M.T. Campos A., Saavedra J., Álvarez F., Salazar C., Hernández C., Soto S., Estay P., Vitta N., Escaff M., Pabón C., Zamora O. 2018. Pimientos para la industria de alimentos e ingredientes. Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA N° 360, 110 p.
- Potters G.T., Pasternak P., Guisez Y., Palme K.J. y Jansen M.A.K. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3):99-105.
- Redondo Q.F. y Redondo M.C.R. 2010. Litros por metro cuadrado y milímetros. Universidad de Salamanca. En: http://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Comentarios/Temas/l-por-m2_y_mm.pdf Fecha de consulta el 28 de octubre de 2018.
- Reveles H. M.; Huchín A. S. y Velásquez V. R. 2012. Producción de plántula de chile en invernadero: Manual para el productor. Folleto para productores Núm. 37. Campo Experimental Zacatecas, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México. 28p
- Rodríguez E.R.C., Rodríguez C.I.D., Lorente G.Y., López D., Izquierdo R.E., Borroto L.S., Bonet C., Garza G.Y., Aragón C.E., Podestá F.E., Rodríguez R. y González O.J.L. Efecto del déficit hídrico sobre cambios morfo-fisiológicos y bioquímicos en plantas micropropagadas de piña en la etapa final de aclimatización. *Cultivos Tropicales*. 37: g4-73p.

- Rodríguez P. R. A., Rázuri R. L., Swarowsky A. Rosales D. J. 2014. Efecto del riego deficitario y diferentes frecuencias en la producción del cultivo de pimentón. *Interciencia* 39 (8): 591-596.
- Ruíz C.J.A., Medina G.G., Gonzáles A.I.J., Flores L.H.E., Ramírez O.G., Ortiz T.C., Byerly M.K.F. y Martínez P.R.A. 2013. Requerimientos agroecológicos de los cultivos. Instituto Nacional de Libro Técnico N° 3. Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- Saha S.R., Hossain M.M., Rahman M.M., Kuo G.G. y Abdullah S. 2010. Effect of high temperature stress on the performance of twelve sweet pepper genotypes. *Agril. Res.* 35(3): 525-534.
- Salisbury F.B. y Ross C.W. 1996. Fisiología vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana. 4^{ta} Ed. México. 70-75p.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015. Producción de chile mexicano. En: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/produccion-del-chile-mexicano> Fecha de consulta el 16 de octubre de 2018.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2017a. Atlas agroalimentario 2017. En: www.gob.mx/siap Fecha de consulta el 16 de octubre de 2018.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2017b. Planeación agrícola Nacional 2017-2030. Chiles y pimientos mexicanos. En: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257072/Potencial-Chiles_y_Pimientos-parte_uno.pdf Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2016. Producción nacional de chile alcanza 2.3 millones de toneladas. En: <https://www.gob.mx/sagarpa/prensa/produccion-nacional-de-chile-alcanza-2-3-millones-de-toneladas> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2018.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. Programa Nacional Hídrico. En: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PROGRAMA_Nacional_Hidrico_2014_2018_espa%C3%B1ol.pdf fecha de consulta el 12 de octubre de 2018.
- Secretaría de Desarrollo Agropecuario Querétaro (SEDEA). 2017. Requerimientos agroecológicos de los cultivos. Chile dulce. En: <http://sedea.queretaro.gob.mx/sites/sedea.queretaro.gob.mx/files/CHILEVERDE.pdf> Fecha de consulta el 23 de octubre de 2018.

- Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP). 2018. Anuario estadístico de la producción agrícola. En: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp Fecha de consulta el 16 de octubre de 2018.
- Shin L.C., Mo K.S., Lai C.J., Gross K.C. y Woolf A.B. 2007. Bell pepperfruits are susceptible to chilling injury at the breaker stage of ripeness. *HortScience*. 42 (7): 1659-2007.
- Snyder R.L., Melo A.J.P., Matulich S., Villar M.J.M. y Millán J. 2010. Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Serie sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales No. 10.
- Soto O.R., Silvertooth J.C. y Galadima A. 2006. Crop phenology for irrigated chile in Arizona and New Mexico. *Vegetable report*. University of Arizona. En: <http://cals.arizona.edu/pubs/crops/az1419/> Fecha de consulta el 24 de octubre de 2018.
- Statista. 2018. Per capita consumption of fresh bell peppers in the United States from 2000 to 2'17. En: <https://www.statista.com/statistics/257339/per-capita-consumption-of-fresh-bell-peppers-in-the-us/> Fecha de consulta el 15 de octubre de 2017.
- Szira F, Balint A.F, Bonnet A, Galiba G. 2008. Evaluation of drought related traits and screening methods at different developmental stages in spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194, 334–342.
- Tun D.J.C. 2001. Chile habanero, características y tecnología de producción. Folleto técnico INIFAP. Yucatán, México.
- Vandoorne B., Mathieu A.S., Van den Ende W. Vergauwen R., Périlleux C., Javaux M. y Lutts S. 2012. Water stress drastically reduces root growth and inulin yield in *Cichorium intybus* independently of photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 63: 4359 – 4373.
- Vidal J.L. 2006. Efectos del factor térmico en el desarrollo y crecimiento inicial de pimiento cultivado en campo. Tesis para obtener el grado de Magíster. Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía y Zootecnia.
- Villalobos R.S., Castellanos J.Z. y Olodeagua J.L. 2004. Manual de producción Hortícola en invernadero. 2^{da}, INTRAGRI. México. 80-102p.

- Villalobos R.S., Castellanos J.Z., Tijerina C.L. y Crespo P.G. 2005. Efecto de la tensión de humedad en el suelo sobre el rendimiento y calidad del brócoli con riego por goteo. *Terra Latinoamericana*. 23(3): 321-328.
- Villegas L.N.J. 2013. Efecto del Riego Deficitario Controlado en la producción de pimiento en la producción de Babahoyo. Tesis de grado. Universidad Técnica de Babahoyo.
- Zapata M.N., Bañin A.S. y Cabrera F.P. 1992. El pimiento para pimentón. Mundi-prensa. Madrid. España.
- Zamora E. 2016. Fisiopatías de frutos, tallos y hojas en cultivos protegidos. Folleto: HORT-CP-001. Universidad de Sonora. México.