

Saltillo, Coahuila a 7 de noviembre de 2020

**Programa de Maestría en Ciencias en Agroplasticultura**

**Coordinación de Posgrado**

PRESENTE

Por este conducto nos permitimos informar a esta coordinación que, el documento de tesis preparado por **FERNANDO RAMÍREZ LUNA** titulado "Respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y al volumen de suelo sustituido por perlita en la zona radicular de la planta" el cual fue presentado el día 3 de noviembre de 2020, ha sido modificado de acuerdo a las observaciones, comentarios y sugerencias, realizadas por el Comité Evaluador asignado. Por tal motivo, avalamos que el documento corresponde a la versión final del documento de tesis.

Atentamente,

**SINODALES**



Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso

Presidente



Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar

Secretario



Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros

Vocal

**Vo. Bo. de los Asesores**



Dr. Oussama Mounzer



M.C. Adolfo Baylon Palomino



# TESIS CON CARACTER ABIERTO

PROGRAMA: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA

---

AUTOR: FERNANDO RAMÍREZ LUNA FIRMA



TITULO: Respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y al volumen de suelo sustituido por perlita en la zona radicular de la planta.

ASESORES: Dr. Oussama Mounzer

FIRMA



M.C. Adolfo Baylon Palomino

FIRMA



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

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

Saltillo, Coahuila, a 3 de Noviembre de 2020



Sello de la Institución



Dr. Oliverio Santiago Rodríguez Fernández  
Director General del CIQA

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

***TESIS***

**Respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y al volumen de suelo sustituido por perlita en la zona radicular de la planta**

***Presentada por:***

**FERNANDO RAMÍREZ LUNA**

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

**Maestro en Ciencias en Agroplasticultura**

***Asesorado por:***

**Dr. Oussama Mounzer  
M.C. Adolfo Baylon Palomino**

**SINODALES**



**Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso  
Presidente**



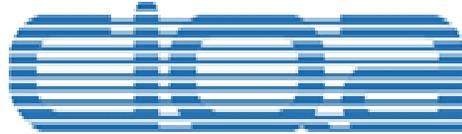
**Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar  
Secretario**



**Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros  
Vocal**

**Saltillo, Coahuila. México.**

**Noviembre, 2020**



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

*TESIS*

**Respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y al volumen de suelo sustituido por perlita en la zona radicular de la planta**

*Presentada por:*

**FERNANDO RAMÍREZ LUNA**

*Para obtener el grado de:*

**Maestro en Ciencias en Agroplasticultura**

*Asesorado por:*

**Dr. Oussama Mounzer**  
**M.C. Adolfo Baylon Palomino**

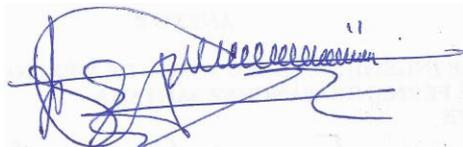
**Saltillo, Coahuila. México.**

**Noviembre, 2020**

## DECLARACIÓN

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

Saltillo, Coahuila a 03 de noviembre de 2020



FERNANDO RAMÍREZ LUNA

Nombre y Firma

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN AGROPLASTICULTURA**

**Respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y al volumen de suelo sustituido por perlita en la zona radicular de la planta**

**TESIS**

Presentada por:

**FERNANDO RAMIREZ LUNA**

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROPLASTICULTURA**

**Saltillo, Coahuila, México.**

**Noviembre de 2020.**

## **AGRADECIMIENTOS**

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

Al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por abrirme las puertas al Posgrado, sin condiciones, para la realización de la Maestría en Agroplasticultura.

A mi asesor de tesis, el Dr. Oussama Mounzer, por haber contribuido a mi formación académica con una visión analítica, por haberme permitido colaborar en su idea de investigación y por la dirección principal de este ensayo.

Al M.C. Adolfo Baylón Palomino, por haberme brindado apoyo técnico-científico, material y de recursos humanos para la realización ajustada a protocolo, de este ensayo en campo.

Al Dr. Ricardo Hugo Lira Saldívar, por ser un excelente catedrático e investigador y por la revisión de este trabajo en sus diferentes etapas, además por sus consejos, correcciones y comentarios para mejorar su realización.

Al Dr. Juan Munguía López, por su dedicación para revisar este documento y por sus sugerencias, aportaciones y opiniones para alcanzar los objetivos de este ensayo.

Al Dr. Marco Antonio Castillo Campohermoso, por sus invaluable puntos de vista, observaciones y juicios objetivos, para llevar a buen término este trabajo.

Al Dr. Francisco Marcelo Lara Viveros, por la revisión del documento y sus observaciones.

A la Dra. Yolanda Ortega Ortega, por su esencial apoyo para la realización de las pruebas de laboratorio requeridas.

Al M.C. Eduardo Alfonso Treviño López, por sus consejos y opiniones, y por su valioso apoyo para la realización de labores y evaluaciones de campo.

Al M.C. Jairo Vázquez Lee, por sus opiniones y recomendaciones, y por su apreciable apoyo para la realización de labores y mediciones de campo.

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

A los trabajadores del Campo Experimental del CIQA: Humberto Prado, Francisco Prado, Claudio A. Arredondo y Carlos A. Ramírez Castillo, por el apoyo brindado para la realización de algunas labores de campo.

Especialmente a mi esposa, María del Refugio Reyes Soto, porque con mucho esfuerzo, paciencia y dedicación, hiciste todo lo necesario para que yo pudiera asistir a CIQA todos los días.

## DEDICATORIA

A mis padres, José Trinidad Ramírez Mendoza (†) y María Luna Ordaz.

A mis abuelos, Andrés Coronado Esparza (†) y Ladislada Ordaz Luján (†).

A mi esposa, María del Refugio Reyes Soto.

A mis hijos: María Fernanda, Angela Lorena, Fernando y Joanna Dinorah.

A mis nietos: Alan Mateo, Ana Victoria y María Angela.

A mis hermanos: Juan Antonio, Andrés, Apolinar, Hermelinda, Carlos, Mario, María, Hugo e Imelda Rocío.

## INDICE GENERAL

INDICE GENERAL .....	i
INDICE DE CUADROS .....	v
INDICE DE FIGURAS .....	vi
RESUMEN .....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Importancia del pimiento morrón .....	2
I.2 La compactación del suelo .....	3
I.3 Importancia del problema de compactación del suelo.....	4
I.4. Causas de la compactación del suelo .....	5
I.5 Impacto de la compactación en las condiciones físicas del suelo .....	7
I.6. Evaluación del grado de compactación del suelo.....	8
I.7 Efectos de la compactación del suelo en las plantas .....	9
I.8 Mejoramiento de suelos con problemas de compactación.....	11
I.8.1 Mejoradores de suelos.....	12
I.9 Desventajas de algunas técnicas y métodos para corregir la compactación del suelo.....	13
I.9.1 Métodos biológicos para superar las capas limitantes del crecimiento de las raíces .....	13
I.9.2 Soluciones mecánicas a la restricción física de las raíces.....	14
I.9.3 Soluciones químicas para el crecimiento limitado de las raíces .....	16
I.10 Características de la perlita.....	17
I.11 La perlita como mejorador de suelos .....	18
I.12 Ventajas del cultivo en suelo.....	19
I.13 Características del material vegetal .....	20
I.14 Propuesta para contribuir a la solución del problema.....	20
II. JUSTIFICACIÓN .....	22
III. HIPÓTESIS .....	23
IV. OBJETIVOS.....	24
IV.1 Objetivo general.....	24
IV.2 Objetivos específicos .....	24
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	25

V.1 Localización y descripción del sitio experimental.....	25
V.2 Diseño experimental .....	25
V.2.1 Factores estudiados .....	25
V.2.3 Diseño experimental .....	26
V.2.4 Análisis estadístico de los datos .....	26
V.3 Manejo agronómico del cultivo.....	27
V.3.1 Material vegetal .....	27
V. 3.2 Producción de plántula .....	27
V.3.3 Preparación del terreno .....	28
V.3.4 Construcción de camas de cultivo .....	28
V.3.5 Elaboración de orificios para perlita.....	28
V.3.6 Llenado de orificios con perlita .....	28
V.3.7 Preparación de la cama de cultivo.....	28
V.3.8 Preparación del invernadero.....	28
V.3.9 Trasplante.....	28
V.3.10 Nutrición del cultivo.....	29
V.3.11 Método de riego.....	30
V.3.12 Poda de flores.....	30
V.3.13 Metodología aplicada para la programación del riego .....	30
V.3.14 Control de plagas y enfermedades .....	32
V.3.15 Tutorado .....	33
V.3.16 Raleo de frutos .....	33
V.3.17 Cosecha .....	33
V.4 Variables medidas .....	33
V.4.1 Radiación solar incidente dentro del invernadero.....	33
V.4.2 Temperatura y humedad relativa.....	33
V.4.3 Aportes de agua de riego. ....	34
V.4.4 Tasa de fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración .....	34
V.4.5 Estado hídrico de la planta .....	34
V.4.6 Crecimiento del diámetro del tallo y altura de plantas. ....	34
V.4.7 Desarrollo del área foliar.....	35

V.4.8 Desarrollo del sistema radicular.....	35
V.4.9 Acumulación de biomasa seca.....	35
V.4.10 Densidad aparente del suelo.....	35
V.4.11 Porosidad del suelo.....	36
V.4.12 Resistencia mecánica del suelo a la penetración.....	36
V.4.13 Composición química de la solución del suelo.....	36
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
VI.1 Caracterización del sitio experimental.....	38
VI.1.1 Análisis fisicoquímico del suelo.....	38
VI.1.2 Propiedades de fertilidad del suelo.....	38
VI.1.3 Propiedades hidrodinámicas del suelo.....	39
VI.1.4 Densidad aparente y porosidad.....	40
VI.1.5 Resistencia mecánica del suelo a la penetración.....	41
VI.2 Condiciones ambientales de desarrollo.....	44
VI.2.1 Características generales del entorno microclimático.....	44
VI.2.2 Evolución de las variables climáticas al interior del invernadero.....	45
VI.2.3 Evapotranspiración.....	54
VI.3 Láminas de riego aplicadas.....	55
VI.4 Efecto del fertirriego en propiedades químicas del extracto de pasta saturada..	58
VI.5 Evaluación del desarrollo del sistema radicular.....	66
VI.6 Dinámica del crecimiento.....	75
VI.6.1 Altura de planta.....	75
VI.6.2 Índice de área foliar.....	77
VI.7 Comportamiento fisiológico.....	80
VI.7.1 Fotosíntesis.....	80
VI.7.2 Conductancia estomática.....	83
VI.7.3 Potencial hídrico del tallo.....	84
VI.8 Variables de rendimiento.....	88
VI.8.1 Rendimiento.....	88
VI.8.2 Número de frutos.....	91
VI.8.3 Peso unitario del fruto.....	92

VII. CONCLUSIONES .....94  
VIII. PERSPECTIVAS.....96  
IX. REFERENCIAS.....97

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización de perlita usada en el cultivo de pepino en hidroponía en invernadero. Fuente: Ramírez (2019).....	17
Cuadro 2. Distribución de los tratamientos dentro del invernadero en un diseño factorial completo 2 x 4 con arreglo en campo de bloques al azar. ....	27
Cuadro 3. Características generales de las soluciones nutritivas utilizadas en el cultivo de pimiento morrón en invernadero en el Campo Experimental de CIQA. ....	29
Cuadro 4. Propiedades hidrodinámicas del suelo del invernadero de media tecnología del Campo Experimental del CIQA en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah. estimadas utilizando el módulo Rosetta Lite v.1.1. (June 2003) del software Hydrus-1D versión 4.16.011.....	30
Cuadro 5. Resultados del análisis físico-químico del suelo del invernadero de media tecnología del Campo Experimental del CIQA en el predio Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah.....	38
Cuadro 6. Resultados del análisis de fertilidad del suelo del invernadero del Campo Experimental del CIQA en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah. ....	39
Cuadro 7. Propiedades hidrodinámicas del suelo del invernadero, del Campo Experimental del CIQA en Ramos Arizpe, Coah. ....	40
Cuadro 8. Promedios mensuales de las variables climáticas registradas al interior del invernadero del Campo Experimental del CIQA, en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah. en el período octubre de 2019 a mayo de 2020.....	45

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Densidad aparente y porosidad hasta 40 cm de profundidad, en cuatro estratos del perfil del suelo, evaluada a los 4 y 110 ddt dentro del invernadero. ....	40
Figura 2. Profundidad del suelo a la que se mantiene una resistencia a la penetración de 200 PSI, evaluada a los 4 y 110 ddt, bajo dos frecuencias de riego en pimiento morrón. ....	41
Figura 3. Evolución de las variables climáticas registradas al interior del invernadero, en el Campo Experimental de CIQA en el ciclo de cultivo de pimiento morrón: A) Radiación solar e Integral de radiación solar, B) Temperatura y humedad relativa, y C) Déficit de presión de vapor. Datos promedio diarios. ....	47
Figura 4. Temperatura máxima y mínima dentro del invernadero en el Campo Experimental de CIQA, tomadas con sensor HOBO durante el ciclo de cultivo de pimiento morrón. Datos promedio calculados para cada hora. ....	51
Figura 5. Grados día acumulados por etapa de desarrollo durante el ciclo de cultivo del pimiento morrón, calculados sobre una temperatura base de 10 °C. ....	54
Figura 6. Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) y del cultivo (ET <sub>c</sub> ), calculadas a diario para el invernadero en el Campo Experimental de CIQA, con datos de temperatura, humedad relativa y radiación solar directa, aplicando la ecuación FAO Penman-Monteith y los coeficientes de cultivo (K <sub>c</sub> ) del Boletín 56 de la FAO. ....	55
Figura 7. Láminas de riego aplicadas (A) y número de eventos de riego (B) realizados al pimiento morrón en base a dos frecuencias de riego, durante los meses del ciclo de cultivo. Datos mensuales. ....	56
Figura 8. Curvas de acumulación de N, P y K en sus formas iónicas NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> y K <sup>+</sup> , aportadas mediante dos frecuencias de fertirriego en el ciclo de pimiento morrón. ....	59
Figura 9. Comportamiento del pH, para las frecuencias F1 y F2, del agua de riego, el deseado y el real para la solución nutritiva (A) y de la conductividad eléctrica, para las frecuencias de riego F1 y F2, del agua de riego, la deseada y la real para la solución nutritiva (B). ....	60
Figura 10. Evolución de las concentraciones de los iones nitrato (A) y potasio (B) en el extracto de pasta saturada bajo las frecuencias de fertirriego F1 y F2 con cuatro soluciones nutritivas manejadas en el ciclo del cultivo de pimiento. ....	63

Figura 11. Desarrollo de raíces a los 97 ddt en pimiento morrón en respuesta a los tratamientos definidos por dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de las raíces. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ )..... 67

Figura 12. Crecimiento de raíces de pimiento morrón a los 97 ddt, en dos estratos de profundidad (A) y distribución de raíces por tratamientos en dos estratos (B). Los tratamientos combinan dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ). ..... 70

Figura 13. Distribución de las raíces alrededor de la planta de pimiento, como respuesta a seis tratamientos que combinan dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de la raíz. En el primer anillo se representa las raíces que crecieron alrededor de la planta dentro de un radio de 10 cm; en el segundo, están las que crecieron fuera de él..... 73

Figura 14. Desarrollo de raíces y relación parte aérea/raíz en base a biomasa seca en pimiento morrón, como respuesta a seis tratamientos que combinan dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de la raíz. El eje vertical izquierdo corresponde a la relación brote/raíz y el eje vertical derecho, a la cantidad de raíces por planta..... 74

Figura 15. Evaluación de la altura promedio total que alcanzó la planta de pimiento morrón en invernadero al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos definidos por dos frecuencias de fertirriego y cuatro medios de crecimiento. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ). ..... 75

Figura 16. Índice de área foliar (IAF) que desarrolló la planta de pimiento morrón al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos derivados de dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ). ..... 78

Figura 17. Evaluación de la biomasa seca total que acumuló el pimiento morrón al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos derivados de dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ). ..... 79

Figura 18. Valores de Fotosíntesis (A) y Conductancia estomática (B) en pimiento morrón, registrados durante el ciclo como respuesta a ocho tratamientos conformados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. .... 81

Figura 19. Potencial hídrico del tallo en pimiento morrón, registrado durante el ciclo como respuesta a ocho tratamientos conformados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. .... 84

Figura 20. Variables de rendimiento alcanzadas en pimiento morrón bajo ocho tratamientos integrados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de

la raíz: (A) Rendimiento total por metro cuadrado en el pimiento morrón, (B) Número total de frutos cosechados por metro cuadrado y (C) Peso promedio del fruto..... 89

## RESUMEN

La compactación del suelo restringe el crecimiento de las raíces y reduce los rendimientos, siendo una amenaza común de la agricultura intensiva. Con el objetivo de desarrollar tecnologías para el manejo agronómico de suelos compactados en invernadero, se evaluó la respuesta del pimiento morrón cultivar SV1675PB (*Capsicum annuum* L.) a dos frecuencias de fertirriego y a cuatro medios de crecimiento de la raíz.

Las frecuencias de riego se definieron en base al balance hídrico del suelo, utilizando como referencia 10% y 30% de agotamiento del agua fácilmente disponible, así como la evapotranspiración del cultivo estimada con la ecuación FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). Los medios de crecimiento de la raíz fueron: suelo natural y suelo modificado con cilindros de perlita de tres volúmenes (0.79, 1.57 y 6.28 L).

Este trabajo se realizó en el Campo Experimental del CIQA localizado en Ramos Arizpe, Coahuila, en un invernadero con techos y paredes de plástico, de tecnología media, teniendo un suelo ligeramente salino de textura franca. Las plantas se sembraron en camas de cultivo separadas a 0.90 m, cubiertas con acolchado plástico negro/negro y teniendo instalado un sistema de riego por goteo con gasto de 1.0 L h<sup>-1</sup>. La solución nutritiva utilizada fue la propuesta por Alarcón (2006).

Para la distribución de tratamientos estudiados, se usó un diseño experimental factorial completo 2 x 4, con 8 tratamientos y 4 repeticiones, con arreglo de los tratamientos en campo en bloques al azar. El análisis de los datos se realizó con el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS).

La fecha de trasplante fue el 3 de octubre de 2019 y la terminación del ciclo del ensayo fue el 7 de mayo de 2020, con una duración de 217 días. Dentro del invernadero se instalaron sensores para monitorear continuamente las siguientes variables: temperatura, humedad relativa, radiación solar y aportaciones de agua de riego. Se evaluaron variables químicas del extracto de pasta saturada, desarrollo radicular, crecimiento, rendimiento y fisiológicas como fotosíntesis, transpiración, conductancia estomática, potencial hídrico y unidades SPAD.

Los tratamientos evaluados solo mostraron efecto significativo en las variables número de frutos por planta, peso del fruto y altura de planta, siendo los mejores

tratamientos F1-P0000 (frecuencia de riego 1 y medio de crecimiento suelo sin modificar), F1-P1020 (frecuencia de riego 1 y medio de crecimiento P1020) y F1-P0000 (frecuencia de riego 1 y medio de crecimiento suelo sin modificar), respectivamente.

La información obtenida revela que la modificación del suelo compactado con cilindros de perlita, no promovió un mayor desarrollo de raíces en las plantas. El rendimiento no se incrementó cuando el suelo compactado fue sustituido con cilindros de perlita en la zona radicular.

El fertirriego no produjo efectos significativos sobre la dinámica de las propiedades químicas del extracto de pasta saturada; el pH, conductividad eléctrica y las concentraciones de nutrientes, las cuales no se modificaron de manera que causaran efectos significativos adversos en el cultivo.

## I. INTRODUCCIÓN

Además de existir condiciones óptimas de humedad y nutrición en el suelo, las raíces de las plantas también requieren de niveles suficientes de oxígeno y baja resistencia mecánica a la penetración para que puedan crecer sin restricciones, respirar y absorber suficiente agua y minerales, para cubrir adecuadamente las necesidades hídricas y nutricionales de la planta en sus diferentes etapas de crecimiento.

Por ello, las propiedades físicas de los suelos agrícolas (textura, estructura y densidad aparente) e hidrodinámicas (capacidad de campo, punto de marchitez permanente y conductividad hidráulica) tienen una función importante en el óptimo desarrollo de la planta y en los niveles de producción agronómica y económica.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Hakansson (1990) y Lipiec y Hakansson (2000), se establece que a partir de cierta densidad aparente óptima para el desarrollo de cultivo, el rendimiento de la planta se vuelve inversamente proporcional a un mayor grado de compactación del suelo.

Lo antes señalado se debe a condiciones indeseables en el suelo, como el incremento de la resistencia mecánica a la penetración de las raíces, la disminución de la porosidad, y por la disminución de la conductancia estomática de la planta (Lipiec y Håkansson, 2000). Además, la compactación del suelo reduce la tasa de infiltración del agua y aumenta el escurrimiento superficial, reduciendo la eficiencia de aplicación del riego ( $E_a$ ) y la uniformidad de distribución del agua ( $E_u$ ) en las parcelas agrícolas. Los riesgos de compactación suelen ser altos en suelos francos a pesados, pobres en materia orgánica y con niveles medios o altos de conductividad eléctrica (Guo *et al.*, 2013).

Los sustratos inertes (perlita, lana de roca, etc.) que se utilizan en los sistemas de producción en hidroponía, ofrecen amplias ventajas de manejo y rendimiento en comparación con los sistemas de producción agrícolas que utilizan el suelo como medio de cultivo. Sin embargo, a pesar del rápido crecimiento de la superficie total de agricultura protegida en México en los últimos años, la mayoría de las explotaciones agrícolas siguen utilizando el suelo como principal medio de crecimiento, debido, por un lado, a la alta inversión inicial necesaria para trabajar con sustratos y, por otro lado, a la reducida disponibilidad y experiencia de personal capacitado para el manejo de sustratos.

Aunado a esto, los productores no cuentan con una tecnología adecuada para minimizar los riesgos de vulnerabilidad del cultivo, asociados a la reducida capacidad del sustrato para apoyar a la planta en caso de presentarse variaciones inesperadas en las condiciones climáticas, hídricas y nutricionales.

Con el objetivo de desarrollar un paquete tecnológico para el manejo agronómico del pimiento (*Capsicum annuum* L.), tanto en condiciones de crecimiento en suelo compactado, como en sustrato inerte al mismo tiempo, se planteó modificar parcialmente las propiedades del medio de crecimiento original, introduciendo un cierto volumen de perlita en la zona radicular del cultivo, buscando así la posibilidad de que la planta se beneficie del conjunto de ventajas que podrían aportar el suelo por un lado, y el sustrato por el otro.

La hipótesis en que se basa esta idea, es que el suelo puede ofrecer a la planta la posibilidad de desarrollar un mayor volumen de raíces para anclarse mejor, así como obtener cierta amortiguación hídrica y nutricional en situaciones adversas de manejo, ya sean averías diversas en los sistemas de fertirriego, invernadero, falta de disponibilidad de agua o anomalías en los aportes de riego y nutrientes.

El sustrato ofrece menor resistencia a la penetración de raíces, facilita su desarrollo e incrementará la aireación y la infiltración de la solución de fertirriego, además puede reducir el riesgo de enfermedades fúngicas que atacan el cuello de la planta por excesos de humedad.

## **I.1 Importancia del pimiento morrón**

El pimiento morrón es una especie hortícola importante que se cultiva en la mayoría de los países y cubre 1.93 millones de ha. En el año 2017 la producción mundial de pimientos fue de 34 millones de t. China es el mayor productor de pimiento, con casi 16 millones de t y le siguen México con 2.3 millones de t, Turquía con 2.2 millones de t, e Indonesia con 1.8 millones de t (Penella y Calatayud, 2018).

Los tres primeros exportadores de pimiento en el mundo son: son México, España y Holanda, que participaron con el 63.1% del volumen total de las exportaciones mundiales de pimiento durante el año 2016. El ranking de países exportadores está encabezado por México con 949.7 millones de kg, que representa el 28.85 % del total

exportado, por un valor de 1,048.71 millones de euros y un precio medio de 1.104 euros por kg (Horto Info, 2017).

El pimiento morrón es un cultivo de importancia económica para México, ya que gran parte de su producción se exporta a Estados Unidos de América. De acuerdo con datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), en el 2016 las exportaciones de pimiento se incrementaron en 36%, alcanzando 285,339 de t (Orosco *et al.*, 2017).

El pimiento morrón, también conocido como chile dulce o Bell, tiene importancia económica especialmente en las entidades de Sinaloa, Sonora y Baja California Sur, porque su producción se destina al mercado de exportación, mientras que al mercado nacional lo abastecen principalmente Sinaloa y Morelos (Moreno *et al.*, 2011).

La importancia social del pimiento morrón reside en el hecho que al ser un cultivo intensivo, requiere una gran cantidad de mano de obra, de 120 a 200 jornales por ha cosechada (Arroyo-Vargas *et al.*, 2013). La producción anual mexicana de pimiento ronda las 375,590 ton (entre campo, invernadero y malla sombra), con un valor aproximado de 3,230 millones de pesos (Palacio y Sánchez , 2017).

El ritmo de crecimiento de la agricultura protegida en México es de 1,500 ha por año, lo que representa un incremento del 12% anual, predominando la construcción de casas sombras e invernaderos de baja tecnología. Los principales cultivos que se producen bajo estas condiciones son el tomate (70%), pimiento (16%) y pepino (10%) (Díaz, 2019).

## **I.2 La compactación del suelo**

Como todo sistema agrícola en el que intervienen muchos factores, la producción en invernadero no está exenta de elementos de producción adversos o desfavorables, como puede ser la compactación del suelo. Los procesos de degradación de las propiedades físicas de los suelos como la compactación, son de los que a nivel mundial se señalan de mayor importancia económica, debido a que condicionan el desarrollo y la penetración de las raíces de los cultivos, factor muy en el desarrollo de los mismos (Hossne, 2002).

La compactación se define como el proceso de compresión física que sufre la masa del suelo, provocada por cargas o presiones mecánicas que superan su resistencia

a la deformación, causando la reducción de su volumen, la destrucción de su estructura, el aumento de la densidad aparente y el colapsamiento de la porosidad (Yahya *et al.*, 2012).

La compactación del suelo es el incremento en la densidad aparente y disminución de la macroporosidad, que perjudica las funciones del mismo e impide el intercambio gaseoso suelo-atmósfera, la penetración de las raíces y del agua. La compactación del suelo puede reducir el rendimiento agrícola hasta un 60%. La mala gestión agrícola (80%) y el sobrepastoreo (16%) son las dos principales causas antrópicas de compactación (FAO, 2016).

La compactación del suelo causa una reducción sustancial en la productividad agrícola y siempre ha sido un gran problema para los agricultores. La agricultura intensiva parece ser más crucial en causar compactación. La alta carga mecánica por los equipos de labranza, la menor diversificación de cultivos, el pastoreo intensivo y los métodos de riego conducen a la compactación del suelo. Es aún más agravada cuando estos factores se acompañan de bajo contenido de materia orgánica en el suelo, pisoteo animal, vibraciones del motor y labranza con alto contenido de humedad (Shah *et al.*, 2017).

La compactación del suelo afecta la porosidad, la continuidad de los poros, la infiltración del agua, la permeabilidad del aire, la temperatura, el espacio de enraizamiento, el flujo de nutrientes y la actividad biológica del suelo (Khan *et al.*, 2017). También limita el crecimiento y el desarrollo de las plantas, ya que reduce la extracción de agua y nutrientes (Grzesiak *et al.*, 2017).

### **I.3 Importancia del problema de compactación del suelo**

El suelo constituye un recurso natural esencial para el desarrollo económico y social de los pueblos y es el soporte físico y químico de todos los ecosistemas terrestres. La degradación del suelo se produce cuando se presenta un daño a largo plazo en la función y productividad del ecosistema, causada por perturbaciones de las cuales el suelo difícilmente puede recuperarse sin ayuda (Bai *et al.*, 2008).

La degradación física del suelo constituye un problema de alcance global, considerándose una de sus principales causas la compactación (González *et al.*, 2009). Con respecto a la dimensión mundial de esta preocupación, Bai *et al.* (2008) indican que la degradación de la tierra se ha extendido desde un 15% de la superficie terrestre total

reportada en 1991 a 24% en la actualidad (2008), y dentro de ésta, más del 20% afecta a suelos destinados a la producción agrícola.

Johnson y Bailey (2002) señalan que el problema de compactación del suelo es el responsable de la degradación física de unas 83 millones de ha en todo el mundo, sin especificar si se trata de terrenos agrícolas, ganaderos, forestales o de otro tipo. A escala global se reporta un área de 68 millones de ha afectadas por compactación, sólo debido al tráfico de maquinaria y vehículos de campo (González *et al.*, 2009).

Con respecto a la importancia del problema de compactación del suelo a nivel mundial, Dhiman (2018) menciona que la producción ganadera es el mayor usuario de tierras agrícolas del mundo, utilizando el 26% de la superficie cultivable del planeta para el pastoreo de ganado, lo cual amenaza la sostenibilidad agrícola por el daño de compactación que ocasiona a los suelos el pisoteo del ganado.

De acuerdo con informes de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2014), para el año 2002 se reportaban en México 85.7 millones de hectáreas de suelos afectados con algún tipo de degradación (ya sea física o química). En cuanto a degradación física se refiere, se reportaban 10.84 millones de ha de suelos deteriorados por problemas de compactación, cifra que representa el 71% de la superficie total en dicha situación.

El problema de compactación del suelo en México es relevante para la agricultura protegida, siendo importante recalcar que en nuestro país, más del 80% de la producción bajo invernadero se realiza directamente en el suelo (López, 2011).

#### **I.4. Causas de la compactación del suelo**

Los principales agentes que causan la compactación del suelo son las diversas fuerzas aplicadas al mismo. Estas fuerzas pueden ser creadas por el hombre (antrópicas) o por la naturaleza (Johnson y Bailey, 2002).

La compactación del suelo se puede presentar de manera natural, por medio del proceso de lixiviación o lavado que se produce con las lluvias o el riego, ya que éste puede arrastrar las partículas más finas del suelo (óxidos o hidróxidos de hierro y arcillas, entre otros) hacia las partes bajas del perfil, donde son depositadas rellorando los poros del suelo, generando así la compactación (Hossne, 2008).

Otros factores naturales que pueden promover el endurecimiento de las capas del suelo, de acuerdo con Alakukku *et al.* (2003), son algunas de sus propiedades físicas y químicas que los caracterizan como la textura, estructura, contenido de materia orgánica y de humedad del suelo. Mencionan que, a mayor contenido de arcilla en el suelo, existe más tendencia a la compresibilidad, por lo que los suelos arcillosos son más propensos a la compactación que los arenosos.

En relación a cómo interviene el contenido de humedad del suelo en la promoción de la compactación, Hossne (2008) reporta que en el proceso de expansión/contracción del suelo, ocasionado por los cambios de humedad, el volumen total de una masa considerada de suelo varía, produciendo cambios en la densidad aparente.

Con respecto a este mismo tema, Hamza y Anderson (2005) señalan que cuando el suelo se humedece, ocurre una disminución de la densidad aparente, debido a que el llenado de los poros por agua, amortigua y limita el acercamiento de las partículas del mismo, se expanden los poros y se reduce el efecto de la compactación.

Por otro lado, cuando el suelo se seca se contrae, disminuye su volumen y se produce un incremento de la densidad. En este sentido, los suelos arcillosos son más sensibles a los ciclos de humedecimiento y secado que los demás suelos. Por su parte, Hossne *et al.* (2017) encontraron que, no solo el grado de compactación y/o resistencia del suelo a la penetración son los factores físicos más limitantes para el desarrollo radical, sino que el contenido de agua presente también es sumamente relevante, ya que la densidad del suelo y el ángulo de fricción interna de las partículas varían con el porcentaje de humedad.

Como causas no naturales o antrópicas de la compactación del suelo, González *et al.* (2009) señalan como causantes principales a las fuerzas o cargas mecánicas de presión sobre el suelo por maquinaria o pisoteo del ganado. Respecto a los factores inherentes a la maquinaria, mencionan al excesivo peso sobre los sistemas de rodaje, un mayor número de viajes para el manejo intensivo del cultivo, velocidad de desplazamiento, patinaje y realización de labores en condiciones inadecuadas de humedad.

En este mismo sentido, Shah *et al.* (2017) establecen que la compactación del suelo es uno de los problemas torales que aquejan a la agricultura intensiva moderna,

siendo más específicos en los causantes principales: la baja rotación de cultivos, la concentración de ganado en pastoreo, los métodos de riego como los de aspersión, y las altas cargas mecánicas ejercidas por los pesados equipos de labranza. Resaltan que el problema se acentúa más cuando estos factores se combinan con baja materia orgánica en el suelo, y cuando el pastoreo y laboreo se realizan con alto contenido de humedad en el suelo.

Las causas menos comunes del enraizamiento limitado son de origen químico y pueden ser debidas a la presencia de concentraciones de niveles tóxicos de aluminio o manganeso, alta salinidad o severa deficiencia de nutrientes, especialmente de fósforo. Estas causas, en ciertos casos, pueden ser superadas mediante la aplicación de cal y/o yeso agrícola (Kramer, 2015).

Es importante conocer el origen de la compactación del suelo, porque eso nos marca las pautas para su corrección. Al respecto, Tasistro (2019) señala que el problema se puede clasificar en: a) costras en la superficie, b) compactación superficial en la capa arable (especialmente debajo de las huellas de las ruedas), c) suela o piso de arado, apenas por debajo de la profundidad de labranza y d) compactación profunda (> 30 cm).

### **1.5 Impacto de la compactación en las condiciones físicas del suelo**

Cuando se compacta el suelo, el volumen que más suele disminuir es el espacio poroso, el cual, debido a la naturaleza plástica del suelo, no se recupera sino hasta mucho tiempo después de eliminar las fuerzas mecánicas de compresión. Además, la compactación de un suelo altera y puede dañar la estructura del suelo, la red de poros interconectados. Un suelo compactado tiene menos volumen para almacenar agua (Johnson y Bailey, 2002).

La reducción del espacio poroso y la destrucción de la estructura del suelo por la compactación, reducen la porosidad, la velocidad de infiltración del agua en el suelo y su permeabilidad, lo que a su vez afecta el flujo de agua y de solutos hacia y a través del suelo. En general, el crecimiento de las plantas depende de la capacidad de enraizamiento, el estado de los nutrientes y la accesibilidad de las raíces a los nutrientes, la aireación del suelo y la disponibilidad de agua (Johnson y Bailey, 2002).

Un suelo compactado cuenta con menos agua disponible para sostener el crecimiento de las plantas. La disminución del tamaño de los poros (microporos) tiende a

aumentar las fuerzas capilares que retienen el agua en el suelo. En consecuencia, el rendimiento de los cultivos puede verse afectado si el espacio poroso del suelo no se recarga frecuentemente con agua, ya sea de forma natural por precipitación o artificialmente por riego (Atwell, 1993).

La compactación del suelo puede impedir la proliferación del sistema radicular de la planta debido a una impedancia mecánica excesiva, lo que reduce aún más el volumen efectivo del suelo del cual una planta puede extraer agua y nutrientes y reduce la resistencia a la sequía de la planta (Atwell, 1993).

## **I.6. Evaluación del grado de compactación del suelo**

El grado de compactación del suelo se puede evaluar de manera directa a través de ciertas propiedades como la densidad aparente, porosidad total, resistencia mecánica a la penetración y volumen específico; y de forma indirecta, por su acción sobre éstas y otras propiedades, como la permeabilidad al aire y al agua (Johnson y Bailey, 2002).

Algunos métodos indirectos no intrusivos para medir la compactación del suelo, como el radar de penetración en el suelo, la dispersión de neutrones y las técnicas de transmisibilidad (rayos X y tomografía computarizada) a menudo dependen de la densidad y la humedad del suelo (Freeland *et al.*, 1996).

Las densidades aparentes ideales para el establecimiento de cultivos agrícolas oscilan entre 1.0-1.2 g cm<sup>-3</sup>, y suelos con densidades aparentes superiores a 1.5 g cm<sup>-3</sup> no son recomendados (Merino *et al.*, 2019).

Tomando en consideración la densidad aparente, se ha establecido que un suelo tiene problemas de compactación cuando esa variable es superior a 1.3 gr cm<sup>-3</sup>; sobre estos niveles, las raíces de las plantas tienen dificultad para penetrar la masa del suelo y en algunos casos tienden a desarrollarse horizontalmente (formando raíces llamadas comúnmente “pata de gallo”), reduciendo así el aprovechamiento de los nutrientes, el agua y el anclaje de las plantas (Materechera *et al.*, 1992).

Otros trabajos similares que confirman el criterio para evaluar el grado de compactación de un suelo, es el realizado por Pazaca (2019), quien evaluó el efecto de la densidad aparente sobre el cultivo de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en dos tipos de suelo, Entisol y Alfisol, encontrando que la densidad aparente crítica fue 1.3 g cm<sup>-3</sup> (la resistencia del suelo a la penetración fue de 2.071 kg cm<sup>-2</sup>), ya que valores

superiores de densidad, afectan de manera considerable al desarrollo vegetativo del cultivo, reflejado en su rendimiento.

Con respecto a la resistencia mecánica del suelo a la penetración, se ha aceptado que cuando los valores de dicha variable exceden los 2 MPa (290 psi), el crecimiento de las raíces puede verse seriamente afectado o restringido. Sin embargo, se resalta que la velocidad o tasa de elongación de la raíz se puede reducir en más de la mitad con cifras muy inferiores al referido (Gil, 2007).

Soane y Ouwerkerk (2000) sugirieron el concepto de un nivel óptimo de compactación que maximizaría el rendimiento del cultivo. El nivel óptimo dependería de la sensibilidad del cultivo, el suelo, el clima y, potencialmente, las prácticas culturales.

### **I.7 Efectos de la compactación del suelo en las plantas**

La compactación reduce la salud del suelo y en consecuencia, afecta negativamente el rendimiento del cultivo a través del retraso en el crecimiento de los brotes, junto con un crecimiento reducido de la raíz (Shah *et al.*, 2017). Bajo condiciones extremas, la compactación del suelo puede impedir la penetración de las raíces (Forsythe *et al.*, 2005). Con respecto a la afectación de los cultivos por la compactación grave del suelo, Kozlowski (1999) establece los siguientes señalamientos:

- Por encima de los niveles críticos conduce en general a alteraciones fisiológicas en las plantas.
- Con frecuencia, aunque no siempre, se reduce la absorción de agua y se desarrollan déficits hídricos en las hojas.
- También impulsa cambios en las cantidades y balances de las fitohormonas en las plantas, especialmente aumentos en los niveles de ácido abscísico y el etileno.
- La absorción de los principales nutrientes minerales se reduce por la compactación del suelo, tanto en la superficie como en el subsuelo.
- La cantidad de fotosíntesis de las plantas que crecen en un suelo muy compactado se reduce por la inhibición estomática y no estomática, es decir, cuando la reducción de la fotosíntesis no está gobernada por la apertura estomática.
- La fotosíntesis total se ve disminuida como resultado de que las plantas desarrollan una menor área foliar.

- A medida que los suelos se vuelven cada vez más compactados, la respiración de las raíces se vuelve anaeróbica, con los problemas que eso representa.

- La compactación severa del suelo inhibe la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas, e induciendo la mortalidad de las mismas.

En este mismo sentido, Andrade *et al.* (1993) encontraron que densidades aparentes de 1.2 a 1.7 g cm<sup>-3</sup> (equivalentes a una resistencia del suelo de 0.8 a 2.4 MPa) dentro del estrato de 0 a 20 cm, redujeron el crecimiento en girasol, debido a que las hojas tuvieron velocidades de crecimiento más lentas y las hojas individuales tuvieron menor tamaño.

Con respecto al efecto de la compactación en el crecimiento de la raíz y la absorción de fósforo, Shierlaw y Alston (1984) encontraron que cuando la densidad aparente fue de 1.55 g cm<sup>-3</sup>, la longitud de la raíz en el suelo compactado se redujo al 50% de la longitud normal.

La capacidad de los cultivos para adaptarse a suelos con condiciones de compactación depende de la morfología de su raíz, como lo demostraron Chen y Weil (2010), quienes evaluaron la capacidad de las raíces de tres cultivos (dos especies con raíces pivotantes y una con raíces fibrosas) para penetrar en un suelo con compactación provocada. Encontraron que en el estrato 15 a 50 cm con alto nivel de compactación, una especie con raíz pivotante tenía más del doble de raíces que la especie con raíces fibrosas. Concluyeron que las especies con raíces principales o pivotantes, pueden penetrar en los suelos compactados mejor que las especies con raíces fibrosas.

El crecimiento de las plantas leñosas más allá de la etapa de plántula y los rendimientos de los productos vegetales que se pueden cosechar, también se reducen en gran medida por la compactación del suelo debido a los efectos combinados de la alta resistencia del suelo, la disminución de la infiltración del agua y la pobre aireación del suelo, todo lo cual conduce a una disminución del suministro de sustancias fisiológicas requeridas para el crecimiento en los sitios meristemáticos (Kozlowski, 1999).

El aumento de la densidad aparente del suelo de 1.0 a 1.5 g cm<sup>-3</sup> redujo la longitud de los brotes, el área foliar total, el tamaño y la materia seca de las hojas, brotes y raíces de los manzanos cultivados en contenedores (Ferree y Streeter, 2004). En otro frutal como la vid, el crecimiento del brote, el área foliar, el número de inflorescencias y la

materia seca de la hoja disminuyeron linealmente a medida que la densidad aparente del suelo aumentaba por encima de  $1.4 \text{ g cm}^{-3}$  (Ferree y Streeter, 2004).

### **I.8 Mejoramiento de suelos con problemas de compactación**

En relación con las acciones a implementar para atender la problemática de los suelos compactados, Kramer (2015) plantea que el tipo de solución a ser aplicada dependerá de la causa de la limitación del crecimiento de las raíces. Señala que esta condición se presenta como capas densas en el suelo, tales como los pisos de arado formados por la labranza; y que, además, naturalmente se presentan capas duras como las encontradas en los suelos arcillosos.

Por lo tanto, la restricción al enraizamiento puede ser superada al menos temporalmente, mediante procedimientos mecánicos y biológicos. Resalta de manera importante que, además de erradicar las causas de las limitaciones de las raíces, es importante evitar una reaparición del problema.

Por su parte, Koslowski (1999) menciona que se han desarrollado muchos protocolos con éxito variable, para mitigar los efectos adversos de la compactación del suelo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las acciones que se pueden implementar incluyen la siembra de especies tolerantes a la compactación, hacer un uso más eficiente y racional de la maquinaria agrícola reduciendo el tráfico vehicular, cuidar el pastoreo animal, el mejoramiento de los suelos mediante la adición de materiales gruesos y/o materia orgánica, el rompimiento y aflojamiento de los suelos con maquinaria y equipo subsolador; la instalación de sistemas de drenaje y la aplicación de algunos productos químicos como el yeso agrícola.

Con respecto a la prevención de la compactación del suelo, Kozlowski (1999) sugiere que se tomen medidas precautorias antes de la siembra porque son mucho más preferibles que los tratamientos posteriores a la siembra, ya que estos últimos son costosos y difíciles de aplicar, pueden no ser adecuadamente efectivos y pueden dañar las raíces de las plantas.

Los materiales que se incorporan en el suelo o se aplican en la superficie para mejorar el crecimiento de las plantas, generalmente se conocen como enmiendas o mejoradores del suelo (Wilson *et al.*, 2008). Esto incluye cualquier material como cal, yeso, aserrín, composta, estiércol animal, residuos de cultivos o acondicionadores

sintéticos (perlita y vermiculita) que se introducen en el suelo o se aplican sobre la superficie para mejorar el crecimiento de las plantas.

Las enmiendas pueden contener elementos fertilizantes importantes, pero el término comúnmente se refiere a materiales agregados distintos a los utilizados principalmente como fertilizantes (Wilson *et al.*, 2008).

Los acondicionadores del suelo, considerados como un subconjunto dentro de las enmiendas del suelo, mejoran considerablemente las condiciones físicas del suelo mediante una mejor agregación de las partículas del suelo, aumentan la cantidad de espacios de microporos y facilitan el intercambio de aire, el movimiento del agua y el crecimiento de las raíces (Wilson *et al.*, 2008).

### **I.8.1 Mejoradores de suelos**

En la horticultura y ante condiciones limitantes del terreno, es común sustituir al suelo natural con materiales de diferentes tipos, que en ciertos momentos del desarrollo del cultivo, permiten superar esas condiciones desfavorables y proporcionar al sistema radicular y a la planta completa, un ambiente más cercano al óptimo para su abastecimiento de agua y nutrientes (Martínez y Roca, 2011).

Con respecto a los materiales que se pueden utilizar para mejorar las propiedades físicas del suelo, Sarkar *et al.* (2017) mencionan los siguientes:

a) Biochar, mejora las propiedades físicas del suelo (estructura, textura, capacidad de retención de agua, etc.), propiedades químicas (pH, CIC, grupos funcionales de superficie, etc.) y biológicas (crecimiento microbiano).

b) Lodos de aguas residuales, como acondicionador de suelo.

c) Biosólidos, mejoran y mantienen la productividad del suelo.

d) Estiércol, mejora la estructura del suelo.

e) Diatomita, efectiva para aumentar la porosidad y drenaje en suelos finos.

f) Piedra pómez, mejora la retención de agua en suelos de textura fina.

g) Perlita, material silíceo ligero y poroso, el cual es químicamente inerte y resistente al intemperismo, que incrementa la porosidad total y la capacidad de retención de agua en el suelo.

h) Escoria básica, que incrementa la porosidad del suelo y la conductividad hidráulica.

i) Enmiendas sintéticas como los polímeros o hidrogeles superabsorbentes, que incrementan la aireación del suelo mediante la reducción de la compactación.

j) Cenizas de combustión, un desperdicio de la industria del carbón.

Gardiner *et al.* (1999), mencionan que las poliacrilamidas (PAM) y los polisacáridos naturales (como el mucílago de cactus) se pueden usar como enmiendas del suelo para mejorar las propiedades físicas del mismo, incluida la infiltración de agua en el perfil.

## **I.9 Desventajas de algunas técnicas y métodos para corregir la compactación del suelo**

### **I.9.1 Métodos biológicos para superar las capas limitantes del crecimiento de las raíces**

- Vegetación natural o cultivos de cobertera. Los suelos con problemas de compactación pueden ser sembrados y dejados en descanso por 2 a 3 años para su regeneración con arbustos naturales o vegetación forestal. La principal desventaja de esta técnica es el tiempo que se requiere para que las herramientas naturales sean efectivas, período en que las tierras están fuera de producción mientras ocurre la recuperación.

Una desventaja de la restauración con árboles es la dificultad de retornar al cultivo anual después del período de descanso, debido a que será necesario extraer las raíces y tocones de los árboles; en este caso, mientras más largo sea el período de reposo más difícil será su extracción. Además, es necesario proteger la vegetación del pastoreo del ganado, la quema y la cosecha durante los 2 a 3 años del período de recuperación, lo cual puede causar costos adicionales (Kramer, 2015).

Los terrenos plantados con cultivos de cobertura de raíces principales profundas pueden ser difíciles debido a la falta de semillas disponibles y a su costo; es necesaria una población alta para asegurar una adecuada densidad de raíces principales que penetren la capa limitante del crecimiento de las raíces. Para capas limitantes muy densas, inclusive *Cajanus cajan* puede tener un efecto limitado (Kramer, 2015).

- Incorporación de materia orgánica. Aún en los climas templados, las cantidades de materiales orgánicos necesarios para mejorar en forma notoria las propiedades físicas del suelo son muy grandes, las aplicaciones deben ser continuadas durante muchos años y, por lo general, afectan solamente la capa arable. Esta práctica puede ser aplicada por

agricultores que cultivan especies de alto valor y donde grandes cantidades de abonos orgánicos y mano de obra están disponibles (Shaxson y Barber, 2005).

En años recientes ha aumentado el interés por el uso de abonos orgánicos. Sin embargo, es necesario un manejo adecuado para evitar riesgos de contaminación o de sobrefertilización. En regiones lluviosas o en condiciones de riego, dosis excesivas de abonos pueden contaminar el acuífero con nitratos (Figuroa y Cueto, 2003).

- Estiércol. Es común que en el manejo de estiércol como abono orgánico se apliquen dosis altas, que pueden llegar a más de  $100 \text{ t ha}^{-1}$ . El estiércol bovino puede contener más del 10% de sales solubles; lo anterior significa que una dosis de  $100 \text{ t ha}^{-1}$  de estiércol incorpora también  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de sales solubles. La conductividad eléctrica (CE) del suelo aumenta de manera lineal al incrementar la dosis de aplicación (Figuroa y Cueto, 2003).

- Biosólidos. Abonos orgánicos como los biosólidos (lodos residuales de plantas tratadoras de agua), pueden representar un riesgo de contaminación por metales pesados si las concentraciones de estos elementos rebasan los límites establecidos en las Normas. De acuerdo con la legislación, en los terrenos que reciben biosólidos debe esperarse cierto tiempo antes de sembrar o cosechar un cultivo (Figuroa y Cueto, 2003).

### **1.9.2 Soluciones mecánicas a la restricción física de las raíces**

- Labranza cero. La compactación del suelo puede continuar siendo un problema bajo la labranza cero, ya que el terreno no es rutinariamente aflojado por los implementos de labranza y además, continúa siendo sometido al paso de equipos pesados en condiciones de suelo muy húmedo. El hecho de confiar exclusivamente en el potencial de formación de porosidad por las lombrices de tierra y otra macrofauna del suelo, como ocurre especialmente bajo la labranza cero, es considerado como una situación de alto riesgo para el productor (Kramer, 2015).

- Labranza manual. La mayoría de los agricultores que usan labranza manual, probablemente tendrán que usar herramientas de mano para romper los llamados pisos de arado, causados por herramientas agrícolas mediante métodos como la doble excavación, con la desventaja de que esta es intensiva y laboriosa (Kramer, 2015).

- Subsoladores. Cuando la compactación del subsuelo está a 40 cm de profundidad o más allá, el uso de subsoladores convencionales para aflojar las capas

profundas compactadas es difícil y costoso debido a la necesidad de muy alta potencia de tracción. Los subsoladores vibratorios o balanceantes, en los cuales los puntos del subsolador vibran o se balancean usando la potencia del tractor, pueden trabajar hasta 80 cm de profundidad, pero requieren una potencia de 75 a 100 HP (Kramer, 2015).

- Otros implementos. Se han desarrollado nuevos implementos empleando cuchillas de movimiento elíptico o azadas rotatorias, los cuales utilizan un mecanismo rompedor-aflojador para desintegrar las capas compactadas. Pueden ser usados a profundidades de 60 hasta 120 cm y en suelos con mayor contenido de humedad que los subsoladores convencionales, pero son caros y requieren alta potencia de tracción (Kramer, 2015).

La principal desventaja de la rotura mecánica de las capas de suelos limitantes del crecimiento de las raíces es el alto requerimiento de potencia, ya sea manual, animal o mecánica. Dado que la mayoría de los agricultores no tienen acceso a más equipos de los que usan para la preparación de tierras, el proceso es inevitablemente lento (Kramer, 2015).

- Temporada seca. Algunos suelos se vuelven tan extremadamente duros durante la temporada seca, que la potencia de tiro normal de que disponen los agricultores es incapaz de penetrar en el suelo y romper la capa limitante del crecimiento de las raíces. En ese caso es necesario esperar el comienzo de las lluvias para humedecer y ablandar el suelo y para que así sea posible romper la capa compactada; sin embargo, esto puede coincidir con el tiempo crítico de preparación de la tierras para la siembra. Las operaciones de subsolado son inefectivas cuando las capas compactadas o densas están mojadas o muy húmedas, ya que no se romperán los terrones y ocurrirá aún una mayor compactación (Kramer, 2015).

- Implementos especiales. El uso de implementos normales de preparación de tierras difícilmente será satisfactorio para romper capas de suelo compactadas. Los arados de discos son menos apropiados debido a que invierten el suelo, incorporan la mayoría de los residuos del cultivo y malezas (los que idealmente deben ser dejados sobre la superficie) y suben terrones del subsuelo hacia la superficie, por lo que necesitan una labranza adicional (Kramer, 2015).

Cuando se dejan residuos voluminosos de los cultivos sobre la superficie, especialmente residuos rígidos de maíz, sorgo y algodón, el funcionamiento de los equipos de subsoleo son más dificultosos, salvo que los equipos tengan discos frontales de corte (Kramer, 2015).

- Efectos de corto plazo. Si el subsolado es seguido por una labranza convencional, los efectos beneficiosos persistirán probablemente solo por dos o tres años; en estos casos el subsolado debe ser repetido nuevamente (Shaxson y Barber, 2005) y (Kramer, 2015).

Los métodos mecánicos serán preferidos cuando los agricultores tengan acceso a tractores y subsoladores y donde la tierra no puede ser sacada de producción y colocada bajo barbecho por dos o tres años (Kramer, 2015).

### **1.9.3 Soluciones químicas para el crecimiento limitado de las raíces**

- Yeso agrícola. Un inconveniente del uso del sulfato de calcio o yeso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es que los beneficios de su aplicación no son instantáneos, sino que se notan con el paso de los años (Batte y Forster, 2015). Cabe señalar que el rendimiento económico de la aplicación de sulfato de calcio en muchos casos puede ser negativo en el primer año. Los beneficios de la aplicación del yeso deben ser lo suficientemente sustanciales durante varios años, para justificar el costo de su aplicación al terreno (Chen y Dick, 2011).

- Biochar. Es una enmienda costosa en comparación con otras, principalmente debido a su alto costo de producción. Sin embargo, la aplicación de este producto puede ser rentable cuando se utiliza para cultivos comerciales que dan un alto rendimiento, o cuando se aplica en una agricultura de gran valor a pequeña escala (por ejemplo, invernaderos, viveros, floricultura, etc.). Las costosas enmiendas del suelo, pueden no incentivar mucho a los agricultores dentro del primer ciclo de cultivo, pero pueden ser económicamente viables a largo plazo (5 a 7 años) (Sarkar *et al.*, 2017).

-Vermiculita. El mejorador de suelos más sobresaliente que los estiércoles, abonos verdes, guano, azufre y perlita, estudiado en el cultivo de la papa en el estado de Coahuila, es la vermiculita; sin embargo, debido a su elevado costo se le debe considerar con reservas y buscar opciones más económicas y rentables (Narro, 1985).

## I.10 Características de la perlita

La perlita es un material de origen volcánico, por lo que se le considera un sustrato natural inorgánico, que se produce mediante un proceso de calentamiento de 1,000 a 1,200 °C, se funde y se expande formando esferas muy porosas. Químicamente está compuesta por sílice y óxidos de aluminio, hierro, calcio, magnesio y sodio.

Su densidad aparente es baja y la porosidad es elevada, aunque éstas y las demás propiedades físicas de la perlita dependen del tamaño de las partículas, clasificándose así: A-13 (3 a 5 mm), B-12 (0 a 5 mm), B-10 (0 a 3 mm), B-9 (0 a 1.5 mm) y B-6 (0 a 1.5 mm) (Martínez y Roca, 2011).

Bajo condiciones hidropónicas, se recomienda comúnmente el uso de la perlita de tamaño B-12, porque proporciona un buen equilibrio entre aireación y retención de agua (Martínez y Roca, 2011).

La perlita es un sustrato totalmente inerte, tiene bajos valores de capacidad de intercambio de cationes y poder amortiguador, así como escasa retención de agua. Proporciona aireación al medio de cultivo y mantiene su estructura inalterable.

El pH es neutro, la densidad aparente es pequeña y es un buen estabilizador de la temperatura. Algunas posibles desventajas, son el riesgo de toxicidad por Al en plántulas, cuando el pH es bajo y la escasa capacidad de suministro de agua en condiciones de gran transpiración, lo que hace necesario el riego más frecuente (Martínez y Montero, 2002).

Ramírez (2019) realizó la caracterización de las propiedades físicas e hidrodinámicas de una perlita utilizada en pepino en hidroponía en invernadero (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Caracterización de perlita usada en el cultivo de pepino en hidroponía en invernadero en el CIQA en Saltillo, Coahuila. Fuente: Ramírez (2019).

Propiedad	Valor
Densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	0.14
$\theta_v$ Capacidad Campo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0.20
$\theta_v$ Punto Marchitez Permanente ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0.10
Agua Disponible ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	0.10

La perlita es químicamente inerte y se puede lavar fácilmente cuando se acumulan las sales. Su pH normal es de 7 a 7.5 y se le reduce saturando el sustrato con una solución ácida, pero nunca debe tratarse con materiales con pH menor de 5, debido a que puede liberarse aluminio y producir fitotoxicidad (Martínez y Roca, 2011).

### **I.11 La perlita como mejorador de suelos**

Los sustratos hidropónicos como la perlita se utilizan para corregir suelos problemáticos, como los suelos arenosos que no retienen suficiente agua o los suelos demasiado arcillosos que, por el contrario, retienen demasiada humedad y menos oxígeno. La razón por la cual los sustratos como la perlita se agregan al suelo y se mezclan con él en diferentes proporciones, es para proporcionar un mejor ambiente para el sistema radicular y el crecimiento de las plantas. Esto incluye mejorar la estructura del suelo y la capacidad de almacenamiento de agua, la disponibilidad de nutrientes y las condiciones de vida de los organismos del suelo, los cuales son importantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Markoska *et al.*, 2018).

Otros beneficios al usar la perlita en combinación con otros sustratos, son: es totalmente inerte, tiene bajos valores de CIC y poder amortiguador, proporciona aireación al medio de cultivo y mantiene su estructura inalterable. Además, el pH de la perlita es neutro, su densidad aparente es pequeña y es un buen estabilizador de la temperatura. Algunas posibles desventajas son el riesgo de toxicidad por  $Al^{+3}$  en plántulas cuando el pH es bajo y la escasa capacidad de suministro de agua en condiciones de gran transpiración, lo que hace necesario el riego más frecuente (Martínez y Montero, 2002).

Markoska *et al.* (2018), evaluaron el potencial de retención de humedad de un suelo con la adición y mezcla de perlita en diferentes proporciones: 20:80, 30:70, 50:50. Les aplicaron siete niveles de presión diferentes (0.1, 0.33, 1, 3, 6.25, 11 y 15 bares) y se construyeron curvas características de humedad del suelo. Concluyeron que con la adición de perlita se logra un incremento en la capacidad de retención de humedad en todos los niveles de tensión, obteniendo los mejores resultados en la mezcla 50:50 (27.5% de humedad retenida, a 0.1 bar) contra solo 9.28% del testigo.

En relación a la producción hortícola en condiciones de suelo natural como sustrato, López (2011) resalta que una de las ventajas bajo este sistema de cultivo, es que el suelo tiene una alta capacidad de reserva de nutrientes y de disponibilidad del

agua, ya que en caso de presentarse interrupciones temporales en el suministro de agua y nutrimentos, el sistema no se ve seriamente afectado, como ocurre cuando se cultiva en sustrato.

Sobre el mismo tema, López (2011) señala que otra ventaja adicional de cultivar en suelo es que, al reducirse las pérdidas de solución nutritiva por drenaje, se requerirá una menor aportación de nutrientes en el riego, lo que significa un ahorro sustancial en fertilizantes. Adicionalmente, se reduce el costo de las instalaciones de riego, ya que puede usarse cinta normal en lugar de goteros autocompensados, mangueras y piquetas.

Cuando la perlita se aplica a los suelos, mejoran diferentes propiedades físicas (Narro, 1985). Este material se evaluó como mejorador de suelos cultivados con papa en el estado de Coahuila, en dosis de 0, 0.5, 1, 2, 4 y 10 t ha<sup>-1</sup>. La densidad aparente promedio de los suelos estudiados fue de 1.31 g cm<sup>-3</sup> y este valor disminuyó linealmente al incrementar la dosis aplicada, obteniéndose valores mínimos de 1.23 g cm<sup>-3</sup>. Con la utilización de perlita en dosis de 2 t ha<sup>-1</sup> combinada con 450 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, se obtuvo un rendimiento de 30.2 t ha<sup>-1</sup> de papa (Narro, 1985).

Urrestarazu *et al.* (2005), evaluaron la incorporación de la perlita como enmienda de un suelo arcilloso con problemas de aireación y compactación y su efecto en la producción de melón en invernadero en Almería, España. Se comparó la incorporación de un 30% de perlita en un suelo arcilloso. El análisis del suelo indicó que se mejoró la textura del suelo, cuando se incorpora la perlita. Esto es porque proporcionalmente disminuye el porcentaje de la fracción de arcilla aumentando la fracción arena, lo que significa que en la medida en que se incorpore más perlita, mejorará la textura de suelo y cambiará de arcilloso a franco arcilloso, disminuyendo la compactación del suelo y mejorando la aireación.

### **I.12 Ventajas del cultivo en suelo**

Una de las ventajas del cultivo en suelo es que éste tiene una alta capacidad de amortiguamiento desde el punto de vista nutricional y de manejo del agua, ya que en caso de tener interrupciones pasajeras en el suministro de agua y nutrimentos, el sistema no se ve seriamente afectado, como ocurre con el cultivo en sustrato (López, 2011).

Otra ventaja adicional de esta modalidad es que, al disminuir las pérdidas de solución nutritiva por drenaje, implica una menor aportación y pérdida de nutrientes en el

riego, lo que significa un ahorro sustancial en fertilizantes. Adicionalmente se reduce el costo de las instalaciones de riego, pues puede usarse cinta en lugar de goteros autocompensados, mangueras y lanzas o piquetas (López, 2011).

### **I.13 Características del material vegetal**

El pimiento morrón que se empleó en el presente estudio, es el cultivar SV1675PB el cual fue validado en condiciones de campo por la Fundación Produce Sinaloa A.C., durante el ciclo 2017-2018, reportando un rendimiento de 44.7 t ha<sup>-1</sup> (López y Ochoa, 2019).

Esta planta es un híbrido de campo abierto, de crecimiento determinado, con excelente producción de frutos y un equipo de resistencias genéticas muy completo, por lo que se adapta bien a las diferentes regiones agrícolas de México.

Este germoplasma se obtuvo de una planta vigorosa y es ideal para ciclos largos de cosecha; además, produce frutos uniformes grandes y extra grandes, con forma tipo blocky, de larga vida de anaquel, con peso promedio de 220 a 260 gramos y de color verde (SEMINIS, 2020).

### **I.14 Propuesta para contribuir a la solución del problema**

En virtud de las desventajas o inconvenientes económicos, prácticos o ambientales que presentan algunos métodos o técnicas que se recomiendan para superar las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces de los cultivos agrícolas, se ejecutó este trabajo experimental, el cual se realizó con el objetivo de desarrollar un paquete tecnológico de nivel intermedio entre las condiciones de producción en suelo normal y aquellas de producción en sustrato inerte. Por lo tanto, se planteó modificar parcialmente las propiedades del medio de crecimiento, introduciendo un cierto volumen de perlita en la zona radicular del cultivo, buscando la posibilidad de beneficiarse del conjunto de ventajas que podría aportar el suelo por un lado, y del sustrato por el otro.

Para contribuir a la solución de los problemas de compactación del suelo en aquellos invernaderos de baja tecnología que producen hortalizas, se investigó si el fertirriego aplicado mediante varias dosis pequeñas durante el día, permitiría incrementar la infiltración del agua en el suelo.

Por otro lado, se hicieron modificaciones a las condiciones de crecimiento de las raíces de la planta mediante la realización de hoyos en el suelo sobre la cama de cultivo,

estos fueron de diferentes diámetros y profundidades, los que fueron rellenos con perlita comercial, porque ofrece menor resistencia a la penetración de raíces, facilita su desarrollo e incrementa la aireación y la infiltración del agua de riego, además de que reduce el riesgo de enfermedades fúngicas que suelen atacar el cuello de la planta.

Cabe resaltar que la metodología aquí propuesta está encaminada a esquivar la resistencia del suelo en las primeras etapas de desarrollo de las raíces. Al sustituir parcialmente el suelo con perlita, físicamente se tienen dos fases: el suelo natural, con sus características físicas, químicas y biológicas (favorables y desfavorables), las cuales no se buscaron modificar de ninguna manera; y por otro lado, se tiene un cierto volumen de perlita, con sus propiedades típicas, las cuales tampoco se pretenden modificar.

Se tuvo por lo tanto, un sistema de cultivo bifásico, con sus partes independientes una de la otra, juntas, pero no mezcladas, conservando en todo momento las propiedades intrínsecas de cada una de ellas. Por esta razón, no tendría sentido realizar pruebas para evaluar el comportamiento en el tiempo, de algunas variables como densidad aparente o la velocidad de infiltración, aunque es innegable que la caracterización del suelo es necesaria al inicio del ciclo, pero solo como punto de referencia de la condición del mismo.

## II. JUSTIFICACIÓN

En virtud de las desventajas o inconvenientes económicos, prácticos o ambientales que presentan algunos métodos o técnicas que se recomiendan para superar las condiciones que limitan el crecimiento de las raíces, como la compactación del suelo, se realizó la siguiente investigación.

El presente ensayo se realizó con el objetivo de desarrollar un paquete tecnológico de manejo agronómico de nivel intermedio, entre las condiciones de producción en suelo normal y las de producción hidropónica en un sustrato inerte; por lo tanto, se modificaron parcialmente las propiedades del medio de crecimiento, introduciendo un cierto volumen de perlita en la zona radicular del cultivo reemplazando al suelo compactado, buscando con esto favorecer algunas ventajas que en ciertas condiciones, podría aportar el suelo por un lado, y el sustrato por el otro.

Para contribuir a la solución de los problemas de compactación del suelo en aquellos invernaderos que producen hortalizas, se evaluó si el fertirriego aplicado mediante varias dosis pequeñas durante el día, permitió incrementar la infiltración del agua en el suelo, evitando escurrimientos superficiales y el desperdicio de agua y nutrientes.

Por otro lado, se propuso modificar las condiciones del medio de crecimiento de las raíces, mediante la realización de orificios en el suelo, sobre la cama de cultivo, de diferentes diámetros y profundidades, que fueron rellenados con perlita, en los que se puso la planta, ya que dicho sustrato ofrece menor resistencia al crecimiento de las raíces, facilita su desarrollo e incrementa la aireación y la infiltración del agua de riego, además ofrece una potencial reducción de enfermedades fúngicas que suelen atacar el cuello de la planta.

Se tuvo, por lo tanto, un medio de cultivo bifásico, con sus partes independientes una de la otra, juntas, pero no mezcladas, conservando en todo momento las propiedades intrínsecas de cada una de ellas. Por esta razón, se consideró que no era necesario realizar pruebas para evaluar el comportamiento en el tiempo de algunas variables como: densidad aparente o la velocidad de infiltración, aunque es innegable que la caracterización del suelo es necesaria al inicio del ciclo, pero solo como punto de referencia de la condición del mismo.

### III. HIPÓTESIS

a) La sustitución parcial del suelo con propiedades físicas reducidas (alta densidad aparente, porosidad reducida e infiltración reducida), por la adición de perlita en el volumen cercano al cepellón de las plantas, facilitará el crecimiento de las raíces, mejorará la exploración del suelo y contribuirá a mejorar el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de pimiento.

b) El fertirriego calculado con un nivel de agotamiento permisible del 10% producirá mejores resultados agronómicos que uno del 30% en el cultivo de pimiento morrón en invernadero.

## **IV. OBJETIVOS**

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

Estudiar la respuesta ecofisiológica del pimiento morrón a la frecuencia de fertirriego y a la modificación parcial de las condiciones edáficas, debido a la incorporación de perlita en la zona radicular del cultivo, sembrado en condiciones de invernadero de mediana tecnología.

### **IV.2 Objetivos específicos**

- a) Establecer una relación entre el rendimiento de pimiento y las propiedades físicas dominantes en la zona radicular.
- b) Examinar el impacto de las características del medio de crecimiento sobre el volumen final explorado por las raíces en condiciones de invernadero.
- c) Determinar el efecto del fertirriego sobre las propiedades químicas de la solución del suelo (pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes).

## **V. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **V.1 Localización y descripción del sitio experimental**

El ensayo se realizó en un invernadero de mediana tecnología con 192 m<sup>2</sup> de superficie útil, en el Agrobioparque del Departamento de Biociencias y Agrotecnología del CIQA-CONACYT, situado en el km 33 de la Antigua Carretera Saltillo-Monclova, municipio de Ramos Arizpe, Coahuila. Se ubica en las coordenadas 25° 39' 05.38" de latitud norte y 101° 06' 50.02" de longitud oeste, a una altitud de 1194 msnm.

El clima en la zona es del subtipo seco semicálido, con lluvias escasas todo el año; el rango de temperaturas promedio es de 18 a 20 °C. La precipitación media anual varía de 300 a 500 mm. El período de lluvias se presenta de mayo a septiembre, mientras que el de estiaje de octubre a abril (CONAGUA, 2013).

El suelo del sitio se clasifica como Calcisol. Esta clase integra suelos con una sustancial acumulación de carbonatos secundarios, que se encuentran en el estrato 0-100 cm del suelo. La textura del suelo es franca en los estratos 0-20 y 20-40 cm.

El invernadero donde se desarrolló este experimento está revestido con cubierta de polietileno, con techo en arco terminado en punta y paredes inclinadas, tiene un área total de 287 m<sup>2</sup> y una superficie cultivable de 192 m<sup>2</sup>. Cuenta con un sistema de ventilación pasiva a través de ventanas laterales y cenitales con mallas antiinsectos, con cortinas y pantalla térmica de apertura motorizada. Tiene un acceso principal o filtro sanitario con doble puerta de seguridad, puerta para entrada de maquinaria y un sistema de control de clima que incluye equipo de calefacción a gas, sistema de enfriamiento (pared húmeda y dos extractores), ventilador para remover el aire y un equipo de fertirriego marca NETAFIM.

### **V.2 Diseño experimental**

#### **V.2.1 Factores estudiados**

Los factores evaluados fueron la frecuencia de fertirriego (F), con dos niveles: a) frecuencia de fertirriego I (F1), la cual consistió en aplicar de 1 a 5 riegos al día, cuando se agotaba por la evapotranspiración del cultivo, el 10% del agua fácilmente disponible (AFD) en la zona radicular y b) frecuencia de fertirriego II (F2), la cual consistió en aplicar

de 1 a 5 riegos al día, cuando se consumía el 30% del agua fácilmente disponible (AFD) en la zona radicular del cultivo.

El segundo factor que se evaluó, fue el medio de crecimiento de la raíz, el cual consta de los siguientes cuatro niveles: 1) testigo o control, el cual corresponde al suelo natural *in situ*, sin ninguna modificación o alteración e identificado como P-0000; 2) modificación del suelo, llenando con perlita un orificio realizado en el mismo de 10 cm de diámetro y 10 cm de profundidad e identificado como P-1010; 3) modificación del suelo, llenando con perlita un hoyo realizado en el suelo de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad e identificado como P-1020, y 4) modificación del suelo, llenando con perlita un orificio realizado en el mismo de 20 cm de diámetro y 20 cm de profundidad, identificado como P-2020.

### **V.2.2 Tratamientos aplicados**

Se evaluaron 8 tratamientos en total, los cuales se derivan de la combinación de todos los niveles de los factores a estudiar: F1-P0000, F1-P1010, F1-P1020, F1-P2020, F2-P0000, F2-P1010, F2-P1020 y F2-P2020. Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones, cada una dentro de los cuatro bloques diseñados.

### **V.2.3 Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado fue un factorial completo 2 X 4, el cual generó 8 tratamientos por la combinación de todos los niveles de los factores estudiados. El arreglo o distribución de los tratamientos en el campo, fue en bloques al azar como se muestra en el Cuadro 2.

El invernadero en el cual se desarrolló el experimento, cuenta por un lado con una pared húmeda y en el otro extremo, con dos extractores de aire. Por esta razón se consideró conveniente construir cuatro bloques de 5 m de largo. Dentro de cada bloque se distribuyeron al azar los 8 tratamientos resultantes.

### **V.2.4 Análisis estadístico de los datos**

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el software SPSS Statistics 17.0.

**Cuadro 2.** Distribución de los tratamientos dentro del invernadero en un diseño factorial completo 2 x 4 con arreglo en campo de bloques al azar.

Pared húmeda							
Bloque 1							
F2- P1020	F1- P1010	F1- P0000	F1- P1020	F1- P2020	F2- P1010	F2- P2020	F2- P0000
Bloque 2							
F2- P0000	F1- P0000	F2- P1010	F2- P1020	F1- P2020	F1- P1020	F1- P1010	F2- P2020
Bloque 3							
F2- P1020	F1- P2020	F1- P1010	F2- P2020	F2- P0000	F1- P0000	F2- P1010	F1- P1020
Bloque 4							
F2- P2020	F2- P1020	F2- P1010	F2- P0000	F1- P2020	F1- P1020	F1- P1010	F1- P0000
Extractores							

### V.3 Manejo agronómico del cultivo

#### V.3.1 Material vegetal

Se establecieron plantas de pimiento morrón genotipo SV1675PB.

#### V. 3.2 Producción de plántula

La siembra se realizó en charolas de poliestireno de 200 cavidades, el 23 de julio de 2019 en un invernadero del CIQA en Saltillo, Coahuila. Se utilizó peat-moss como sustrato, colocando una semilla por cavidad a una profundidad de 0.5 cm; se cubrieron con una capa ligera de peat-moss y se aplicó un riego ligero.

Las charolas se cubrieron con plástico negro durante cuatro días para conservar la humedad del sustrato, elevar la temperatura de la charola, para favorecer la germinación; posteriormente se destaparon y se distribuyeron en los bancales del invernadero.

Los riegos se aplicaron a diario con regadera manual, de una a dos veces, dependiendo del clima. Se regó con una solución nutritiva 15-30-15. Se realizaron 3 aplicaciones preventivas de Propamocarb en dosis de 1 mL L<sup>-1</sup> contra enfermedades fungosas como *Pythium* spp. y *Phytophthora* spp.

### **V.3.3 Preparación del terreno**

Se realizó con maquinaria, mediante labores de barbecho sencillo y dos pasos de rastra.

### **V.3.4 Construcción de camas de cultivo**

Se construyeron 10 camas de cultivo de manera manual, con una altura promedio de 30 cm y un ancho en la parte superior de 40 cm. La separación entre camas fue de 90 cm.

### **V.3.5 Elaboración de orificios para perlita**

Se instaló un sistema de riego provisional para humedecer al suelo y facilitar la realización de los orificios que se llenarían de perlita, los cuales se hicieron con tubos de PVC de 10 y 20 cm de diámetro.

### **V.3.6 Llenado de orificios con perlita**

Se utilizó termolita marca Hortiperl como sustrato para el llenado de los orificios realizados en el suelo, en diferentes cantidades de acuerdo a los tratamientos definidos.

### **V.3.7 Preparación de la cama de cultivo**

Se instaló una cinta de riego de la marca Aqua-Traxx Toro sobre el centro de la cama, con goteros colocados hacia arriba cada 30 cm, con gasto de 1 L h<sup>-1</sup>. Enseguida se cubrió la cama con acolchado plástico negro/negro y se dio un riego de pretrasplante en el que se aplicó Carbofuran contra insectos y nemátodos del suelo.

### **V.3.8 Preparación del invernadero**

Se realizó deshierbe dentro y fuera del invernadero, se barrió la cubierta del suelo o groundcover, se limpió la cisterna de la pared húmeda, se aplicó herbicida dentro y fuera del local, se lavó el filtro de acceso y se desinfectó dentro y fuera con Metomilo.

### **V.3.9 Trasplante**

El trasplante se realizó el 3 de octubre de 2019, a los 61 días después de la emergencia. Las plántulas se colocaron en una sola hilera, sobre el centro de la cama de cultivo, con una separación entre plantas de 30 cm. Dos días después se aplicaron de manera preventiva al drench de la planta, los fungicidas Ciazofamida 34.78% y Fluoxastrobin 40%, en dosis de 450 mL ha<sup>-1</sup> y 1.5 L ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

### V.3.10 Nutrición del cultivo

La solución nutritiva que se utilizó fue la propuesta por Alarcón (2006) con la siguiente composición iónica (en mmol/L):  $\text{NO}_3^-$ , 14.0;  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , 1.7;  $\text{K}^+$ , 5.0;  $\text{Cl}^-$ , < 8.0;  $\text{SO}_4^{2-}$ , 2.0;  $\text{NH}_4^+$ , 0.0-0.5;  $\text{Ca}^{2+}$ , 5.0;  $\text{Mg}^{2+}$ , 2.5 y  $\text{Na}^+$  < 8.0. Dicha solución se modificó de acuerdo a la etapa de desarrollo del cultivo.

La preparación de la solución nutritiva se realizó inicialmente en tres tinacos, dos de 1,000 L cada uno y otro de 500 L. En el tanque #1 se manejaron los ácidos nítrico y fosfórico, en el tanque #2 se mezclaron los fertilizantes sólidos como nitrato de amonio, nitrato de potasio, fosfato mono potásico, nitrato de magnesio, sulfato de potasio y micronutrientes; y en el tanque #3 se preparó nitrato de calcio. Posteriormente se habilitó un cuarto tanque de 1,000 L para poner por separado al fosfato monopotásico. En el Cuadro 3 se muestran los fertilizantes utilizados en la preparación de las soluciones nutritivas empleadas durante el ciclo del cultivo.

**Cuadro 3.** Características generales de las soluciones nutritivas utilizadas en el cultivo de pimiento morrón en invernadero en el Campo Experimental de CIQA.

Tinaco	Fertilizante	Unidad	05.10.2019	28.10.2019	11.12.2019	04.02.2020
#1 500 L	Ácido nítrico	L	1.23	1.4	1.13	1.13
	Ácido fosfórico	L	0	0	0.51	0.51
#2 1,000 L	Nitrato de potasio	kg	0.23	0.89	1.84	0.51
	Fosfato mono potásico	kg	0.3	0.6	0	1.70
	Nitrato de amonio	kg	0	0.12	0.12	0.10
	Nitrato de magnesio	kg	0	1.16	1.13	2.11
	Sulfato de potasio	kg	0	0	0.94	0.00
	Micronutrientes	kg	0.34	0.34	0.34	0.34
#3 1,000 L	Nitrato de calcio	kg	0.17	0.48	0.34	1.12
pH esperado			5.5	5.5	5.5	5.5
CE esperada		dS m <sup>-1</sup>	2.63	2.85	3.02	3.01
Tasa de inyección		L m <sup>-3</sup>	140	140	140	140

Para reforzar la nutrición del cultivo también se realizaron varias aplicaciones foliares de ácidos húmicos y fúlvicos en dosis de 1.0 L ha<sup>-1</sup> en 200 L de agua.

### V.3.11 Método de riego

El cultivo se regó con un sistema de riego por goteo, utilizándose dos válvulas, una para cada frecuencia de riego. Para la programación y aplicación de los riegos se utilizó el equipo Fertikit y el programador NMC-PROL marca NETAFIM. En todos los tratamientos la lámina de riego aplicada se calculó considerando las propiedades hidrodinámicas del suelo para estimar su capacidad de retención de agua, y por otro lado con base en la evapotranspiración del cultivo.

### V.3.12 Poda de flores

Se realizaron varias podas de flores y botones florales con el objetivo de promover un mayor desarrollo vegetativo de aquellas plantas que tenían poca altura.

### V.3.13 Metodología aplicada para la programación del riego

La capacidad del suelo para retener agua y tenerla disponible para las plantas se calculó considerando sus propiedades hidrodinámicas, utilizando el programa HYDRUS-1D versión 4.16.011, el cual se alimentó con datos del contenido porcentual de arena, limo y arcilla, además de los datos de densidad aparente (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Propiedades hidrodinámicas del suelo del invernadero de media tecnología del Campo Experimental del CIQA en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah. estimadas utilizando el módulo Rosetta Lite v.1.1. (June 2003) del software Hydrus-1D versión 4.16.011.

Parámetro	Unidades	0-20 cm	20-40 cm
Capacidad de Campo (CC)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.22	0.18
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.07	0.06
Agua disponible (AD)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.15	0.12
Nivel de agotamiento permisible (F1)	%	10%	10%
Nivel de agotamiento permisible (F2)	%	30%	30%
Agua fácilmente disponible (NAP 10%)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.02	0.01
Agua fácilmente disponible (NAP 30%)	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.04	0.04

Los valores de agua fácilmente disponible en el suelo (AFD) calculadas con NAP's de 10% y 30%, junto con las estimaciones de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y del cultivo (ET<sub>c</sub>), se consideraron diariamente de lunes a jueves en una plantilla en Excel que desarrollaba un balance hídrico del suelo, el que indicaba el momento y tiempo de riego necesarios, para reponer el agua consumida y llevar el suelo nuevamente a su capacidad de campo.

Dentro del invernadero se instaló un sensor marca HOBO UX100-0xx para registrar temperatura y humedad relativa, el cual almacenaba cada 15 minutos los datos de dichas variables, que se procesaron en Excel para obtener un promedio cada hora. Adicionalmente, se instaló un piranómetro PYR para registrar la radiación solar incidente, la cual se almacenó en un datalogger CR1000 cada 15 minutos, procesándose en Excel para obtener un promedio de cada hora. Estos datos se descargaban diariamente de lunes a jueves, y se utilizaron para alimentar la ecuación FAO Penman-Monteith y calcular la evapotranspiración de referencia cada hora y la del día.

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) al interior del invernadero, se estimó de acuerdo a la ecuación FAO-Penman-Monteith, la cual para cálculos horarios se modificó de la siguiente manera (Allen *et al.*, 2006):

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia (mm hora<sup>-1</sup>)

R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> hora<sup>-1</sup>)

G: densidad del flujo de calor de suelo (MJ m<sup>-2</sup> hora<sup>-1</sup>)

T<sub>hr</sub>: temperatura media del aire cada hora (°C)

u<sub>2</sub>: promedio horario de la velocidad del viento (m s<sup>-1</sup>)

e<sup>o</sup> (T<sub>hr</sub>): presión de vapor de saturación a temperatura del aire T<sub>hr</sub> (kPa)

e<sub>a</sub>: promedio horario de la presión real de vapor (kPa)

e<sup>o</sup> – e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en T<sub>hr</sub> (kPa °C<sup>-1</sup>)

γ: constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) se calculó como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>) y el coeficiente del cultivo K<sub>c</sub> (Allen *et al.*, 2006), acorde a la siguiente ecuación:

$$ET_c = (K_c) (ET_o)$$

Donde:

ET<sub>c</sub>: Evapotranspiración del cultivo (mm/día)

ETo: Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día)

Kc: Coeficiente de cultivo (adimensional)

Para la determinación del coeficiente de cultivo (Kc) del pimiento morrón, se consultó el Boletín No. 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006), obteniéndose los siguientes valores.

Kc por etapa de crecimiento del cultivo			
Inicial	Desarrollo vegetativo	Temporada media	Final de temporada
0.60	“Calculado”	1.05	0.90

Teniendo como referencia experiencias anteriores en el cultivo del pimiento, se establecieron los siguientes parámetros:

Parámetro del cultivo	Etapa de crecimiento del cultivo				
	Emergencia	Inicial	Desarrollo vegetativo	Etapa media	Final de temporada
Duración de la etapa (días)	8	22	60	70	20
Profundidad radicular (m)	0.10	0.15	0.30	0.35	0.40

Con estos datos, además de las propiedades hidrodinámicas del suelo y de la evapotranspiración del cultivo, se construyó el balance hídrico del suelo, el cual indicaba el día preciso de riego y la duración del mismo, para reponer el agua consumida y llevar el suelo nuevamente a un contenido de humedad de capacidad de campo.

#### V.3.14 Control de plagas y enfermedades

Para la prevención de enfermedades como la cenicilla polvorienta (*Oidiopsis* sp.), se realizaron con frecuencia aplicaciones de azufre al follaje en dosis de 3 g L<sup>-1</sup> de agua. También se hicieron aplicaciones preventivas foliares con Trifloxystrobin 50% en dosis de 50 g (100 L)<sup>-1</sup> agua y Fluoxastrobin 40% a dosis de 300 ml (400 L)<sup>-1</sup> agua. Para la prevención de enfermedades de la raíz, se hicieron aplicaciones al drench de Ciazofamida 34.78% en dosis de 450 ml ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup>, Fluoxastrobin 40% a dosis de 1.5 L ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup> y Oxiclورو de cobre 13.57% a dosis de 2.5 L ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup>.

Las principales plagas que se presentaron fueron trips (*Frankliniella occidentalis*) y gusano minador de la hoja (*Liriomyza trifolii*). Para el control de los trips en las etapas tempranas del cultivo se aplicó al drench Imidacloprid a dosis de 0.375 kg ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup>, Pyriproxifen 0.4 L ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup> al follaje, Metomilo a dosis de 300 g ha<sup>-1</sup> (400L)<sup>-1</sup> y

Spinosad 48% a dosis de 400 ml ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup>. Para el control del minador de la hoja se aplicó al follaje Abamectina a dosis de 500 ml ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup> y Ciromazina a dosis de 125 g ha<sup>-1</sup> (400 L)<sup>-1</sup>.

#### **V.3.15 Tutorado**

Se instalaron varas cada cuatro metros para sostener los hilos de rafia para tutoreo de las plantas de pimiento. Se instalaron cinco hilos de rafia negra a diferentes alturas de las plantas. Se reforzó el soporte de las plantas con sujetacables o cinchos de nylon.

#### **V.3.16 Raleo de frutos**

Se realizó una poda o aclareo de frutos con la finalidad de promover un mayor desarrollo vegetativo de aquellas plantas que tenían poca altura.

#### **V.3.17 Cosecha**

El primer corte de frutos se realizó el 7 de enero de 2020 a los 96 ddt. La última cosecha se realizó el 7 de mayo de 2020. En el transcurso del ensayo se realizaron 9 cortes de frutos. Los datos de rendimiento del primer corte no se consideraron en el estudio, porque en la etapa de desarrollo de los primeros pimientos, se realizó un aclareo de los mismos para promover el desarrollo vegetativo de aquellas plantas que presentaban poco porte. La cosecha fue manual, siendo el criterio de corte principalmente la firmeza que presentaba el fruto al tacto.

### **V.4 Variables medidas**

#### **V.4.1 Radiación solar incidente dentro del invernadero.**

Se utilizó un piranómetro PYR, que estaba conectado a un datalogger Campbell Scientific CR1000, que registró lecturas en continuo cada 15 minutos, instalado por encima del dosel del cultivo, al centro del invernadero. Por las mañanas, de lunes a jueves, se descargaron los datos para estimar la Et del cultivo.

#### **V.4.2 Temperatura y humedad relativa.**

Se utilizó un sensor tipo HOBO UX100-011, que midió temperatura y humedad relativa al mismo tiempo. El equipo registró lecturas cada 15 minutos. Al interior del invernadero, se instaló por encima del dosel del cultivo al centro del invernadero. Por las

mañanas, de lunes a jueves, se descargaron los datos para estimar la evapotranspiración del cultivo.

#### **V.4.3 Aportes de agua de riego.**

Se instalaron dos caudalímetros marca ARAD, para registrar la cantidad de agua realmente aplicada en cada una de las frecuencias de riego aplicadas. Se destinó una válvula de riego para cada frecuencia de riego definida. Cada caudalímetro estaba conectado a una válvula de riego y al datalogger CR1000, que registró lecturas en continuo, cada vez que se regaban las plantas.

#### **V.4.4 Tasa de fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración.**

Se realizaron mediciones utilizando el equipo portátil LICOR LI-6400 XT, en hojas sanas y jóvenes completamente desarrolladas y expuestas al sol. Las lecturas se hicieron entre las 12:00 y 13:00 horas con cielos despejados, tomando una planta por cada tratamiento por bloque, para tener un total de cuatro datos por tratamiento por cada fecha de muestreo.

#### **V.4.5 Estado hídrico de la planta.**

El potencial del agua de la planta se midió utilizando el equipo portátil Plant Water Status Console Model 3115 o cámara de presión tipo Scholander tradicional, evaluando hojas sombreadas, desarrolladas, sin daño mecánico, que se cubrieron con pequeñas bolsas de papel aluminio por un tiempo mínimo de 30 minutos, para que la planta al no recibir luz, cerrara los estomas y el potencial hídrico de la hoja se equilibrara con el potencial hídrico del tallo. Las mediciones se realizaron con cielos despejados a las 13:00 horas del día, tomando una planta por cada tratamiento por cada bloque, para tener un total de cuatro datos por tratamiento por cada fecha de muestreo.

#### **V.4.6 Crecimiento del diámetro del tallo y altura de plantas.**

Se realizaron mediciones utilizando un vernier tipo Electronic Digital Caliper para medir el diámetro basal del tallo y una cinta métrica para la altura de la planta. El diámetro del tallo se midió lo más cercano posible a su base, en un punto donde no hubiera interferencias por ramas u hojas. La altura de la planta se midió, tomando como referencia la ubicación más alta de los brotes florales o flores. Como punto de partida se hicieron mediciones de 10 plantas por repetición. Las mediciones posteriores se hicieron tomando

tres plantas de cada tratamiento por repetición, para un total de 12 plantas por tratamiento por cada fecha de muestreo.

#### **V.4.7 Desarrollo del área foliar.**

Las mediciones se realizaron utilizando un equipo medidor de área marca LI-COR modelo LI-3100C. En cada fecha de muestreo, se cortó una planta desde el ras del suelo (muestreo destructivo) por cada tratamiento de cada bloque, para un total de cuatro plantas por tratamiento.

#### **V.4.8 Desarrollo del sistema radicular.**

Se evaluó el desarrollo de las raíces, después de realizar el tercer muestreo destructivo. Se utilizó una rejilla cuadrada de hierro, de 40 cm por lado, con 16 cuadrantes o celdas de 1 litro de volumen, de 10 cm por lado y una profundidad de 10 cm. Se colocó en el suelo, sobre la cama de cultivo y primero se introdujo en el terreno 10 cm. Cada cubo de suelo se retiró por separado y se colocó en una bolsa de plástico. Después la rejilla se introdujo otros 10 cm, en el mismo lugar. Las muestras se lavaron, las raíces se secaron en la estufa y se registró el peso seco en una balanza analítica electrónica.

#### **V.4.9 Acumulación de biomasa seca.**

Para determinar la partición de biomasa seca, se realizaron mediciones de esta variable mediante el corte de la planta y separándose en tallo, hojas, frutos y flores. Se cortó una planta de cada tratamiento de cada repetición, para tener un total de cuatro plantas por tratamiento por cada fecha de muestreo. Las partes de la planta se colocaron por separado en bolsas de papel, y se pusieron en el cuarto de secado a una temperatura de 70 °C durante 72 horas, y posteriormente se pesaron en una balanza digital.

#### **V.4.10 Densidad aparente del suelo.**

Se tomaron muestras de suelo para los estratos 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm en cuatro sitios diferentes dentro del invernadero, al inicio del ciclo (07-10-2019) y al inicio de la cosecha (21-01-2020). Para ese fin se utilizó una barrena de aluminio, con un diámetro promedio de 4.75 cm. Las muestras se tomaron en el punto medio entre plantas y se colocaron en bolsas de plástico. Se pesaron inmediatamente en una balanza marca Tor-Rey modelo PZC-10. Se llevaron al laboratorio y se envolvieron en papel aluminio, poniéndose a secar en un horno marca Precision tipo Economy Oven Mechanical

Convection a 105 °C, hasta tener peso constante. Las muestras secas se pesaron en una balanza Ohaus Navigator XL.

#### **V.4.11 Porosidad del suelo.**

Con los datos de densidad aparente obtenidos, se calculó la porosidad del suelo, según la metodología propuesta por Gómez (2013), usando la siguiente ecuación:

$$P = [1 - (D_a/D_r)] \times 100$$

Dónde: P = Porosidad total, en %;  $D_a$  = Densidad aparente, en  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $D_r$  = Densidad real de las partículas del suelo (se utilizó el valor de  $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ ).

#### **V.4.12 Resistencia mecánica del suelo a la penetración.**

La resistencia del suelo se determinó al inicio del ciclo y al inicio de la cosecha, utilizando un equipo medidor de compactación del suelo marca Agratronix modelo 08180 con punta de diámetro de  $\frac{1}{2}$ ", recomendada para suelos firmes. Se realizaron mediciones en todos los tratamientos de los cuatro bloques, lo cual arrojó cuatro datos o repeticiones por tratamiento. En cada punto se introdujo el equipo ejerciendo una presión y velocidad constantes, registrándose la profundidad a la cual se presentaban los límites de los rangos establecidos por el fabricante.

El penetrómetro Agratronix proporciona lecturas en tres rangos, que evalúan el grado de compactación del suelo: (1) 0-200 psi, en color verde, sin problemas para el desarrollo de las raíces; (2) de 200-300 psi, en color amarillo, que implica condiciones regulares para el crecimiento radicular y (3) más de 300 psi, en color rojo, con restricciones para el buen funcionamiento radicular. La capacidad máxima del equipo es de 24 pulgadas o 61 cm de profundidad.

#### **V.4.13 Composición química de la solución del suelo.**

Se realizaron muestreos del suelo para la elaboración de pastas saturadas. Las profundidades de muestreo fueron 0-20 y 20-40 cm. Se obtuvieron tres muestras compuestas en cada fecha, tomando suelo del punto medio entre plantas. Las pastas saturadas se elaboraron utilizando vasos de vidrio y agua destilada. Se dejaron reposar 24 horas y después se obtuvieron los extractos de suelo utilizando el equipo Plant Water Status Console Model 3005F01 de la marca SoilMoisture Equipment Corp. Los extractos obtenidos se purificaron, utilizando papel filtro Whatman grado 42. Después se midió pH

y conductividad eléctrica con un equipo HANNA Combo pHyEC, así como los iones  $\text{NO}_3$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , utilizando medidores LAQUAtwin Horiba previamente calibrados.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### VI.1 Caracterización del sitio experimental

#### VI.1.1 Análisis fisicoquímico del suelo

Los resultados del análisis de laboratorio del terreno suelo donde se llevó a cabo el ensayo, se muestran en el Cuadro 5. Los valores de pH en el perfil de 0 a 40 cm de profundidad están por arriba de 7.0, por lo que se considera como un suelo medianamente básico y por lo general hay carbonato de calcio en el mismo. La conductividad eléctrica es mayor a 4.0 unidades, por lo que se clasifica como un suelo ligeramente salino (Barrett-Lennard *et al.*, 2008b). Por los contenidos de materia orgánica, se le considera un suelo medianamente pobre. Por la composición del tamaño de partículas, el suelo tiene una textura franca (suelo limoso).

**Cuadro 5.** Resultados del análisis físico-químico del suelo del invernadero de media tecnología del Campo Experimental del CIQA en el predio Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah.

	Estrato	0-20 cm	20-40 cm
Parámetro	Unidad	Resultado	Resultado
pH		7.89	7.82
Conductividad eléctrica	(dS m <sup>-1</sup> )	4.39	4.83
Materia orgánica	(%)	1.21	0.67
Textura		Limoso	Limoso
Arcilla	(%)	23	21
Arena	(%)	35	41
Limo	(%)	42	38

#### VI.1.2 Propiedades de fertilidad del suelo

Los análisis de fertilidad realizados por el laboratorio Phytomonitor de Culiacán, Sinaloa para conocer el potencial productivo del suelo, se muestran en el Cuadro 6. De acuerdo con la valoración realizada por el mismo laboratorio, para el estrato 0-20 cm los contenidos de nitrógeno en forma de nitratos son bajos.

En relación con el fósforo disponible, los niveles detectados también se consideran muy bajos en ambos estratos. Las concentraciones de sulfatos en el suelo se juzgan muy elevadas, ya que superan ampliamente los valores considerados normales.

El contenido de sodio también se considera alto en comparación con los niveles considerados óptimos, pero sin llegar a convertirse en porcentajes de sodio intercambiable (PSI) indeseables. Los niveles de potasio se estiman dentro del rango normal.

Los niveles de calcio resultaron ser muy elevados en comparación con los demás iones; para el primer estrato, supera el límite superior considerado óptimo y cerca del límite superior en la segunda capa. Este elemento domina el complejo de intercambio del suelo, con un porcentaje de saturación de bases (PSB) superior al 80%. El magnesio se ubica dentro del rango normal.

**Cuadro 6.** Resultados del análisis de fertilidad del suelo del invernadero del Campo Experimental del CIQA en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah.

Parámetros de fertilidad del suelo	Estrato	0-20 cm	20-40 cm	Nivel óptimo	Porcentaje de saturación de bases (%)	
	Unidad	Resultado	Resultado			
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ppm	12	46.4	20-40		
P-PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	ppm	2	2	20-30		
S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	ppm	692	638	60-100		
Sodio Na <sup>+</sup>	ppm	359	410	<150	6.9	8.5
Potasio K <sup>+</sup>	ppm	156	160	100-250	1.9	1.9
Calcio Ca <sup>+2</sup>	ppm	3,690	3,410	1500-3500	82.2	80.9
Magnesio Mg <sup>+2</sup>	ppm	260	230	200-500	9.2	8.8

### VI.1.3 Propiedades hidrodinámicas del suelo

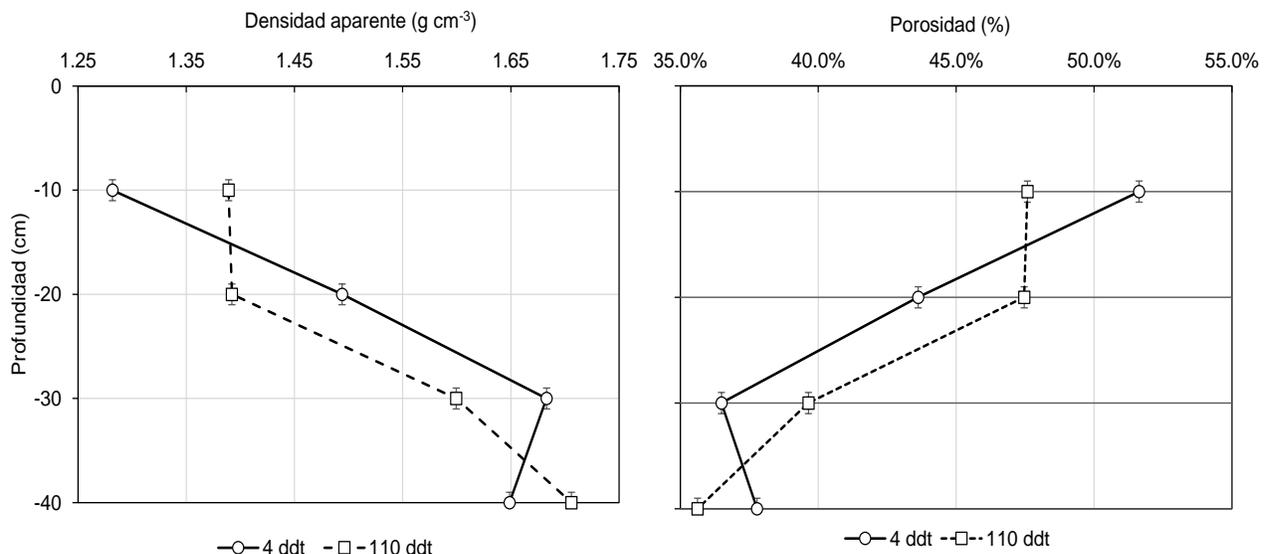
Estas propiedades son importantes en la programación del riego, porque sirven de base para estimar la capacidad máxima de retención de agua, el agua disponible (AD) y el agua fácilmente disponible (AFD) en el suelo, que, junto con la evapotranspiración del cultivo, permiten elaborar el balance hídrico y determinar el momento y tiempo de riego. En el Cuadro 7 se presentan los valores promedio de tales propiedades. Esas variables se estimaron utilizando el módulo Rosetta Lite v.1.1. (June 2003) dentro del programa HYDRUS-1D versión 4.16.0110, con datos de la textura y densidad aparente del suelo.

**Cuadro 7.** Propiedades hidrodinámicas del suelo del invernadero, del Campo Experimental del CIQA en Ramos Arizpe, Coah.

Propiedad	Unidades	Valor
Capacidad de Campo (CC)	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.22
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.07
Agua disponible (AD)	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.15

#### VI.1.4 Densidad aparente y porosidad

Los resultados de densidad aparente para cuatro estratos o capas de suelo de 10 cm se muestran en la Figura 1, que fueron obtenidos al inicio del ciclo (07-10-2019, 4 ddt) y al inicio de la cosecha (21-01-2020, 110 ddt). Se observa que, en general, la variable se incrementa linealmente con la profundidad. Además de que este indicador nominalmente cambió con el tiempo. Para los estratos 00-10 y 30-40 cm, el parámetro resultó ser mayor a la cosecha, pero en el resto de las capas disminuyó. Al inicio del ciclo, solo el horizonte de 00-10 cm presentó una densidad menor a  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ . Cabe mencionar que, en la fecha inicial, el contenido gravimétrico promedio de humedad en el suelo fue 19.9%, mientras que para la segunda fecha fue de 20.1%.



**Figura 1.** Densidad aparente y porosidad hasta 40 cm de profundidad, en cuatro estratos del perfil del suelo, evaluada a los 4 y 110 ddt dentro del invernadero.

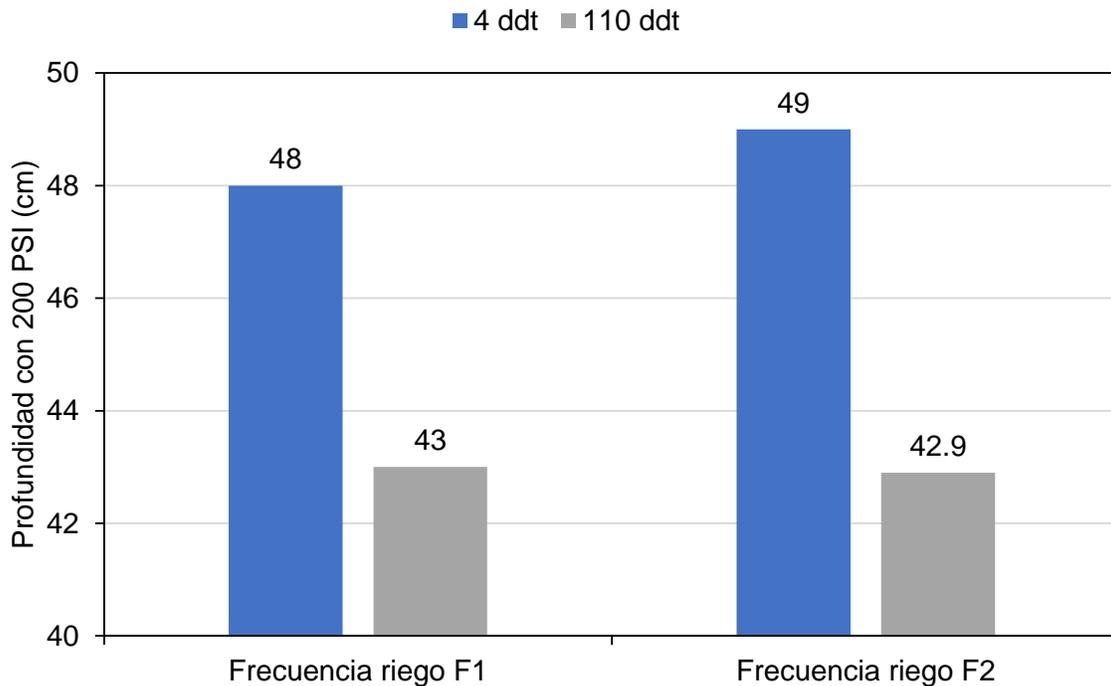
La porosidad del suelo se estimó con fórmula con los datos de densidad aparente y la densidad real tomando un valor de  $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ . Se observa que, en general, la

variable se reduce linealmente con la profundidad del suelo. Además, que la cantidad de poros en el suelo en términos absolutos cambió con el tiempo (Figura 1).

Para los estratos 00-10 y 30-40 cm, el parámetro resultó ser menor durante la cosecha, pero en el resto de las capas aumentó. Dado que esta variable es una propiedad que cambia inversamente proporcional a la densidad aparente, el comportamiento de los resultados encontrados es congruente con los datos de densidad aparente registrados.

### VI.1.5 Resistencia mecánica del suelo a la penetración

Los datos de resistencia del suelo colectados a 4 y 100 ddt, mediante el empleo de un penetrómetro con fuerza de 200 psi, se muestran en la Figura 2. El promedio de las lecturas tomadas en diferentes puntos de la parcela experimental muestran un significativo cambio en la resistencia del suelo a la penetración provocando, a 110 ddt, una reducción en la penetración de 5 a 6 cm lo que equivale a un 9% menos con respecto al valor registrado a 4 ddt (Figura 2). No se observan cambios en la resistencia del suelo provocados por la frecuencia del riego por goteo.



**Figura 2.** Profundidad del suelo a la que se mantiene una resistencia a la penetración de 200 PSI, evaluada a los 4 y 110 ddt, bajo dos frecuencias de riego en pimienta morrón.

Al analizar los datos recolectados al inicio del ciclo, se llega a la conclusión de que el suelo del sitio experimental si puede ser considerado como compactado, y que esta condición se presenta en diferentes grados a través del perfil del suelo. La evaluación inicial de la dureza nos muestra que hasta los 10 cm de profundidad, el suelo se puede considerar normal, sin problemas de compactación, ya que los valores encontrados fueron de  $1.28 \text{ g cm}^{-3}$ , menores a los umbrales críticos establecidos.

Sobre este criterio, diversos autores como Materechera *et al.* (1992) establecen que un suelo con una densidad aparente mayor de  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$ , es catalogado como problemático con consecuencias importantes en el crecimiento de la raíz. Por su parte, Pazaca (2019) determinó también una densidad crítica de  $1.3 \text{ g cm}^{-3}$  para chile habanero.

Algunos investigadores como Andrade *et al.* (1993) encontraron que densidades aparentes de  $1.2$  a  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$ , redujeron el crecimiento en girasol, debido a que las hojas tuvieron velocidades de crecimiento más lentas y menor tamaño de hojas individuales. Por su parte, Shierlaw y Alston (1984), encontraron que con una densidad aparente de  $1.55 \text{ g cm}^{-3}$ , la longitud de la raíz se redujo en 50 % y que las raíces no crecieron a densidades aparentes iguales o mayores a  $1.55 \text{ g cm}^{-3}$ .

Sin embargo, a partir de los 10 cm de profundidad, el suelo si presenta problemas de compactación, ya que los valores de densidad aparente rebasan el nivel óptimo. Las zonas más críticas en cuanto a compactación son de los 10 cm de profundidad hacia abajo. La compactación que se observa de los 30-40 cm, está relacionada con las características químicas del suelo, ya que los Calcisoles tienden a compactarse muy fuerte de manera natural, sin la intervención del hombre.

Las características de densidad aparente inicial de la capa 0-10 cm les proporcionaron un efecto especial a los resultados obtenidos en el medio de crecimiento P0000 que representa el cultivo en suelo natural, ya que el valor de densidad encontrado es considerado normal, lo que significa que no todo el perfil del suelo es inadecuado para el crecimiento de las raíces.

Lo anterior significa que la raíz de pimiento puede extenderse con toda facilidad en el sentido horizontal en los  $360^\circ$ , sin restricciones, pero no en el sentido vertical, ya que más allá de los 10 cm de profundidad, la compactación es mayor al nivel crítico establecido para el óptimo desarrollo radicular, de tal manera que con una densidad

adecuada en dicha capa, es probable que en las primeras etapas del crecimiento de la planta, el desarrollo de la raíz pueda ser normal e inclusive que esta condición les confiera una ventaja competitiva inicial sobre las plantas desarrolladas en sustrato artificial.

Cabe resaltar que el suelo no modificado conserva sus propiedades, lo que lo convierte en un reservorio de agua y nutrientes más grande y estable que la perlita, la que tiene una gran porosidad y baja resistencia mecánica, pero una baja capacidad de retención de agua y minerales, que si no son reabastecidos con frecuencia se puede ver afectado el desarrollo por déficit hídrico y nutrimental, particularmente si esto llega a suceder en el medio con mayor volumen de perlita (P2020).

De hecho, la respuesta a los medios de crecimiento de las variables morfológicas como altura de planta, diámetro del tallo y área foliar, presentó diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) en casi todo el ciclo, en el que se observó que el medio P0000 siempre fue el mejor. Desde las primeras mediciones y casi hasta el final del ciclo, se observó la predominancia de las plantas cultivadas en el suelo normal: más altas, con tallo más grueso y con follaje más abundante. La comparación entre tratamientos mostró diferencias significativas en altura de planta, siendo el mejor el F1-P0000.

Del segundo análisis realizado al inicio de la cosecha, a los 97 ddt, se detectaron cambios en el tiempo en los valores de densidad aparente, aunque no esos cambios no fueron estadísticamente significativos. Para la capa 0-10 cm, la variable cambió a  $1.39 \text{ g cm}^{-3}$ , posiblemente debido a la existencia de agregados débiles que se deshacen en contacto con el agua, provocando reacomodos de las partículas del suelo, tal como lo sugiere Tasistro (2019). En el resto de las capas más profundas del perfil, la densidad aparente también cambió, disminuyendo, aunque de manera no estadísticamente significativa. Estos cambios se atribuyen al efecto del crecimiento de las raíces del cultivo y la exploración por las mismas de la masa del suelo.

A pesar de que es evidente la presencia de niveles elevados de compactación en el suelo del invernadero, que de acuerdo con la literatura pueden ocasionar repercusiones en el desarrollo y rendimiento de los cultivos, en este caso pareciera ser que el efecto del endurecimiento del suelo en las variables evaluadas no fue determinante, ya que en la mayoría de las variables fisiológicas, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Se considera que otra posible explicación a estos resultados, es que las frecuencias de fertirriego que se aplicaron permitieron mantener niveles de humedad y nutrientes en el suelo relativamente altos, lo que influyó de alguna manera para que el efecto de la compactación del suelo no fuera más acentuado.

Al respecto, algunos autores como Hossne (2008) señalan que para un mismo suelo y cultivo, la densidad aparente no es una variable constante en el tiempo, ya que puede ser afectada y cambiar con el contenido de humedad en el suelo. Este autor menciona también que en el proceso de expansión/contracción del suelo, provocado naturalmente por los cambios de humedad asociados al riego, el volumen de una masa de suelo tiende a oscilar, produciendo cambios en la densidad aparente.

En este mismo sentido, Berardi *et al.* (2019) descubrieron que un alto régimen de humedad del suelo (cercano a capacidad de campo) y un alto contenido de nutrientes y materia orgánica, redujeron la severidad de la compactación del suelo en el desarrollo de las raíces y brotes de las plántulas de pimiento.

## **VI.2 Condiciones ambientales de desarrollo**

### **VI.2.1 Características generales del entorno microclimático**

En el Cuadro 8 se presentan los promedios mensuales de las variables que determinaron el microambiente dentro del invernadero durante el ciclo de cultivo de 217 días. La temperatura máxima del período se registró en marzo, con 41.3 °C, aunque con prevalencia de pocas horas al día. La temperatura mínima más baja se registró en febrero, con -0.5 °C. Se puede apreciar también que, en diciembre y febrero se registraron las temperaturas promedio más bajas del ciclo dentro del invernadero, pero el cultivo no mostró síntomas visuales de afectación por frío. Por otro lado, las bajas temperaturas prevalecientes contribuyeron a la presencia de altos niveles de humedad relativa en el ambiente, con valores máximos por encima de 80%.

Durante el desarrollo del cultivo, la radiación solar fue menor a la que requiere el pimiento para su crecimiento, principalmente en los meses de otoño-invierno. Al respecto, en el período de octubre a febrero, la radiación solar máxima registrada al interior del invernadero fue de 525.7 W m<sup>-2</sup>, el 6 de octubre de 2019 a las 13:00 horas y descendió hasta 334.4 W m<sup>-2</sup>, el 12 de diciembre de 2019 a las 13:00 horas. El valor máximo

promedio de déficit de presión de vapor (DPV) fue de 6.9 kPa en marzo y el mínimo de 0.1 kPa en enero, febrero y marzo.

## VI.2.2 Evolución de las variables climáticas al interior del invernadero

### Radiación solar

Durante el período otoño-inverno del año 2019, los valores máximos de radiación solar se registraron en octubre y fueron descendiendo hasta alcanzar el nivel más bajo en diciembre, para después retomar el crecimiento a partir de enero del 2020 (Figura 3A). Los datos de radiación disponibles (Cuadro 8) muestran que en abril los valores máximos fueron  $665.2 \text{ W m}^{-2}$  (equivalentes a  $1,343.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de PAR), mientras que en diciembre la máxima fue  $334.4 \text{ W m}^{-2}$  (la mitad de la recibida en abril).

**Cuadro 8.** Promedios mensuales de las variables climáticas registradas al interior del invernadero del Campo Experimental del CIQA, en Las Encinas, Mpio. de Ramos Arizpe, Coah. en el período octubre de 2019 a mayo de 2020.

Variable	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Déficit de presión de vapor (kPa)			Radiación solar ( $\text{W m}^{-2}$ )	
	Mes	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.
Octubre	38.0	6.6	22.2	84.2	19.9	54.8	5.2	0.2	1.5	525.7	102.8
Noviembre	34.5	4.7	17.8	84.1	14.9	58.6	4.0	0.2	1.1	428.7	65.1
Diciembre	35.9	-0.6	15.4	81.0	12.1	52.1	5.0	0.2	1.1	334.4	52.7
Enero	31.1	1.5	14.8	91.4	14.7	62.4	3.6	0.1	0.8	400.0	72.5
Febrero	38.7	-0.5	16.7	88.8	8.3	57.7	5.2	0.1	1.1	506.8	96.1
Marzo	41.3	6.2	21.6	92.9	12.3	57.1	6.9	0.1	1.5	591.8	96.3
Abril	39.6	7.6	23.9	82.4	7.3	49.0	6.4	0.2	1.9	665.2	144.0
Mayo	36.8	14.7	23.6	79.0	21.7	53.4	4.8	0.4	1.7	643.3	127.7

El comportamiento de la radiación solar en el ciclo fue idéntico a la tendencia observada para la temperatura, ya que presentó una tendencia descendente desde octubre, con valores máximos de  $525.7 \text{ W m}^{-2}$  hasta enero con  $400.0 \text{ W m}^{-2}$ . En febrero se detecta el incremento de la radiación solar recibida, pero sin alcanzar el nivel registrado en octubre pasado.

Los datos disponibles muestran que en abril el valor máximo de radiación solar fue  $665.2 \text{ W m}^{-2}$  (equivalentes a  $1,343.8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de PAR), mientras que, en diciembre, donde se obtuvo el valor más bajo, la máxima fue  $334.42 \text{ W m}^{-2}$  (equivalentes a  $675.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de PAR). De acuerdo con lo establecido por Dorais y Gosselin (2002), la

radiación solar mínima que requiere el pimiento morrón para su funcionamiento, corresponde a un nivel de radiación de  $158.4 \text{ W m}^{-2}$  o  $320 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de radiación PAR. Se calcularon el valor de la Integral de Radiación Solar (IRS) y la Integral de Luz Diaria (DLI).

Para el pimiento morrón, INTAGRI (2019) publicó que la radiación solar mínima requerida en el día para no tener pérdidas de rendimiento es de  $9.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Al respecto, en el ciclo se cuantificaron 130 días con IRS menores al nivel señalado.

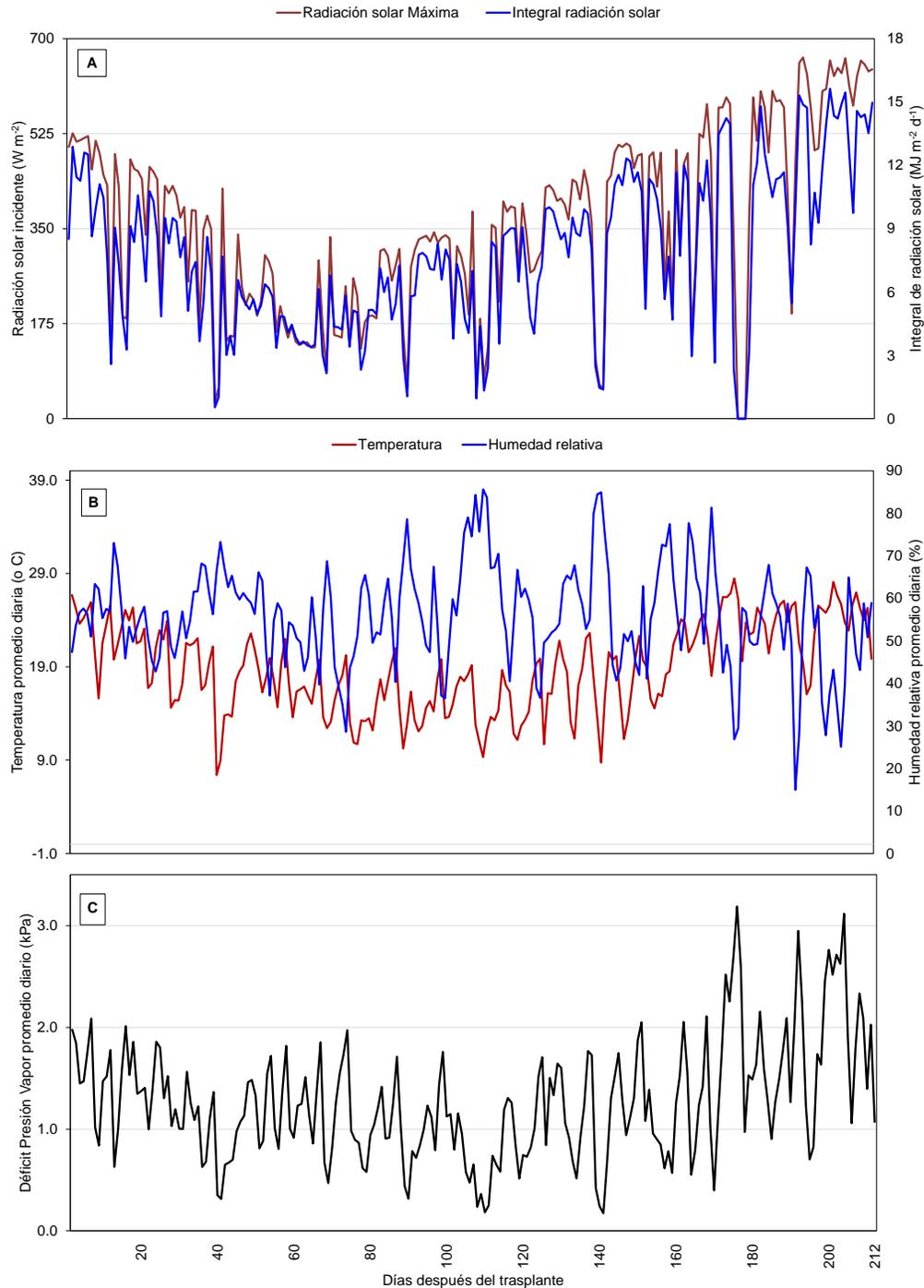
Los bajos rendimientos en invernadero, a menudo se asocian con la producción de frutos relativamente pequeños a principios de la temporada, cuando las integrales diarias de radiación solar no son suficientes (Kays, 1999). Aloni *et al.* (1996) señalan que la baja intensidad de la luz disminuyó la acumulación de azúcar en la flor y posteriormente causó la abscisión de la flor de pimiento.

Para el pimiento morrón, Torres y López (2002) mencionan que la calidad de la luz que se recibe es baja cuando la DLI está entre  $10$  a  $12 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , de buena calidad de  $14$  a  $20 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  y de alta calidad de  $22$  a  $30 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Al respecto, en el ciclo se registraron 74 días (35.2%) con DLI de calidad baja, 88 días (41.9%) de calidad buena y 48 días (22.9%) de alta calidad.

Con respecto a los factores que afectan el nivel de radiación solar incidente en un invernadero, Peet (1999) señala que la cantidad de luz solar recibida se reduce en un 30% o más por la estructura del invernadero.

Ottosen *et al.* (2003) mencionan que además durante el invierno, el nivel de densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) no es el adecuado, y como la luz es la fuente de energía que promueve la fotosíntesis y el crecimiento en las plantas, resaltan que con un PPFD bajo, los demás factores ambientales no pueden utilizarse de manera eficiente y en las latitudes cercanas al norte, el factor climático más limitante en los invernaderos es la baja intensidad de la luz. Este es un problema durante el período de invierno, debido a los días cortos y nublados (Rylski *et al.*, 1994).

En la Figura 3 se muestra la evolución de las variables climáticas registradas al interior del invernadero durante el ciclo de cultivo de pimiento morrón, las cuales fueron: A) Radiación solar e Integral de radiación solar, B) Temperatura y humedad relativa, y C) Déficit de presión de vapor. Los datos corresponden a promedio diarios.



**Figura 3.** Evolución de las variables climáticas registradas al interior del invernadero, en el Campo Experimental de CIQA en el ciclo de cultivo de pimiento morrón: A) Radiación solar e Integral de radiación solar, B) Temperatura y humedad relativa, y C) Déficit de presión de vapor. Datos promedio diarios.

Estos factores en las primeras etapas del desarrollo de la flor son importantes porque determinan el rendimiento y la calidad del fruto. La temperatura y la irradiación

bajas, provocan un desarrollo inadecuado del ovario, malformación de las flores y producción de polen inviable (Rylski *et al.*, 1994).

### **Humedad relativa**

La humedad relativa (HR) dentro del invernadero se comportó de manera inversamente proporcional a la temperatura. En los períodos de bajas temperaturas, la HR interna registró valores elevados (Figura 3B). En todo el ciclo esta variable estuvo con valores máximos por arriba de 80%, alcanzando inclusive en enero y marzo cifras mayores a 90%. Como referencia del nivel de HR prevaleciente en el ciclo, se registraron HR mayores a 70% en 162 días en el ciclo. Los valores de HR más bajos (menores a 10%) se registraron en febrero y abril.

Para el manejo de esta situación, se utilizó la ventilación pasiva levantando las cortinas del invernadero. La alta humedad ambiental también obligó a la aplicación frecuente de azufre y algunos fungicidas, para prevenir enfermedades como la cenicilla (*Oidiopsis* sp.).

De acuerdo con Ruiz *et al.* (2013), la planta de pimiento se desarrolla bien a una humedad relativa entre el 50 y 70%, y es el rango óptimo requerido en las etapas de floración y cuajado.

Villarroel *et al.* (2019) mencionan que, para el desarrollo del pimiento, la HR óptima debe estar entre 65 y 85%. Resalta que niveles mayores afectan la liberación y distribución del polen en el estigma y también se crea un ambiente favorable para el desarrollo de enfermedades foliares. Además, afirman que niveles bajos de HR pueden causar problemas de fertilización de la flor, debido al secado del polen antes de su germinación en el estigma, lo que conduce a frutos pequeños, deformes o planos.

Con respecto a los efectos de la humedad relativa en las plantas, Liu *et al.* (2006) observaron que una HR entre 55 y 90% (correspondiente a un DPV de 0.2 y 1 kPa) no tiene ningún efecto negativo en la fotosíntesis y que por el contrario, demasiada HR puede detener la transpiración y puede provocar pérdidas de turgencia en las plantas.

Por otro lado, Xu *et al.* (2007) descubrieron que las plantas cultivadas con una baja humedad relativa (lo que implica un DPV alto) tuvieron una mayor tasa de fotosíntesis, debido a que la alta transpiración causada por la baja humedad relativa, mejora la distribución de  $\text{Ca}^{+2}$  hacia las hojas jóvenes superiores y aumenta la absorción de

minerales como  $Mg^{+2}$  y  $K^{+}$ , los cuales son importantes para los procesos fotosintéticos y el crecimiento de las plantas.

Una HR muy alta representa contrariamente un déficit de presión muy bajo, por lo tanto, los intercambios gaseosos de la planta con el ambiente son reducidos, disminuyendo la transpiración pudiendo ocasionar alteraciones fisiológicas, tales como pudrición apical y un crecimiento muy lento (Flores *et al.*, 2017).

Si la HR es baja, las estomas se cierran y al no haber intercambio gaseoso, la planta deja de transpirar, no regula su temperatura y la fotosíntesis se paraliza (Flores *et al.*, 2017).

### **Déficit de presión de vapor (DPV)**

El déficit de presión de vapor está estrechamente ligado a la humedad relativa. Cuando el contenido de vapor de agua en el aire es elevado, el DPV de vapor se reduce. En el período de análisis (Figura 3C), el valor máximo de DPV se registró en marzo con 6.9 kPa. Los valores mínimos se presentaron en enero, febrero y marzo, con 0.1 kPa, aunque los valores promedio en el ciclo oscilaron de 0.8 a 1.7 kPa.

Una de las estrategias de manejo para reducir los valores de DPV en el invernadero, básicamente consisten en elevar la temperatura ambiental mediante la inyección de calor, pero en nuestro caso, la infraestructura de calefacción estuvo limitada. Además, se recomienda activar la ventilación forzada, pero en este caso no fue necesaria.

Respecto a la aplicación agronómica del DPV, Villarroel *et al.* (2019) mencionan que es una herramienta útil para evaluar la condición climática dentro de un invernadero. Afirman que su valoración facilita la toma de decisiones respecto a las acciones de manejo a implementar, como la ventilación para regular la humedad del invernadero o accionar el sistema de riego, y también ayuda a prevenir enfermedades como *Botrytis cinérea*. Como conclusión, esos autores señalan que el DPV puede utilizarse para evaluar la amenaza de enfermedades, el potencial de condensación y las necesidades de ventilación de un cultivo bajo invernadero.

Algunos otros autores señalan que los valores óptimos de DPV para el adecuado funcionamiento de las plantas, varían en un rango de 0.2 a 1.0 kPa. Por ejemplo, Barker (1990) informa que los valores de DPV entre 0.5 y 0.8 kPa son óptimos para la mayoría

de los cultivos de invernadero, ya que evitan la reducción del rendimiento y enfermedades fúngicas.

Otros autores como Iraqi *et al.* (1995) sugirieron un DPV de 0.8 kPa como el valor óptimo para los cultivos, y reportaron que la tasa fotosintética y el rendimiento del tomate, aumentan comparado con un DPV de 0.5 kPa. Flores *et al.* (2017) señalan que los valores óptimos del DPV para evitar el cierre de estomas se encuentran en el rango de 0.5-1.5 kPa. Jaimez *et al.* (2005) reportaron que en días con radiaciones PAR menores a  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ( $495 \text{ W m}^{-2}$ ), los valores de DPV fueron menores a 2.0 kPa.

El déficit de presión de vapor (DPV) está directamente relacionado con la transpiración de la planta, por lo que valores fuera del rango óptimo afectan la calidad y el rendimiento (Du *et al.*, 2018; McAdam y Brodribb, 2016). Como estrategias de manejo del DPV, Lu *et al.* (2015) encontraron que durante la época invernal mantener un DPV más bajo, incrementó el índice estomático y la conductancia estomática en tomate, lo que condujo a un aumento en la tasa fotosintética neta.

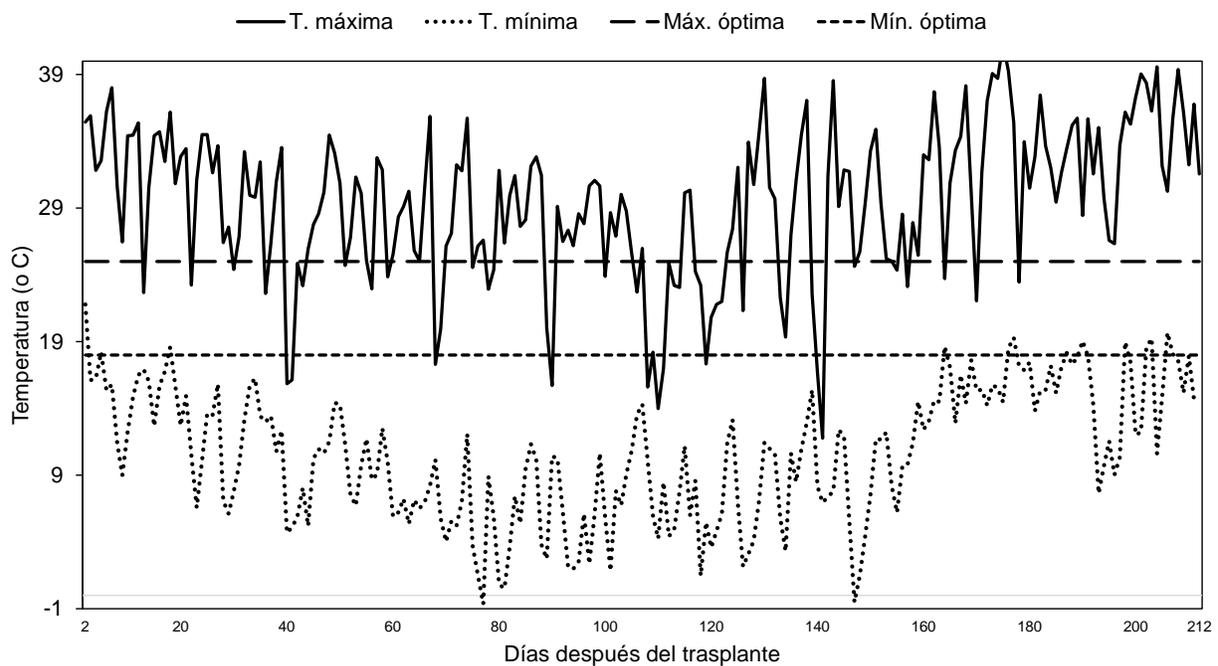
Pero otros autores descubrieron lo contrario, como Xu *et al.* (2007) que encontraron que las plantas cultivadas en condiciones de baja HR (lo que significa un DPV alto = 0.97 kPa), tuvieron una mayor tasa fotosintética y mayores actividades relacionadas con la fotosíntesis que las plantas cultivadas en alta HR (DPV bajo = 0.4 kPa). Explican que la alta transpiración causada por la baja HR mejora la translocación de  $\text{Ca}^{+2}$  y aumenta la absorción de minerales como  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+}$ , los cuales son importantes en la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas. Es por eso que muchos estudios han encontrado que la transpiración es proporcional al crecimiento y el rendimiento en muchos cultivos (Garrity *et al.*, 1982).

Un análisis puramente físico del movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera, señala que es un proceso pasivo impulsado por gradientes de energía libre. La fuerza motriz para el transporte del agua lo define la existencia de un gradiente de potencial hídrico (desde el suelo hasta las hojas) y la diferencia en déficit de presión de vapor (DPV) a lo largo de la fase gaseosa (de la hoja interna a la atmósfera) (Fricke, 2017). Por lo tanto, el estado energético del agua de la planta está determinado por la humedad del suelo y la diferencia en DPV, además de la resistencia de las plantas a la deshidratación (De Boer *et al.*, 2011).

## Temperatura

En términos generales se puede afirmar que las condiciones ambientales dentro del invernadero no fueron las indicadas para el desarrollo óptimo del pimiento morrón, ya que se estableció en el ciclo otoño invierno, en el que son frecuentes las bajas temperaturas, con valores por debajo de los mínimos recomendados para el desarrollo de la planta, en ocasiones cerca del punto de congelación. En la época también son típicos los días nublados y seminublados, que inciden sobre la cantidad de radiación solar recibida dentro del invernadero.

Las temperaturas máximas y mínimas diarias que se presentaron durante el ciclo del pimiento morrón se muestran la Figura 4, además de dos líneas punteadas: la temperatura mínima óptima (18 °C), y en un nivel más alto, la temperatura máxima óptima para el crecimiento del pimiento (25 °C) de acuerdo con Solís (2016).



**Figura 4.** Temperatura máxima y mínima dentro del invernadero en el Campo Experimental de CIQA, tomadas con sensor HOBO durante el ciclo de cultivo de pimiento morrón. Datos promedio calculados para cada hora.

La temperatura promedio mensual presentó una tendencia descendente desde el mes de octubre con 22.2 °C hasta enero con 14.8 °C; aunque en febrero retomó el crecimiento nuevamente con 16.7 °C, la temperatura también fue baja. En este sentido, Solís (2016) menciona que la temperatura media mensual óptima para el pimiento tiene

que ser de 18 a 22 °C, y que si la temperatura es menor, el desarrollo vegetativo de la planta se paraliza o apenas evoluciona.

Los criterios térmicos señalados por Ruiz *et al.* (2013) indican que cuando la temperatura ambiental es menor a 10 °C, el crecimiento del pimiento morrón se detiene y con 1 °C se tiene riesgo de congelación de la planta. Al respecto, se encontró que el período de noviembre a febrero se caracterizó por la prevalencia de temperaturas frescas, menores a 10 °C; se contabilizaron 91 días, lo que indica que el régimen térmico no fue idóneo para el desarrollo del cultivo. Las bajas temperaturas que se presentaron cerca del punto de congelación, obligaron al encendido del calentador para proteger al cultivo del frío.

Las bajas temperaturas que se registraron al interior del invernadero provocaron el incremento en los niveles de HR, registrando valores superiores a 80%, por lo que se utilizó la ventilación pasiva levantando las cortinas del invernadero. La alta humedad ambiental también obligó a la aplicación frecuente de azufre y algunos fungicidas, para prevenir enfermedades como la cenicilla (*Oidiopsis* sp.). De acuerdo con Ruiz *et al.* (2013), la planta de pimiento se desarrolla bien a una humedad relativa entre el 50 y 70%, y es el rango óptimo requerido en las etapas de floración y cuajado.

Se calcularon los grados-día registrados a la primera cosecha (07-01-2020), resultando 757.4 grados-día. Al respecto, Martínez *et al.* (2002) señalan que para el pimiento en invernadero son necesarios 1800 grados-día desde la plantación hasta la primera recolección.

Las bajas temperaturas que prevalecieron a lo largo de 91 días en el ciclo, tuvieron un efecto directo sobre los procesos fisiológicos de la planta, que se manifestaron de diversas maneras, por ejemplo, en el tamaño promedio del fruto y en la altura de la planta. El peso promedio del fruto en el ciclo para todos los tratamientos fue de 143.7 g pza<sup>-1</sup>.

Al respecto, López y Ochoa (2019) señalan que un fruto con peso de 130 a 150 g pza<sup>-1</sup>, está clasificado como tamaño chico. El promedio de la altura de planta al final del ciclo para todos los tratamientos fue 56.8 cm planta<sup>-1</sup>. A pesar de que el material vegetal es una planta de crecimiento determinado, en el ciclo pasado que se cultivó en el campo experimental de CIQA, alcanzó una altura promedio de 1.40 m, ya que la planta estuvo sometida a mayores niveles de radiación solar y temperatura.

Las condiciones ambientales prevalecientes en el ciclo también tuvieron como efecto el retraso del tiempo de cosecha, ya que el primer corte de frutos se realizó a los 96 ddt, mientras que en el ciclo anterior, establecido en la época de primavera utilizando el mismo material genético, se realizó la primer cosecha a los 73 ddt.

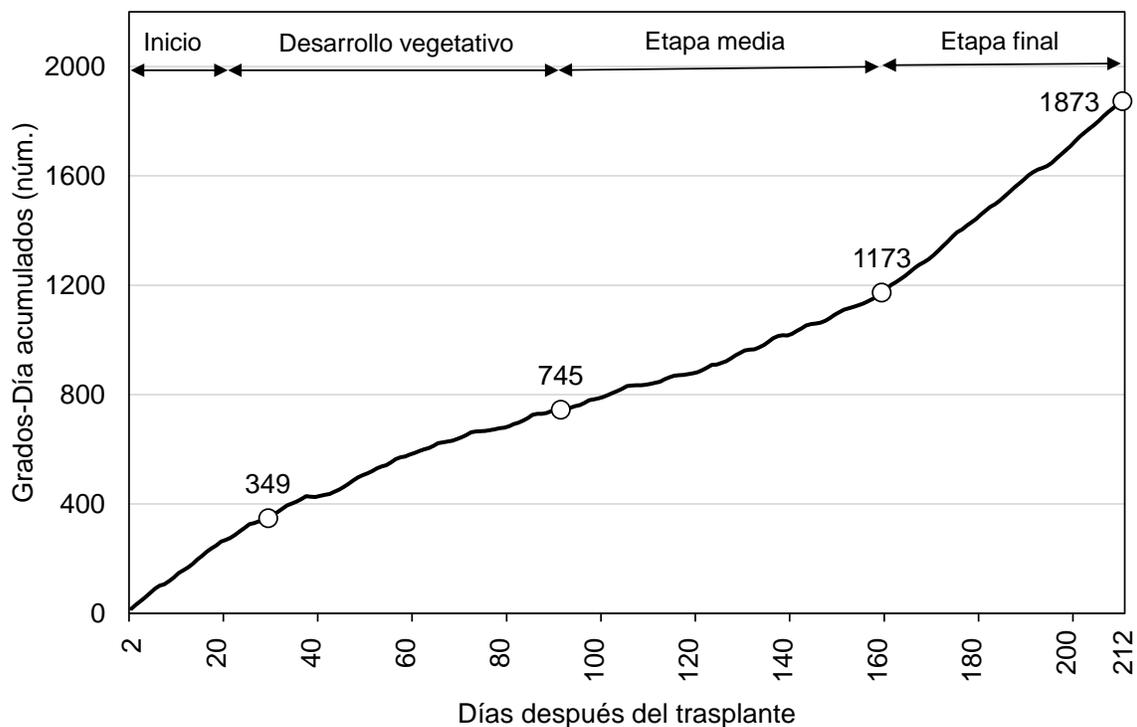
Con relación a las desventajas de la época de producción de hortalizas, Rylski *et al.* (1994) señalan que durante la temporada invernal, las temperaturas no son óptimas para la mayoría de los cultivos, lo que representa condiciones climáticas indeseables, sobre todo si se presentan en las primeras etapas del desarrollo de la flor, ya que afectan el rendimiento y la calidad del fruto, porque la baja temperatura provoca un desarrollo inadecuado del ovario, malformación de las flores y producción de polen inviable. Agregan que, en el pimiento, la baja temperatura puede aumentar el cuajado de la fruta, aunque se producen frutos partenocárpicos y malformados.

Con relación a esto, Aloni *et al.* (1999) señalan que en el pimiento morrón es común observar en el invierno los frutos pequeños y aplanados, comúnmente partenocárpicos, sin semillas, con grietas y manchas en el pericarpio, porque se desarrollan a bajas temperaturas (por debajo de 16 °C), a partir de flores con ovarios agrandados, en las que la autopolinización no es eficiente debido a la gran distancia entre el estigma y los estambres.

En relación con este mismo tema, Pressman *et al.* (1998) estudiaron los efectos de las bajas temperaturas nocturnas en la función y fertilidad de los componentes de las flores, encontrando que lecturas de 14 °C o menores redujeron el número de granos de polen y su capacidad de germinación, afectando la cantidad y forma de frutos del pimiento morrón.

### **Grados día acumulados**

La evolución de los grados día registrados en pimiento en invernadero durante el ensayo se muestra en la Figura 5, presentando una tendencia ascendente con una pendiente pronunciada a partir de los 160 ddt, cuando se presentó también un incremento en los niveles de radiación solar y temperatura. Como dato relevante se tiene que, desde el trasplante hasta la primera cosecha, se acumularon 757 grados-día, calculados sobre una base de 10 °C.

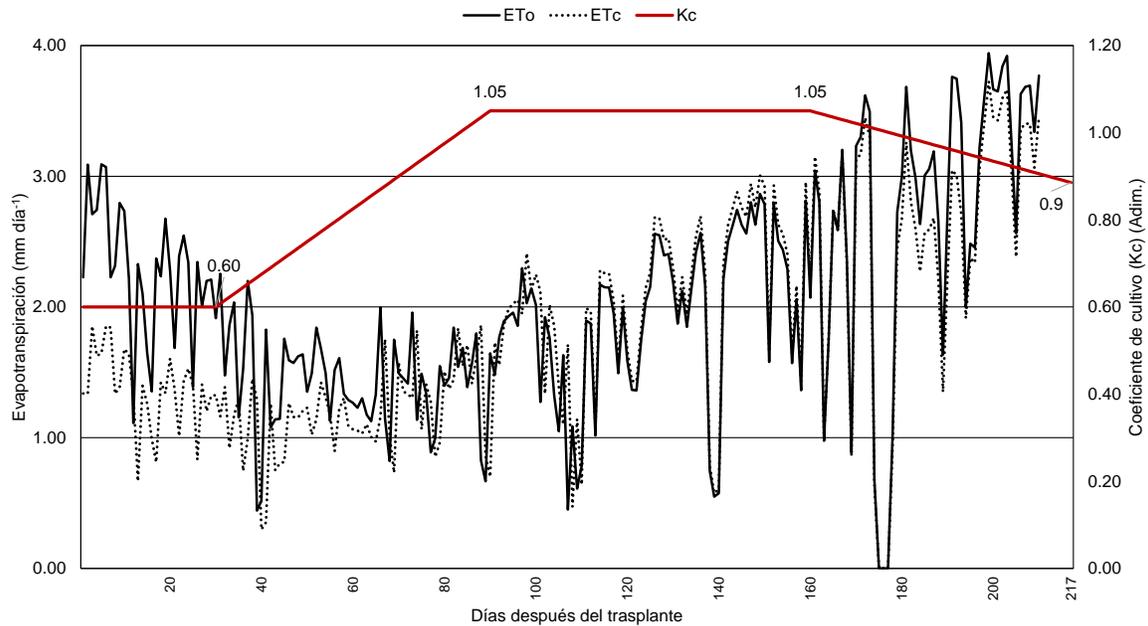


**Figura 5.** Grados día acumulados por etapa de desarrollo durante el ciclo de cultivo del pimiento morrón, calculados sobre una temperatura base de 10 °C.

### VI.2.3 Evapotranspiración

En la Figura 6 se muestra el evolución de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y la del cultivo (ET<sub>c</sub>), calculadas durante el ciclo. Ambas variables tienen una tendencia similar. Las condiciones ambientales de temperatura, humedad relativa y radiación solar imperantes en el ciclo, influyeron en su comportamiento.

Se aprecia en la gráfica que, de octubre a enero, la ET<sub>c</sub> fue menor a 2 mm día<sup>-1</sup>, por la disminución de la temperatura y de la radiación solar, así como por la etapa del cultivo, pero a partir de febrero se rebasó dicho límite. En la misma figura se observa además que en la etapa inicial o de establecimiento del cultivo, cuando la planta es pequeña, la ET<sub>o</sub> es mayor que la ET<sub>c</sub>. Conforme transcurre el ciclo, esos valores muestran una tendencia a juntarse debido a que la planta aumenta de tamaño, acompañado por una mayor área foliar y mayores necesidades de transpiración. El punto de equilibrio entre las curvas se dio el 25 de diciembre de 2019 (a los 83 ddt).

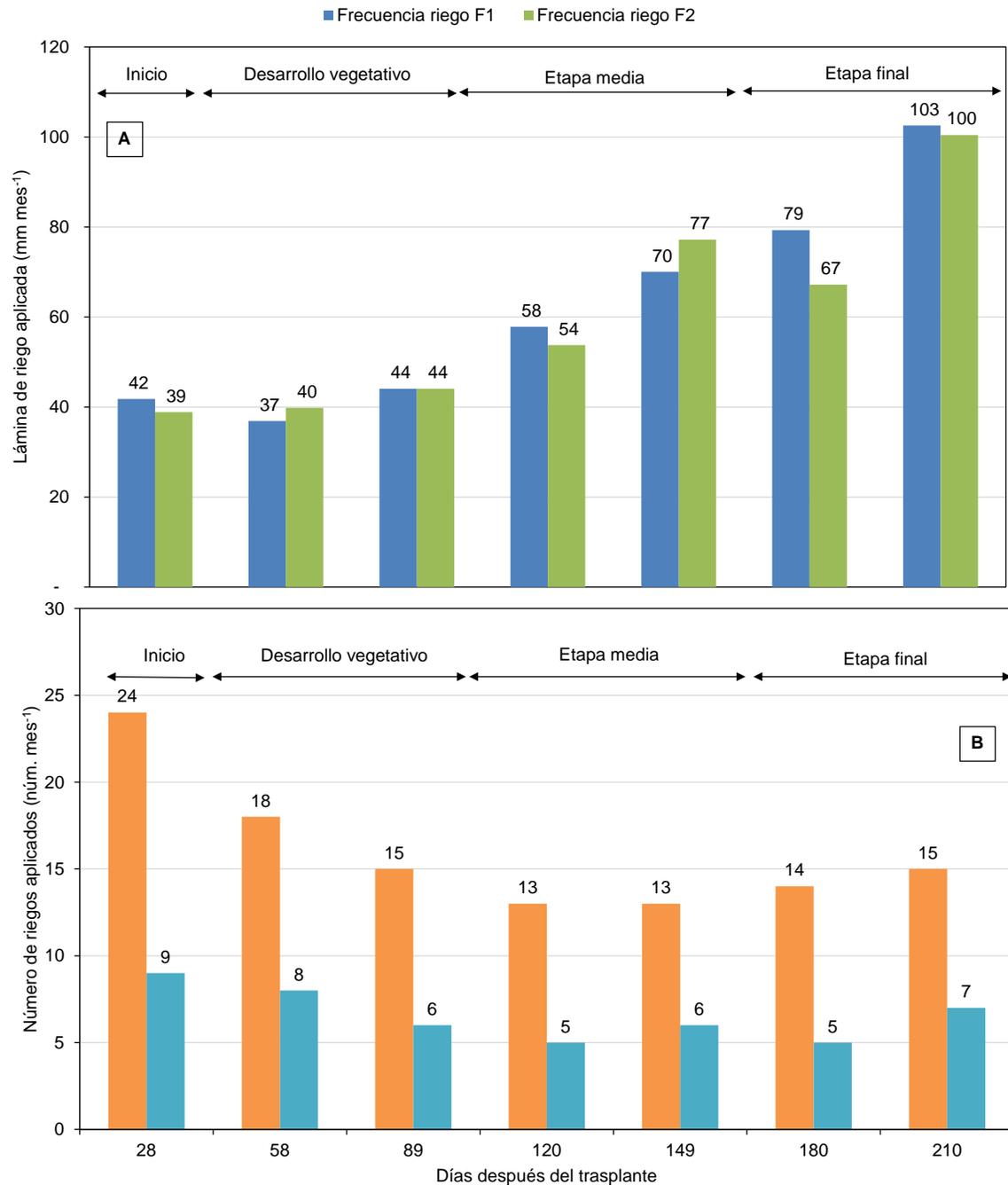


**Figura 6.** Evapotranspiración de referencia (ETo) y del cultivo (ETc), calculadas a diario para el invernadero en el Campo Experimental de CIQA, con datos de temperatura, humedad relativa y radiación solar directa, aplicando la ecuación FAO Penman-Monteith y los coeficientes de cultivo (Kc) del Boletín 56 de la FAO.

### VI.3 Láminas de riego aplicadas

La programación del riego se determinó considerando como umbrales de inicio los niveles de 10 y 30% de agotamiento del agua disponible en el suelo. Con estos umbrales se determinaron el momento (fecha) y el tiempo de activación para cada nuevo evento de riego. En la Figura 7 se aprecian las láminas de riego brutas aplicadas mensualmente durante el ciclo de cultivo del pimiento.

Se observa una tendencia descendente en los primeros 60 ddt como resultado de las condiciones climáticas que se presentaron en octubre y noviembre. Sin embargo, ya en diciembre y con una planta con mayor desarrollo vegetativo, aumentaron las necesidades hídricas del cultivo y a partir de aquí, se incrementaron las aportaciones de agua de riego, influenciadas también al presentarse mayores niveles de radiación solar y temperatura. El número de riegos también muestra una tendencia similar a la de las láminas aplicadas. En términos generales, la cantidad de riegos muestra una proporcionalidad de 2 a 1, entre el nivel de 10% contra 30%. Para F1, el total de riegos fue de 115 eventos y 48 para F2.



**Figura 7.** Láminas de riego aplicadas (A) y número de eventos de riego (B) realizados al pimiento morrón en base a dos frecuencias de riego, durante los meses del ciclo de cultivo. Datos mensuales.

Es posible apreciar además que la cantidad de agua suministrada a la planta fue similar en ambos niveles de agotamiento, tanto por mes como en el total del período. A pesar de que el manejo de dos niveles de agotamiento implicó la aplicación de láminas

de riego diferentes en momentos diferentes, al final del ciclo la cantidad de agua aplicada fue casi la misma, siendo de 455.5 mm para F1 y 451.7 mm para F2.

Por niveles de agotamiento, se observa la misma tendencia que la general, salvo que para un nivel de agotamiento del agua disponible de 30% se observa que en marzo presenta un ligero descenso del agua aplicada y retoma el crecimiento en abril, en el que se tiene la mayor aportación de agua de riego del ciclo, en ambas frecuencias.

La programación del riego se realizó utilizando dos niveles de agotamiento del agua disponible en el suelo (NAP): 10 y 30%, lo que determinó que las láminas de riego brutas, el momento de aplicación y la duración del riego, fueran diferentes entre sí. Sin embargo, al final del ciclo se comprobó que las aportaciones de agua al cultivo fueron idénticas, siendo de 455.5 y 451.7 mm para 10 y 30%, respectivamente. De hecho, cuando se planteó inicialmente el ensayo se esperaba que así fuera. Por esta situación, la mayoría de las variables evaluadas no mostraron diferencias significativas a los tratamientos de riego aplicados.

Con NAP de 10%, los riegos fueron más frecuentes, de menor lámina y corta duración. En términos generales, con este nivel se estuvo regando un día sí y otro no, partiendo cada evento de riego en cinco dotaciones, por lo que se cree que las reducciones presentadas en el contenido de humedad del suelo, no alcanzaron los niveles para provocar estrés hídrico en la planta, ni consecuencias en el comportamiento de las variables estudiadas.

Con respecto al NAP de 30%, se estuvo regando sin una periodicidad definida, con intervalos de riego mayores, fraccionando también el riego en cinco aplicaciones, pero con mayores láminas y tiempos de riego, lo que provocó escurrimientos superficiales y encharcamientos en el fondo del surco. Al no encontrar diferencias significativas en las respuestas de la mayoría de las variables, también hace suponer que el abatimiento en los niveles de humedad del suelo con este régimen, tampoco tuvieron impacto en la generación de estrés hídrico en la planta. Sin embargo, el manejo del riego con mayor frecuencia, tiene la ventaja de permitir una mejor eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes, ya que se evitan pérdidas de agua y nutrientes.

Las bajas temperaturas y la reducida radiación solar prevalecientes de noviembre a febrero, tuvieron también un impacto directo sobre los requerimientos de agua del

cultivo, ya que la evapotranspiración de referencia y del cultivo resultaron ser más bajas que a campo abierto. Al respecto, Ruiz *et al.* (2013) señalan que el pimiento morrón cultivado libremente en el exterior, requiere de 600 a 900 mm de lámina de riego para completar el ciclo vegetativo.

Con respecto a los requerimientos de agua de los cultivos a campo abierto e invernadero, Fernández *et al.* (2005) señalan que, para niveles productivos similares, son considerablemente menores en invernaderos que a campo abierto. Explican que lo anterior es como resultado de que la evapotranspiración es significativamente menor dentro de los invernaderos, debido a que se producen condiciones de menor viento, radiación solar reducida y mayor humedad relativa. Por lo tanto, establecen que los cultivos en invernadero logran una mayor eficiencia del uso del agua.

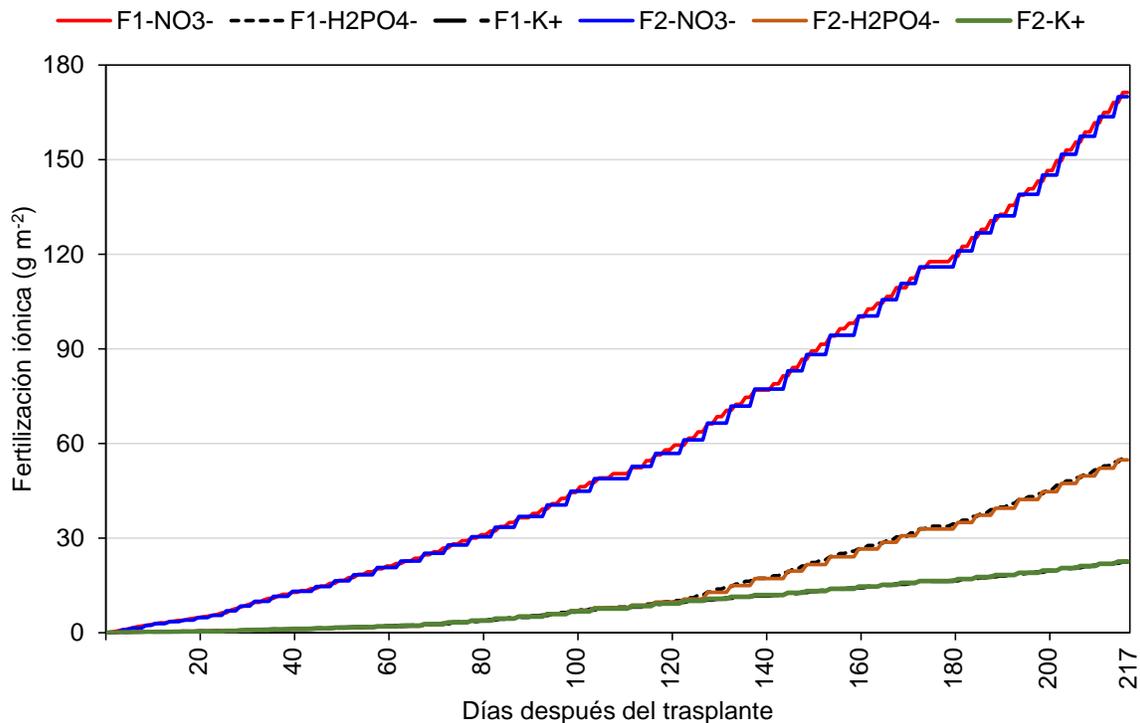
Por su parte Villa *et al.* (2014) reportaron que en invernadero los valores promedio de temperatura, velocidad del viento y radiación solar fueron 8, 63 y 35% inferiores a los correspondientes valores registrados en el exterior, y en consecuencia, la humedad relativa fue 41% mayor que en el exterior. Señalan que estas condiciones climáticas redujeron ampliamente la demanda evaporativa de la atmósfera dentro del invernadero, encontrando un ahorro en el consumo de agua de riego del 34% por el uso del invernadero.

#### **VI.4 Efecto del fertirriego en propiedades químicas del extracto de pasta saturada**

De los dos factores evaluados en este ensayo, en este apartado se analiza el efecto de la frecuencia de riego sobre la composición química del extracto de pasta saturada, ya que la periodicidad de aportación de agua y nutrientes al cultivo, las láminas y tiempos de riego, así como la disminución esperada del contenido de agua del suelo con un NAP del 30%, son condiciones que pueden influir en la dinámica química del extracto.

En relación a los niveles de minerales aportados, en la Figura 8 se muestran las cantidades de los nutrientes N, P y K en sus formas iónicas que se aportaron al cultivo mediante el fertirriego. Las curvas representan la fertilización acumulada que recibió el pimiento morrón durante el ciclo, como resultado de las frecuencias de riego F1 y F2 aplicadas. Se observa que los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) fueron los nutrientes que más se aportaron en el período, con cantidades crecientes a medida que se tenía un mayor desarrollo del

cultivo y con ello mayor demanda. Con cantidades relativamente menores, se observan los iones fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ).

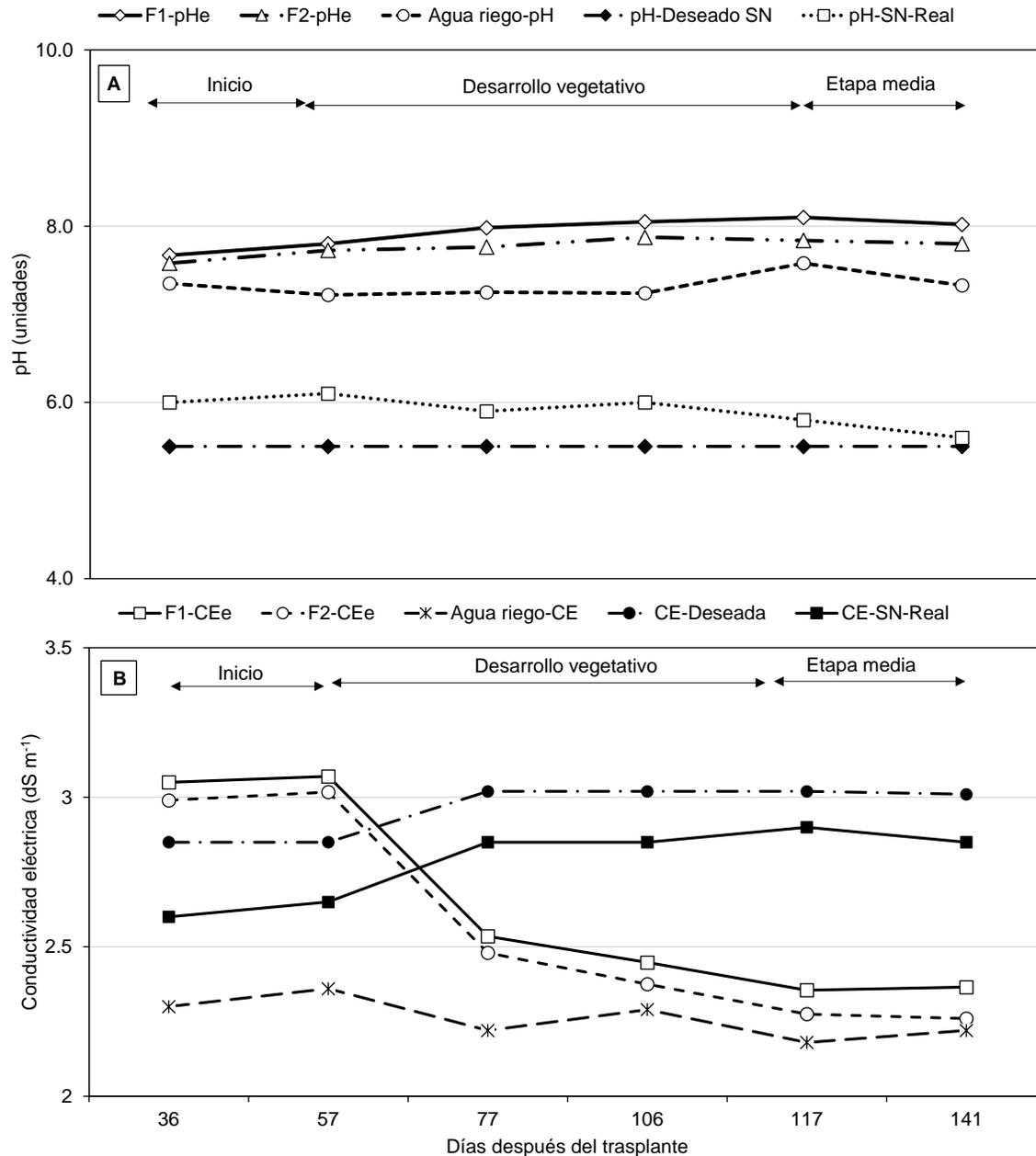


**Figura 8.** Curvas de acumulación de N, P y K en sus formas iónicas  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{K}^+$ , aportadas mediante dos frecuencias de fertirriego en el ciclo de pimienta morrón.

No obstante que la programación del riego fue diferente en cada frecuencia, al final del ensayo no se observaron diferencias significativas en las cantidades de iones suministradas, siendo de 171.3 y 170.00 g  $\text{NO}_3^- \text{ m}^{-2}$ , para F1 y F2, respectivamente.

Para los iones fosfato y potasio, tampoco se encontraron diferencias significativas entre las frecuencias de riego. Para el ion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , se inyectaron 55.5 y 54.8 g  $\text{m}^{-2}$ , para F1 y F2, respectivamente. Del ion  $\text{K}^+$ , se aplicaron 22.5 y 22.6 g  $\text{m}^{-2}$ , para F1 y F2, respectivamente.

En la Figura 9 se muestra la evolución de tres variables medidas sobre el extracto de pasta saturada: (A) pH, para las frecuencias F1 y F2, del agua de riego, el deseado y el real para la solución nutritiva y (B) conductividad eléctrica, para las frecuencias de riego F1 y F2, del agua de riego, la deseada y la real para la solución nutritiva.



**Figura 9.** Comportamiento del pH, para las frecuencias F1 y F2, del agua de riego, el deseado y el real para la solución nutritiva (A) y de la conductividad eléctrica, para las frecuencias de riego F1 y F2, del agua de riego, la deseada y la real para la solución nutritiva (B).

Con respecto al efecto de las frecuencias de riego sobre el pH, se observa una tendencia ligeramente ascendente en ambos casos a medida que se desarrollaba el ciclo (Figura 9A), mostrando la F1 valores un poco más altos que F2, en magnitudes del orden de unas cuantas décimas, sin superar la unidad. Hasta los 77 ddt, la diferencia entre las

frecuencias fue mínima, ya que, por diversas razones hasta los 70 ddt fue posible establecer la diferenciación de los tratamientos de riego.

A partir de aquí, las diferencias entre las frecuencias se ampliaron, debido que se incrementaron las aportaciones de fertilizantes al suelo, para responder a la demanda nutrimental del cultivo y, desde el punto de vista del riego, también se incrementaron las láminas y los tiempos de aplicación. El comportamiento observado en la variable pH, puede ser como respuesta a las aportaciones crecientes al suelo de algunos fertilizantes como el nitrato de calcio, que tiene poder alcalinizante por los nitratos que incorpora en su composición.

Los cambios provocados por el fertirriego en el pH del EPS no fueron estadísticamente significativos, a pesar de que la solución nutritiva que se inyectó al suelo tenía un pH ácido por la neutralización de los bicarbonatos del agua de riego, ya que el suelo ofrece resistencia a cambiar su reacción, lo que se conoce como capacidad amortiguadora que le confieren el elevado contenido de  $\text{CaCO}_3$ , la materia orgánica y el porcentaje de arena (Sierra *et al.*, 2007).

Con respecto al comportamiento del pH, Narváez-Ortiz *et al.* (2015) estudiaron la dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México, encontrando resultados similares para pimiento morrón, reportando que el pH mostró valores cambiantes en el tiempo, pero siempre manteniendo una tendencia ascendente a medida que los muestreos fueron avanzando. Snakin *et al.* (2001) señalan que la tendencia ascendente del pH de la solución del suelo, observada en todos los cultivos estudiados, pudiera deberse al efecto alcalinizante de los nitratos contenidos en los fertilizantes aplicados como el nitrato de calcio.

En la Figura 9A también se incluye el pH deseado o esperado para la solución nutritiva recomendada, siendo de 5.5 para todo el ensayo. Además, se muestra la línea que representa el pH real de la solución nutritiva preparada, que fue monitoreado con frecuencia para detectar desviaciones y tomar las medidas correctivas. Se aprecia que está muy cercano al nivel de pH deseado, pero estas desviaciones se debieron principalmente a fallas en el sistema de fertirriego.

A pesar de que la solución nutritiva se inyecta al suelo con un pH ácido por la neutralización de los bicarbonatos del agua de riego, es poco probable lograr la

modificación sustancial de la alcalinidad edáfica, ya que el suelo tiene una alta capacidad amortiguadora. Además, intervienen otros factores que interactúan con las partículas del suelo como la participación de la raíz mediante exudados y el papel que juegan los microorganismos.

El efecto de las frecuencias de riego sobre la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada, se observa en la Figura 9B. Al igual que para el pH, las diferencias numéricas que se encontraron entre ellas son mínimas, de solo algunas décimas, sin rebasar la unidad, aunque F1 se mantuvo siempre por encima de F2. Estas diferencias se atribuyen al descenso en mayor grado en el nivel de humedad en el suelo con un NAP de 30%.

En ambos casos se observó un período estable hasta los 57 ddt, para luego descender muy cerca una de la otra hasta los 77 ddt, porque es hasta esta fecha en la que se logró establecer la diferenciación de los tratamientos de riego. A partir de aquí continúa la tendencia descendente, con un poco más de margen entre ellas.

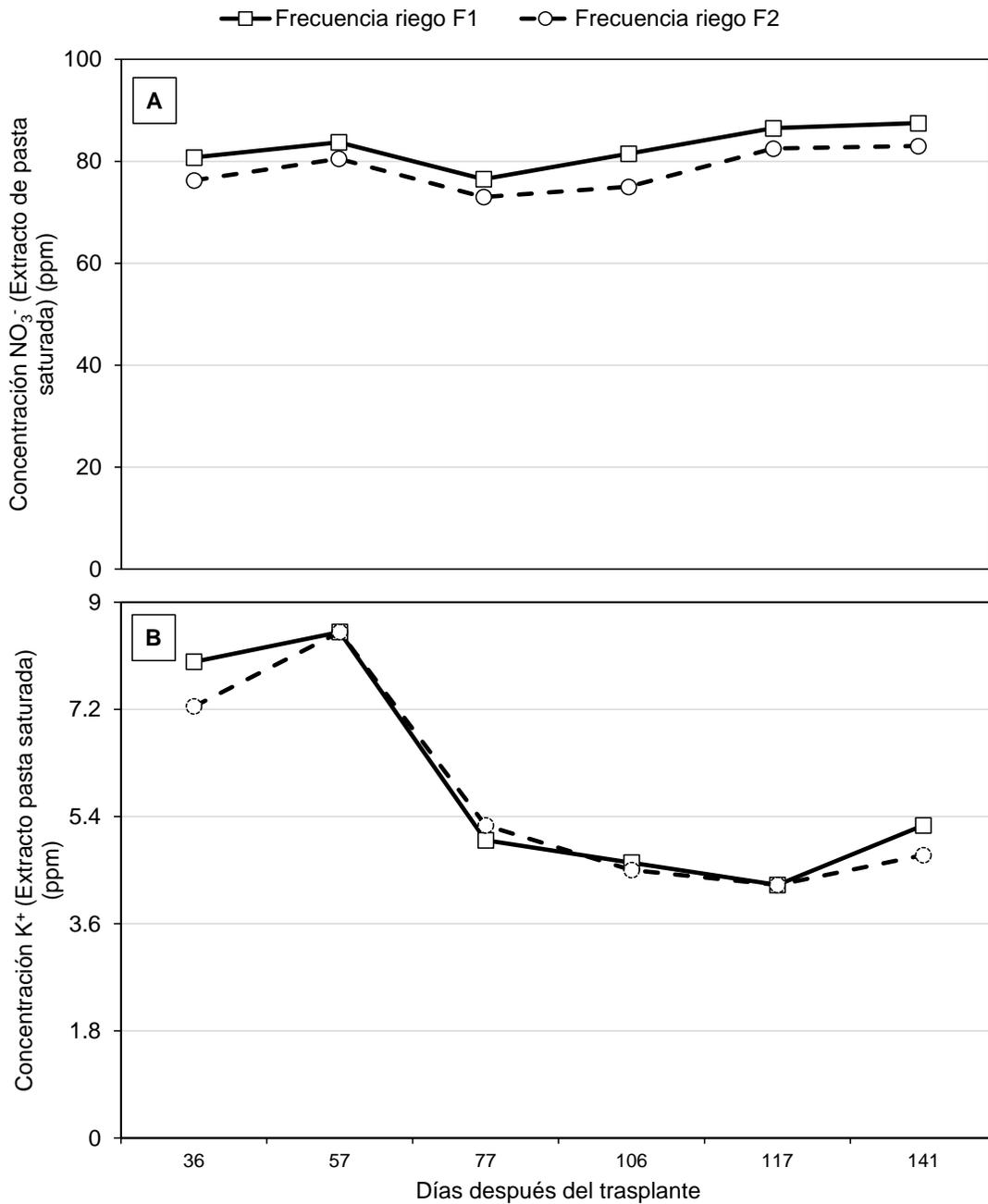
Se aprecia que la disminución de esta variable se fue dando a medida que fue creciendo la planta, lo cual hace suponer que con un mayor desarrollo de raíces y de la parte aérea, la demanda de absorción de nutrientes se incrementó y por ello tienden a disminuir las concentraciones iónicas en la solución del suelo.

Este comportamiento es coincidente con los trabajos de Narváez-Ortiz *et al.* (2015) quienes encontraron resultados similares para pimiento morrón, reportando que la CE mostró valores cambiantes en el tiempo, pero siempre manteniendo una tendencia descendente a lo largo del ciclo de cultivo.

En la Figura 9B también se incluye la CE deseada o esperada para la solución nutritiva recomendada, oscilando en el período desde 2.85 hasta 3.01. Además, se muestra la curva que representa la CE real de la solución nutritiva preparada, que fue monitoreada con frecuencia para detectar desviaciones y tomar las medidas correctivas. Se aprecia que está muy cercana al nivel de CE deseada, pero estas desviaciones se debieron principalmente a fallas en el sistema de fertirriego.

En la Figura 10A se muestran los cambios ocurridos en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el extracto de pasta saturada durante el ensayo para las frecuencias de riego F1 y F2.

Se observa una tendencia similar para ambas frecuencias hasta los 77 ddt, en los que fue posible establecer la diferenciación de los tratamientos de riego.



**Figura 10.** Evolución de las concentraciones de los iones nitrato (A) y potasio (B) en el extracto de pasta saturada bajo las frecuencias de fertirriego F1 y F2 con cuatro soluciones nutritivas manejadas en el ciclo del cultivo de pimienta.

Los niveles de nitratos en F1 se mantuvieron siempre por encima de F2. Estas diferencias se atribuyen al descenso en mayor grado en el nivel de humedad en el suelo

con un NAP de 30%, aunque no se encontraron diferencias significativas entre las cantidades aportadas con los riegos aplicados. La fertilización para F1 y F2 fueron 171.3 y 170.0 g m<sup>-2</sup>, respectivamente.

En el caso de los iones NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y K<sup>+</sup>, se presentó una mayor concentración de ellos en las primeras etapas del ciclo, lo cual concuerda con los trabajos de Molina *et al.* (1993) quienes señalan que durante las primeras nueve semanas de crecimiento, la absorción es muy baja, incrementándose posteriormente en forma coincidente con la fructificación. Para explicar la disminución de la concentración de nitratos en el extracto de pasta saturada a lo largo del ciclo, Navarro y Navarro (2013) señalan que, para la mayoría de los cultivos, puede ser causada por los procesos de lixiviación y la absorción radical, los cuales pudieran estar asociados no solamente con los efectos sobre los nitratos, sino además con la de otros iones como K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup>, y en general con la conductividad eléctrica de la solución del suelo.

En la Figura 10B se muestra la evolución de la concentración del ion potasio en el extracto de pasta saturada, en respuesta a las frecuencias de riego. Los niveles de este ion parten de un cierto valor a los 36 ddt, suben a los 57 ddt por efecto de los fertilizantes aplicados y la baja absorción de la planta, pero a partir de aquí inicia una tendencia descendente hasta los 117 ddt en el que alcanza su valor más bajo por efecto del incremento en la absorción del cultivo al ir acumulando más biomasa, y posteriormente retoma el crecimiento. No se observaron diferencias estadísticas significativas entre algunas fechas de muestreo.

Las disminuciones de las concentraciones de los iones Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en la solución del suelo concuerdan con los resultados obtenidos por Maldonado-Torres *et al.* (2007), quienes explican que son probablemente debidas al aumento en la absorción de ellos conforme el cultivo cambia de la etapa vegetativa a la de floración y llenado de frutos.

Con respecto al comportamiento decreciente de los iones presentes en la solución del suelo, Avitia-García *et al.* (2014) señalan que esto pudiera estar relacionado con un incremento en la tasa de absorción de nutrientes conforme al crecimiento del cultivo, como se observó en fresa y pimiento.

Por otro lado, Narváez-Ortiz *et al.* (2015) señalan que un factor que pudiera estar involucrado en la disminución de los iones en el extracto de pasta saturada como el caso

del potasio, sería por un fenómeno de fijación en las partículas del suelo o bien, por la lixiviación en el caso de suelos arenosos.

La valoración de las propiedades químicas del extracto de pasta saturada de acuerdo con CSR-Laboratorio (2006) es: la conductividad eléctrica osciló entre normal ( $3.0 \text{ dS m}^{-1} < \text{CE} > 1.0 \text{ dS m}^{-1}$ ) y alta ( $\text{CE} > 3.0 \text{ dS m}^{-1}$ ), las concentraciones de nitratos siempre mantuvieron niveles bajos ( $< 124 \text{ ppm}$ ) y los niveles de potasio también fueron bajos ( $< 39 \text{ ppm}$ ).

Uno de los objetivos de este ensayo fue determinar el efecto del fertirriego sobre las propiedades químicas de la solución del suelo (pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes), para entender la disponibilidad de los diferentes iones, así como su comportamiento individual a través del tiempo.

La comparación de medias de Tukey no arrojó diferencias significativas entre las frecuencias de riego F1 y F2 en las variables químicas del extracto de pasta saturada. Para la frecuencia F2, que se estuvo regando con intervalos entre riegos de más días, se presume que los contenidos de agua en el suelo descendieron a un nivel menor que en F1, y que esto influyó en la determinación de valores menores, aunque no significativos, en los indicadores químicos.

Con relación a lo anterior, Narváez-Ortiz *et al.* (2015) señalan que para el estudio químico de la fase líquida del suelo, se debe considerar el porcentaje de humedad que contiene la muestra al momento del análisis, ya que esto influye directamente sobre la composición y concentración de los iones en el extracto de pasta saturada, ya que si este cambia afectará los resultados.

Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que el fertirriego provocó cambios, aunque no significativos, en la dinámica de las propiedades químicas del extracto de pasta saturada, al incrementarse las aportaciones de nutrientes a lo largo del ciclo, lo cual dependió de varios factores.

En términos generales, en la medida en la que avanzaba el desarrollo del cultivo, se incrementaron las cantidades de fertilizantes y ácidos que se incorporaron a la solución nutritiva, porque las formulaciones de elementos se estructuraron en base a la demanda creciente ligada a la etapa fenológica del cultivo. Las aportaciones de nutrientes al suelo

también se incrementaron a medida que las láminas y tiempos de riego fueron mayores al avanzar el ciclo.

Por otro lado, a lo largo del período ocurrieron procesos como la absorción nutrimental, lixiviado de minerales por las láminas de lavado o drenaje, fijación de iones como el potasio por las partículas del suelo, así como reacciones de precipitación de fosfatos por el pH alcalino, que también tuvieron influencia en la compleja dinámica de las relaciones de interacción del sistema fase sólida-fase líquida, que modificaron la composición química de los extractos de pasta saturada.

### **VI.5 Evaluación del desarrollo del sistema radicular**

La respuesta del desarrollo de raíces a los tratamientos evaluados, se puede observar en la Figura 11, en la que se muestran las cantidades promedio de raíces ( $\text{mg L}^{-1}$ ) presentes en cada celda de muestreo de las 24 de cada planta.

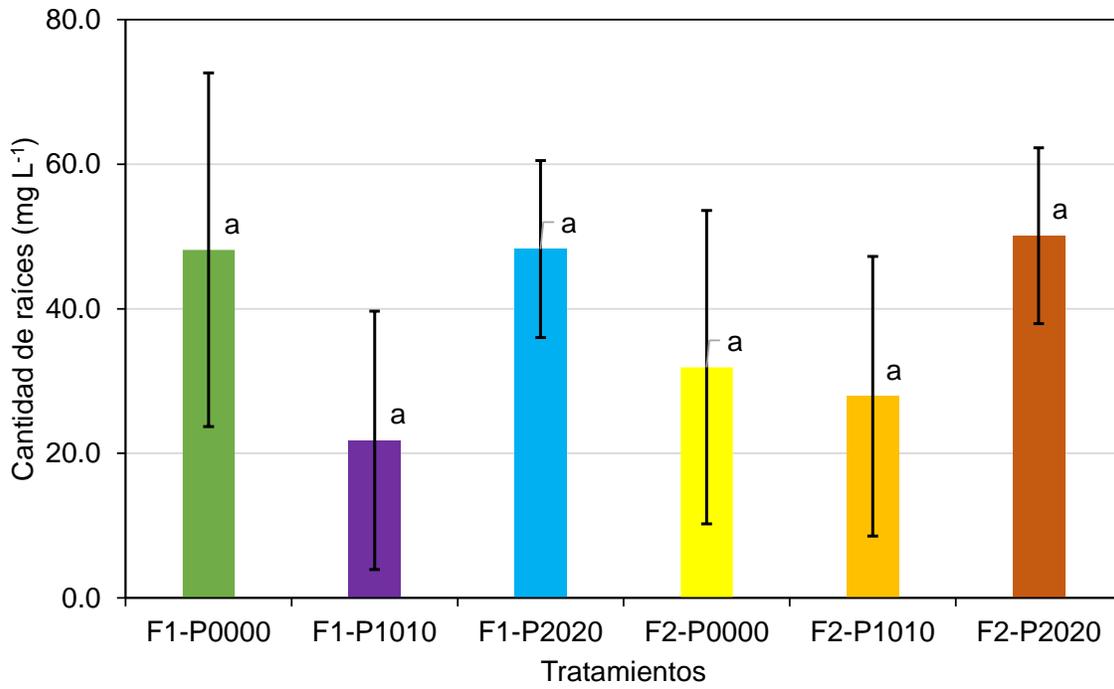
Se aprecia en la figura que la prueba de comparación de medias de Tukey no mostró diferencias significativas entre ellos, a pesar de la evidente diferencia aritmética existente entre los tratamientos. Esto es debido a la alta variabilidad natural que se presentó en los datos, ya que, en el proceso de recolección de las muestras se observó que en algunas celdas el suelo no presentaba raíces, mientras que en otras la presencia era variable, desde muy pocas, medianas y abundantes.

Lo anterior se puede observar en la referida figura, al analizar las barras del error estándar, las cuales son muy amplias en todos los tratamientos, que definen por lo tanto intervalos de confianza grandes en el que se puede localizar a la media. Se aprecia que, en términos absolutos, los mejores tres tratamientos fueron F2-P2020, F1-P2020 y F1-P0000, con 50.1, 48.2 y 48.1  $\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente, mientras que el más bajo fue F1-P1010 con 21.8  $\text{mg L}^{-1}$ . Cabe destacar que dentro de los mejores tratamientos resaltan aquellos que llevan a P2020 como medio de crecimiento y a la frecuencia de riego F1.

El desarrollo de raíces es una de las variables más importantes evaluadas en el ensayo, considerando que uno de los problemas esenciales a investigar fueron las condiciones desfavorables para el crecimiento de las raíces en un suelo con inconvenientes por compactación.

Por ello y con la finalidad de que las raíces del pimiento no tuvieran que enfrentar obstáculos para su crecimiento y desarrollo óptimo, se pensó que, al sustituir el suelo

compactado con materiales más ligeros como la perlita, se favorecería una mayor densidad de raíces que se traducirían en mejor desarrollo de la planta y mayores rendimientos.



**Figura 11.** Desarrollo de raíces a los 97 ddt en pimiento morrón en respuesta a los tratamientos definidos por dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de las raíces. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

Se evaluaron distintos volúmenes de perlita (0.79, 1.57 y 6.28 L) incorporados al suelo, con el propósito de conocer si a un mayor volumen de perlita, las raíces tendrían más capacidad para explorar el suelo compactado.

El planteamiento en la hipótesis fue que en las primeras etapas del desarrollo de las raíces tuvieran un crecimiento normal, esquivando al suelo compactado, para poder desarrollar un sistema radicular fuerte, que después fuera capaz de penetrar en el suelo circundante sin dificultades, continuando con su crecimiento sin afectar las funciones fisiológicas de la planta y la producción de biomasa.

Se esperaba también que este crecimiento fuera mayor en la medida en que la planta dispusiera de un mayor volumen de perlita en la zona radicular. Sin embargo, los resultados obtenidos no concuerdan con los estipulados en las hipótesis, ya que no se encontraron diferencias significativas en el desarrollo de raíces entre los tratamientos

evaluados, aunque numéricamente si son evidentes, probablemente por la alta variabilidad de los datos, ya que en algunas muestras la presencia de raíces era nula, mientras que en otras se obtuvieron valores desde bajos, medianos y altos.

Al respecto, algunos autores como Buñay (2017) y Condés (2017) mencionan que el patrón de crecimiento de las raíces no es uniforme en todos los sentidos. En términos nominales el mejor tratamiento fue F2-P2020 con  $50.1 \text{ mg L}^{-1}$ . Cabe mencionar que, para conocer la producción total de raíces por planta, se deberá multiplicar por 24 el dato proporcionado, ya que este representa el valor promedio por celda. En este caso, el valor del tratamiento equivale a  $1.20 \text{ g MS planta}^{-1}$ .

Para el mejor tratamiento, el cual está asociado a la frecuencia de riego F2, una posible explicación de los resultados encontrados radica en las diferencias en los contenidos de humedad en la zona radicular derivados de dos NAP diferentes. El manejo de un NAP del 30% para la frecuencia F2, con intervalos de riego mayores a F1, hace suponer que con el paso de los días la planta pudiera estar sujeta a menores condiciones de humedad en el suelo y a más déficit hídrico que F1, lo que obliga a la planta a la extensión de sus raíces o a la formación de raíces laterales en la búsqueda de agua.

Al respecto, Balaguera *et al.* (2008) señalan que la planta sometida a riego deficitario puede promover un mayor crecimiento del sistema radicular, ya que la raíz debe buscar agua y nutrientes. Ellos, considerando que la inducción de una mayor cantidad de raíces en plántulas de tomate es fundamental en la etapa postrasplante porque de éstas depende la adecuada absorción de agua y nutrientes para su posterior desarrollo, las sometieron a déficit hídrico obteniendo diferencias significativas en la longitud y en el peso fresco de la raíz.

Kafkafi y Tarchitzky (2012) señalan que las raíces de las plantas proliferan donde el agua y los nutrientes están disponibles, por lo que las aplicaciones frecuentes y pequeñas de agua en el riego por goteo inducen sistemas radiculares someros y compactos en comparación con sistemas radiculares más profundos y extendidos en cultivos regados por aspersión o por inundación.

Por su parte, Fitter (2002) establece que en general, las raíces tienden a crecer buscando agua y nutrientes, por lo que si el suministro de estos insumos se proporciona con la frecuencia adecuada a plantas cultivadas en perlita, las raíces no tendrán

necesidad de expandirse más allá del volumen de sustrato que les provee sus requerimientos.

En relación al efecto sobre el desarrollo de las raíces por la disponibilidad de agua en la zona radicular, Quintal *et al.* (2012) reportaron que al regar chile habanero con diferentes niveles de humedad aprovechable, el mayor volumen de raíces se registró en los tratamientos con 50% ( $73.8 \pm 2.9 \text{ cm}^3$ ) y 40% de humedad aprovechable ( $70.0 \pm 6.8 \text{ cm}^3$ ) en comparación con el testigo ( $61.3 \pm 5.5 \text{ cm}^3$ ).

El tratamiento F1-P0000 se ubicó como el tercer mejor tratamiento, con diferencias mínimas con el primero y el segundo, cuando se esperaba que los resultados sobre desarrollo de raíces en suelo compactado fueran los menores. Sobre esto, Alameda *et al.* (2012) descubrieron que un alto régimen de humedad del suelo (cercano a capacidad de campo) y un alto contenido de nutrientes y materia orgánica, redujeron la severidad de la compactación del suelo en el desarrollo de las raíces y brotes de las plántulas de pimiento.

Por su parte, Hossne *et al.* (2017) encontraron que, no solo el grado de compactación y/o resistencia del suelo a la penetración son los factores físicos más limitantes para el desarrollo radical, sino que el contenido de agua presente también es sumamente relevante, ya que la densidad del suelo y el ángulo de fricción interna de las partículas varían con el porcentaje de humedad.

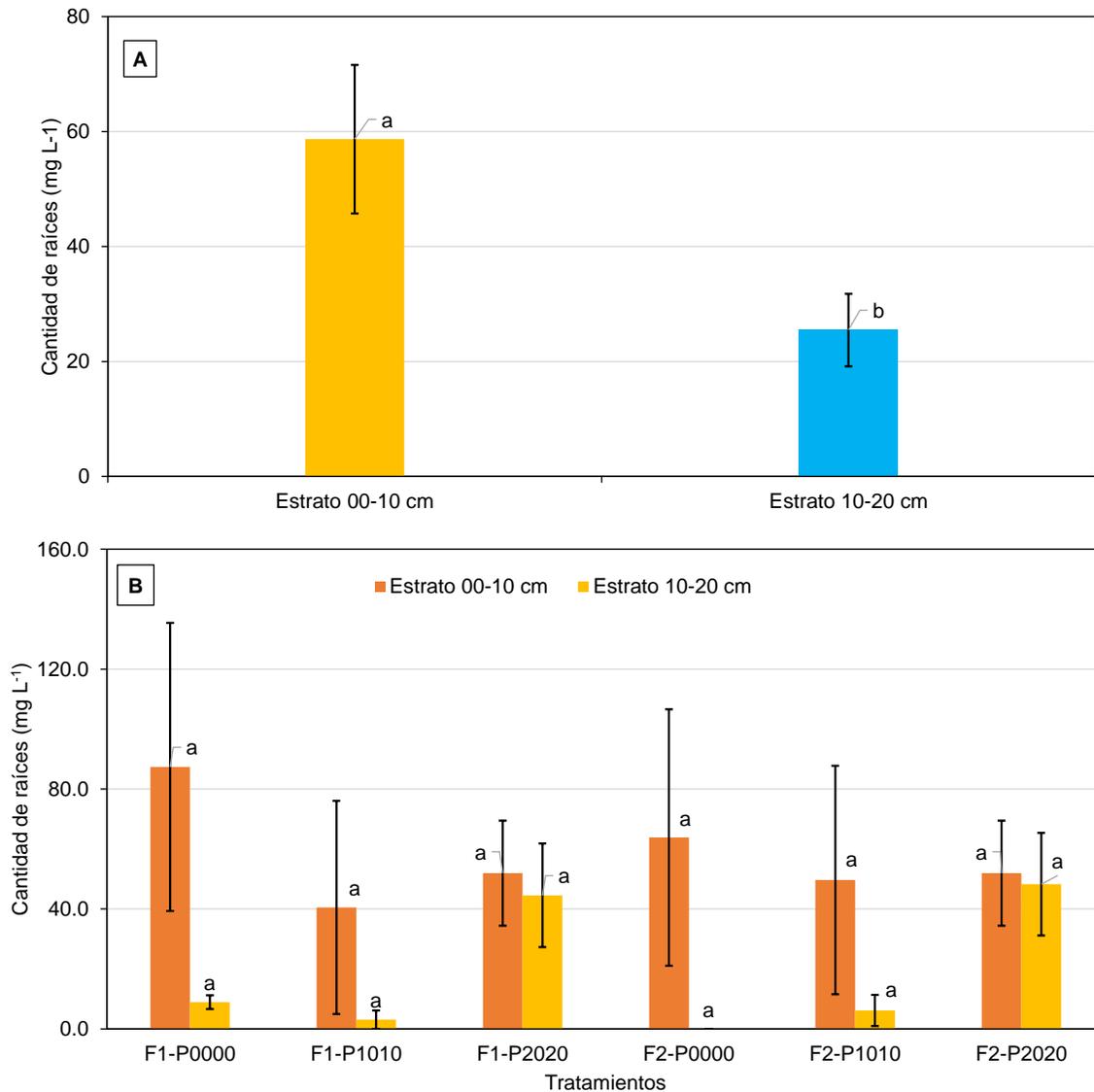
Dentro de los tres mejores tratamientos, F1-P2020 y F1-P0000 que combinan la frecuencia de riego F1, quedaron en segundo y tercer lugar, respectivamente, abajo de F2-P2020. Para tratar de explicar la menor cantidad de raíces encontradas en F1, se puede establecer la comparación de que la modificación del suelo compactado con la introducción de cilindros de perlita que se ha probado en este ensayo junto con el fertirriego de alta frecuencia, es muy similar a la técnica denominada Hidroponía a Campo Abierto (OFH, por sus siglas en inglés).

De acuerdo con Rubio-Asensio *et al.* (2020) esa técnica consiste en la incorporación al suelo de bolsas de sustrato hidropónico como la perlita, siendo sus principios clave la reducción del tamaño de la masa radicular del cultivo reduciendo el volumen de sustrato mojado, manteniéndolo siempre cerca de capacidad de campo, con la aplicación continua de una solución nutritiva equilibrada con riego por goteo (como

puede suceder con F1), con lo que se busca reducir la influencia y el papel del suelo como un medio para almacenar agua y nutrientes, promoviendo la concentración de las raíces activas en la bolsa de sustrato.

### Comparación por estratos

Para cada tratamiento, se evaluó el desarrollo de raíces en los estratos muestreados. Los resultados se muestran en la Figura 12A.



**Figura 12.** Crecimiento de raíces de pimiento morrón a los 97 ddt, en dos estratos de profundidad (A) y distribución de raíces por tratamientos en dos estratos (B). Los tratamientos combinan dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

El análisis de comparación de medias arrojó la existencia de diferencias significativas entre los estratos, presentando E0010 y E1020 medias de presencia de raíces de 58.7 y 25.5 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Se encontró también que, dentro de cada estrato no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 12B), debido a la alta variabilidad de los datos como se puede apreciar al analizar la magnitud de las barras de error estándar.

Los tratamientos que presentaron mayor cantidad de raíces en la capa 00-10 cm fueron F1-P0000, F2-P0000 y F2-P2020, que tienen como características principales la frecuencia de riego F2 y al P0000 o suelo natural como medio de crecimiento.

Estos valores concuerdan con lo señalado por Martínez *et al.* (2002) de que en pimiento la mayor parte de las raíces se sitúa en la zona superior del suelo (0-25 cm). Por su parte, Salazar y Hernández (2018) mencionan que en pimiento, el mayor volumen de raíces se concentra en los primeros 20 a 30 cm de profundidad.

En este mismo sentido, Reche (2010) señala que el 75 % o más del volumen de raíces se localiza a menor profundidad, entre los 25-30 cm con una gran densidad horizontal de raíces que alcanzan una anchura de 50-75 cm. Además, como ya se ha comentado, dadas las características iniciales de densidad aparente de la capa 00-10 cm, en la que la raíz pudo extenderse y desarrollarse sin restricciones de manera lateral, lo que explica también la mayor abundancia de ellas en la capa superficial.

### **Comparación por estratos y tratamientos**

Se encontró también que dentro de cada estrato, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, debido a la alta variabilidad de los datos como se puede apreciar al analizar la magnitud de las barras de error estándar (Figura 12B). Los tratamientos que nominalmente presentaron mayor cantidad de raíces en la capa 00-10 cm fueron F1-P0000 y F2-P0000, que tienen como característica principal al medio P0000 o suelo natural compactado.

Sin embargo, también se aprecia que estos tratamientos concentran todas sus raíces solo en la primer capa, presentando un desequilibrio entre los estratos, lo cual puede ser indicador de que el suelo compactado representó un obstáculo para el crecimiento de la raíz y su incapacidad para crecer a una profundidad mayor. En cambio, los medios F2-P2020 y F1-P2020, muestran un mejor equilibrio de raíces entre ambos

estratos, lo que indica que en dichos medios la raíz encontró mejores condiciones físicas en su entorno para crecer y extenderse sin problemas.

### **Distribución de raíces alrededor de la planta**

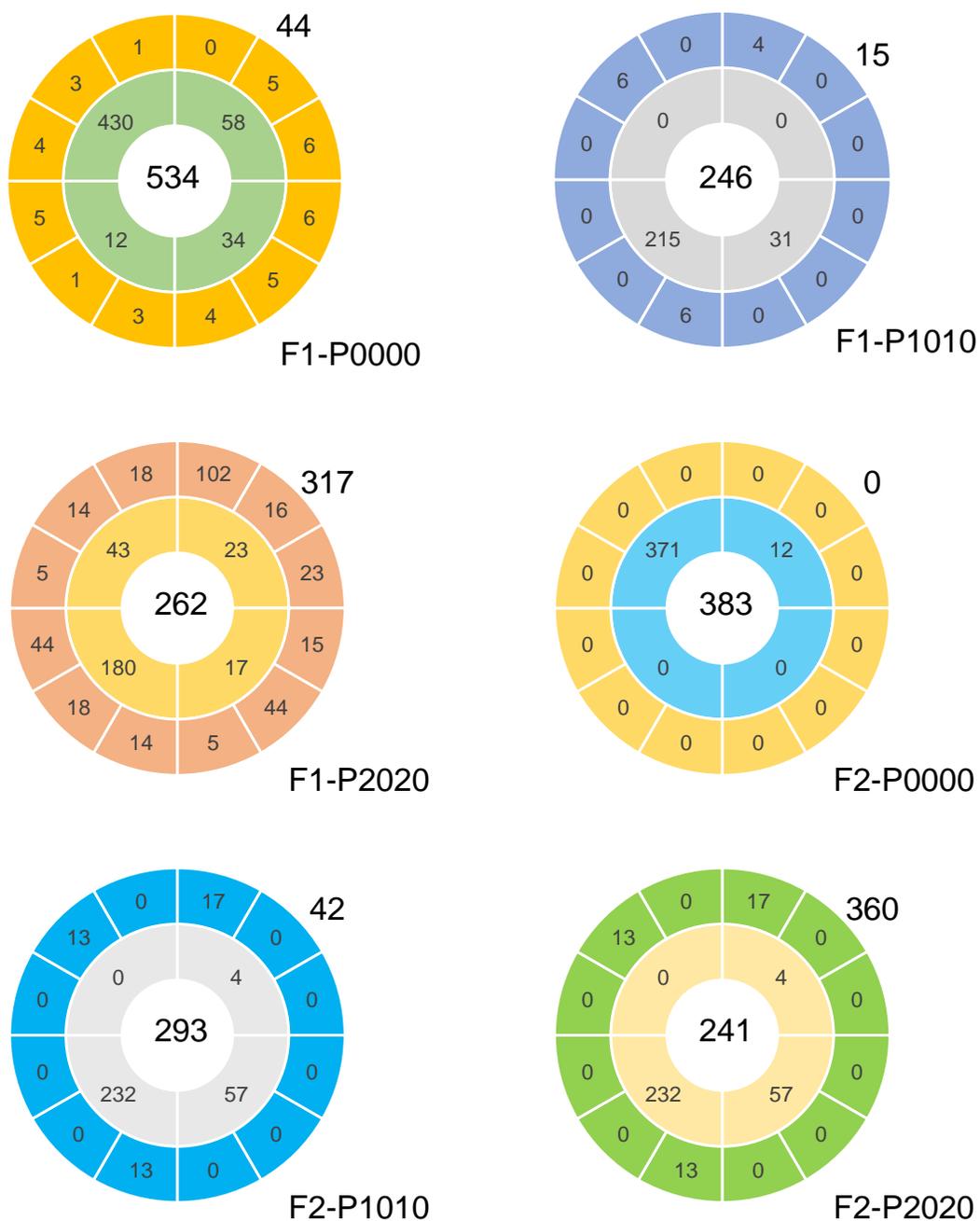
También se analizó la distribución de las raíces alrededor de la planta por tratamiento. Los resultados se muestran en la Figura 13. Para cada tratamiento se elaboró un diagrama con dos anillos mostrados en diferentes colores.

En el primer anillo se representan las raíces que se desarrollaron dentro de un radio de 10 cm alrededor de la planta; en el segundo, las que crecieron más allá del primero. El objetivo fue mostrar la capacidad de desarrollo de las raíces en función del medio de crecimiento.

Para el tratamiento F1-P0000, la cantidad total de raíces producidas por planta es de 578 mg, de las cuales 534 mg se desarrollaron dentro del radio de 10 cm y 44 mg fuera de él. Este mismo comportamiento se observa en el tratamiento F2-P0000. Por el contrario, el tratamiento F1-P2020, produjo 579 mg, de las cuales 262 mg se desarrollaron dentro de los 10 cm y 317 mg fuera de él. Este mismo comportamiento se observa en el tratamiento F2-P2020.

La percepción aquí es que, aunque la cantidad de raíces producidas es la misma en algunos tratamientos, la distribución alrededor de la planta fue diferente, lo que se puede interpretar en el caso de los tratamientos F1-P0000 y F2-P0000, que asocian al medio P0000 o suelo compactado, como la incapacidad del sistema radicular para desarrollarse adecuadamente en forma lateral, ya que sus raíces quedaron concentradas en los primeros 10 cm alrededor de la planta.

En los medios con perlita, F1-P2020 y F2-P2020, sucedió lo contrario. De estos resultados también se puede interpretar que, si no se encontraron diferencias significativas en la cantidad de raíces producidas entre los medios P2020 y P0000, entonces en el primero las raíces fueron más largas y delgadas, mientras que en el segundo fueron más cortas, pero más gruesas.

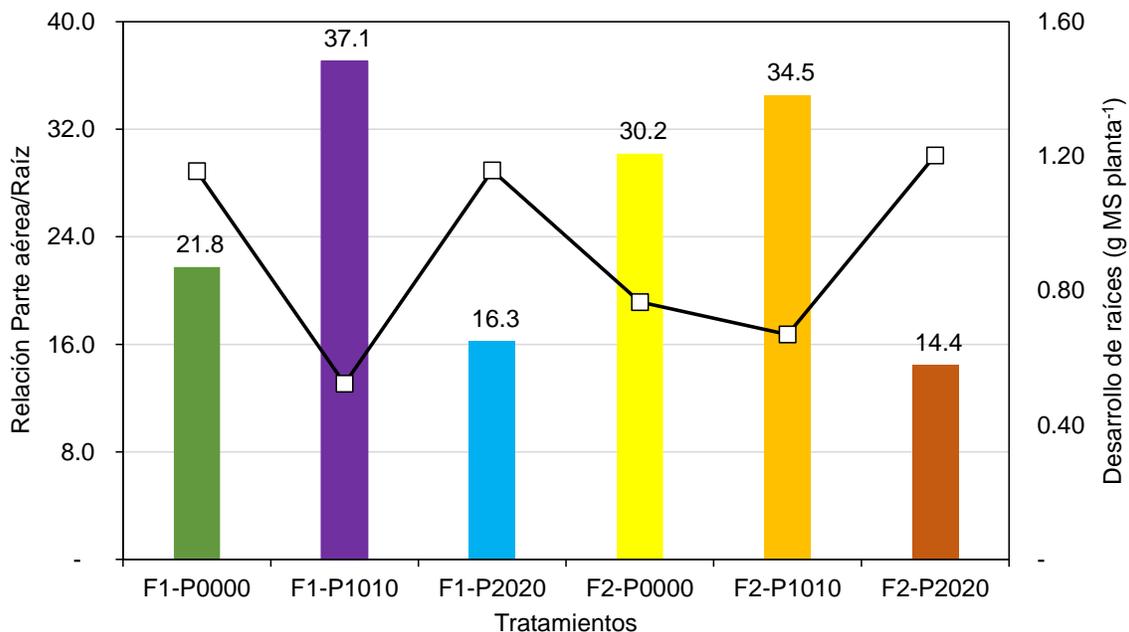


**Figura 13.** Distribución de las raíces alrededor de la planta de pimiento, como respuesta a seis tratamientos que combinan dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de la raíz. En el primer anillo se representa las raíces que crecieron alrededor de la planta dentro de un radio de 10 cm; en el segundo, están las que crecieron fuera de él.

## Eficiencia de la raíz para producir biomasa aérea

Se calculó la relación entre la biomasa seca de la parte aérea de la planta y la biomasa seca de las raíces producidas, con el objetivo de evaluar la eficiencia del sistema radicular en la producción de biomasa de la parte aérea (Figura 14). Los tratamientos F1-P1010, F2-P1010 y F2-P0000 presentaron las mejores relaciones, con 37.1, 34.5 y 30.2, respectivamente.

Cabe resaltar que dichos tratamientos registraron los valores más bajos en lo que se refiere a raíces producidas por planta, pero tuvieron las más altas producciones de biomasa seca, lo que las ubica como más eficientes. Sin embargo, estos valores se consideran elevados porque no concuerdan con los obtenidos por algunos autores.



**Figura 14.** Desarrollo de raíces y relación parte aérea/raíz en base a biomasa seca en pimiento morrón, como respuesta a seis tratamientos que combinan dos frecuencias de riego y tres medios de crecimiento de la raíz. El eje vertical izquierdo corresponde a la relación brote/raíz y el eje vertical derecho, a la cantidad de raíces por planta.

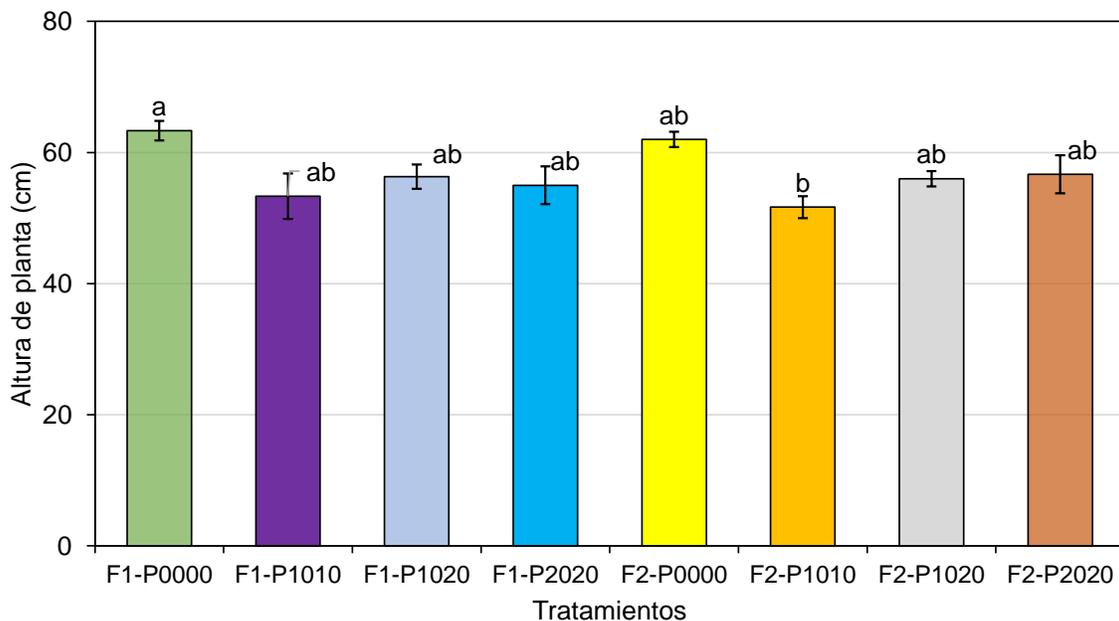
Por ejemplo, Lévesque *et al.* (2020) reportaron relaciones brote/raíz máximas de 7.0 en pimiento cultivado en diferentes sustratos formados por mezclas a base de peat-moss, perlita y biochar. Por su parte, Widuri *et al.* (2020) encontraron para pimiento morrón relaciones brote/raíz máximas de 8.72 para el híbrido Genie. Cabe resaltar que aún los tratamientos que resultaron con las relaciones brote/raíz más bajas, registraron valores superiores a los que se hace referencia.

## VI.6 Dinámica del crecimiento

### VI.6.1 Altura de planta

En la Figura 15 se pueden observar los resultados de la evaluación final de la altura total que alcanzó la planta de pimiento por efecto de los tratamientos aplicados, los cuales se derivan de la conjunción de dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el mejor F1-P0000, que registró al final del ciclo una altura promedio de 63.3 cm planta<sup>-1</sup>.

Dicho tratamiento combina la frecuencia de riego F1 y al medio de crecimiento de raíces P0000 o suelo natural. Se observa después un grupo de seis tratamientos, que quedaron como los segundos mejores, que por el nivel de significancia alcanzado se les identifica como "ab". En el último lugar quedó el tratamiento F2-P1010, en el grupo "b", con 51.7 cm planta<sup>-1</sup>.



**Figura 15.** Evaluación de la altura promedio total que alcanzó la planta de pimiento morrón en invernadero al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos definidos por dos frecuencias de fertirriego y cuatro medios de crecimiento. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

El crecimiento vegetativo es una expresión de las condiciones ambientales y de manejo a las que está o estuvo sometida una planta bajo un determinado período de tiempo. Es el reflejo de las condiciones favorables y desfavorables a las que ha estado

sometido un cultivo, tales como altas o bajas temperaturas, radiación solar alta o reducida, estrés hídrico o nutrimental, etcétera.

Definido el crecimiento como un incremento irreversible en el tamaño de las plantas, a menudo acompañado por cambios en la forma, es fácil apreciarlo visualmente con plantas más altas, con tallo más grueso y follaje más abundante. Por ello, al comparar plantas de esta manera, se puede concluir al menos cualitativamente, sobre si las condiciones en que se han desarrollado fueron diferentes o no.

Con excepción de la altura de planta, la evaluación del resto de las variables al final del ciclo, no arrojó diferencias significativas entre los tratamientos. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por May-Lara *et al.* (2011), quienes observaron que cuando el chile habanero es sometido a estrés hídrico a través de la manipulación de la frecuencia de riego, se reducen la altura de planta, el diámetro basal, el volumen de raíces y la biomasa.

En referencia a los efectos del bajo nivel de agua disponible en el suelo, algunos autores como Balaguera *et al.* (2008) indican que con menor presión de turgencia en la planta provocada por un déficit hídrico, se restringe el crecimiento celular, lo que se traduce en hojas más pequeñas, menor conductancia estomática y menor crecimiento del tallo.

En cuanto a la altura de plantas, el tratamiento que combina la frecuencia de riego F1 y al medio P0000 (F1-P0000), resultó ser el mejor al final del ciclo con 63.3 cm planta<sup>-1</sup>. Cabe resaltar que dicho medio, independientemente de la frecuencia de riego asignada, siempre registró los mayores valores de crecimiento. Desde las primeras mediciones y hasta el final del ciclo, se observó la predominancia de las plantas cultivadas en el suelo normal: más altas, con tallo más grueso y con follaje más abundante.

En el caso contrario, se encuentra el medio P2020 (con el mayor volumen de perlita) que siempre registró los menores valores de crecimiento. Estos resultados no concuerdan con los esperados, ya que de acuerdo con Kozlowski (1999) la compactación alta del suelo provoca en las plantas alteraciones fisiológicas de diversos tipos, tales como reducción de los niveles en la actividad fotosintética y de la fotosíntesis total por el desarrollo de áreas foliares más pequeñas.

Una posible explicación de los resultados para el medio P0000, puede ser el hecho de que el problema de compactación del suelo no fue una condición uniforme en todo el

perfil. El horizonte 00-10 cm presentó una densidad aparente inicial de  $1.28 \text{ g cm}^{-3}$ , la cual de acuerdo con Materechera *et al.* (1992) y Pazaca (2019), es un valor normal que no representa limitaciones para que las raíces de pimiento se puedan extender libremente en forma lateral en los  $360^\circ$ , e inclusive que esta condición les haya conferido una ventaja inicial significativa sobre las plantas desarrolladas en sustrato artificial.

Lo anterior se atribuye a que el suelo no modificado conserva sus propiedades naturales, lo que lo convierte en un reservorio de agua y nutrientes más grande y estable que la perlita, de tal manera que las plantas cultivadas en suelo, tuvieron mejores condiciones para presentar un arranque inicial acelerado, lo que realmente sucedió desde octubre y que se mantuvo hasta noviembre, superando al resto del grupo en todas las variables de crecimiento; aunque en diciembre, enero y febrero registró las menores velocidades de cambio, lograron mantener la ventaja inicial hasta el final.

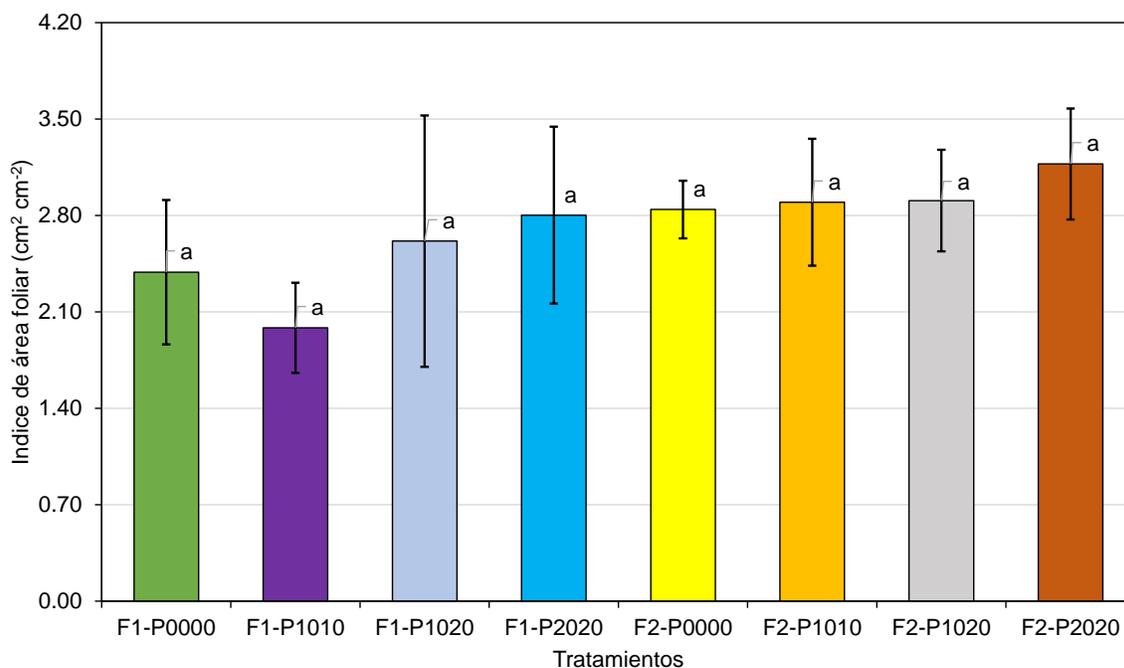
A pesar de que quedó demostrada la existencia de la condición de compactación en el suelo de trabajo, los resultados obtenidos en el medio P0000 no muestran efectos negativos en el desarrollo y rendimiento de la planta. Esto puede ser explicable con los argumentos de algunos autores como Hossne (2008) que señala que para un mismo suelo y cultivo, la densidad aparente no es una variable constante en el tiempo, ya que puede ser afectada y cambiar con el contenido de humedad en el suelo.

Este autor menciona también que en el proceso de expansión/contracción del suelo, provocado naturalmente por los cambios de humedad asociados al riego, el volumen de una masa de suelo tiende a oscilar, produciendo cambios en la densidad aparente. En este mismo sentido, Berardi *et al.* (2019) descubrieron que un alto régimen de humedad del suelo (cercano a capacidad de campo) y un alto contenido de nutrientes y materia orgánica, redujeron la severidad de la compactación del suelo en el desarrollo de las raíces y brotes de las plántulas de pimiento.

### **VI.6.2 Índice de área foliar**

En la Figura 16 se pueden observar los resultados de la evaluación final del Índice de área foliar (IAF) total que desarrolló la planta de pimiento durante el ciclo por efecto de los ocho tratamientos aplicados. A pesar de las evidentes diferencias numéricas existentes en el IAF alcanzado por los tratamientos, no se encontraron diferencias significativas entre ellos, lo que significa que ninguna de las frecuencias de riego y ninguno de los medios de

crecimiento, produjeron resultados diferentes sobre la variable. Lo anterior es debido a la alta variabilidad de los datos, lo cual se confirma al analizar la amplia extensión de las barras de error estándar. En términos absolutos, el mejor tratamiento fue F2-P2020, que alcanzó un IAF promedio de 3.17 y el más bajo F1-P1010 con 1.98.



**Figura 16.** Índice de área foliar (IAF) que desarrolló la planta de pimiento morrón al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos derivados de dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

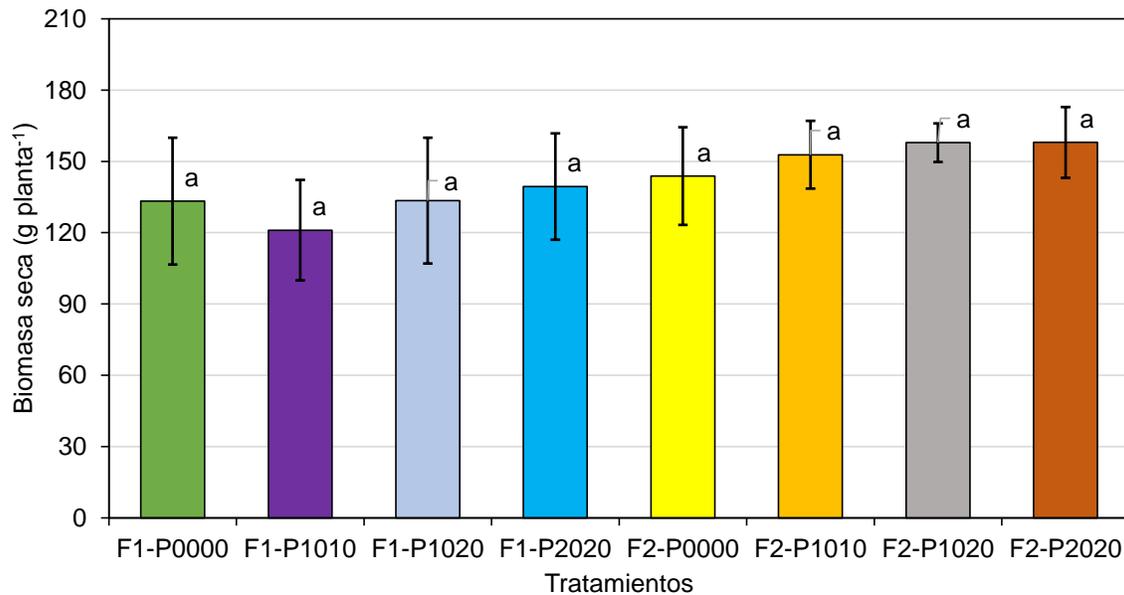
Como se ha señalado, estos resultados no corresponden con los esperados, especialmente para los tratamientos con el medio P0000 que representan al suelo compactado, en los que se pronosticaban los peores rendimientos. Algunos autores han reportado los efectos nocivos de la compactación del suelo sobre el crecimiento y desarrollo de la planta.

Kozlowski (1999) afirma que la fotosíntesis total se ve disminuida como resultado de que las plantas desarrollan áreas foliares más pequeñas. En este mismo sentido, Andrade *et al.* (1993) indicaron que se redujo el crecimiento en girasol, debido a que las hojas tuvieron velocidades de crecimiento más lentas y las hojas individuales tuvieron menor tamaño. Ferree y Streeter (2004) señalaron que el aumento de la densidad aparente

del suelo redujo la longitud de los brotes, el área foliar total, el tamaño y la materia seca de las hojas, brotes y raíces de los manzanos cultivados en contenedores.

### VI.6.3 Biomasa seca

En la Figura 17 se muestran los resultados de la evaluación final de la biomasa seca total acumulada por la planta de pimiento morrón en todo el ciclo de cultivo, por el efecto de los ocho tratamientos aplicados. Es evidente la diferencia numérica existente entre ellos, pero estadísticamente no se refleja, lo que implica que ninguna de las frecuencias de riego y ninguno de los medios de crecimiento provocaron resultados diferenciales. Lo anterior posiblemente sea debido a la alta variabilidad de los datos, lo cual se aprecia al analizar la amplia extensión de las barras de error estándar observada en algunos tratamientos.



**Figura 17.** Evaluación de la biomasa seca total que acumuló el pimiento morrón al final del ciclo, como respuesta a ocho tratamientos derivados de dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz. Letras diferentes indican diferencias significativas (HSD de Tukey,  $\alpha=0.05$ ).

En términos absolutos, los tres mejores tratamientos fueron F2-P2020, F2-P1020 y F2-P1010. Entre ellos predomina la frecuencia de riego F2 y los medios con perlita como los que produjeron los resultados más altos. En el último lugar se ubicó F1-P1010 con 121 g planta<sup>-1</sup>. Para biomasa seca, los tratamientos F1-P1020 y F1-P1010 resultaron ser primero y último del grupo, con 158 y 121 g planta<sup>-1</sup>, respectivamente. Esto se explica por

la alta variabilidad de los datos obtenidos. Por tal motivo, tampoco es posible establecer cuál es el mejor tratamiento.

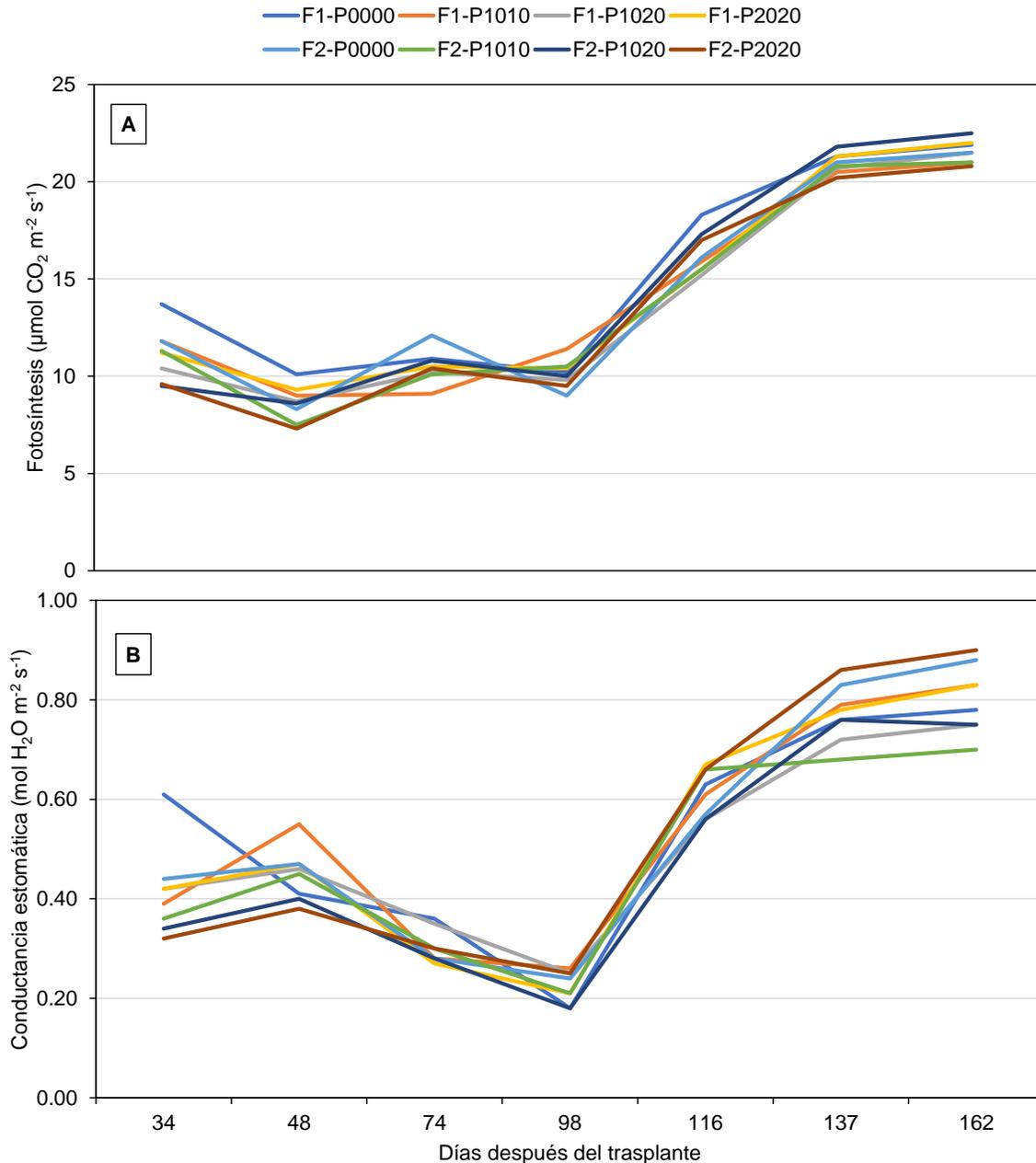
Por otro lado, estos resultados también pudieran ser la consecuencia del período de aclimatación de la plántula establecida en perlita, ya que este sustrato presenta una alta porosidad, pero una baja capacidad de retención de agua, que se agota o consume muy rápido, y que si no es reabastecida con oportunidad, puede provocar estrés hídrico y nutricional, con afectaciones en la velocidad de crecimiento de la planta. De hecho, durante el mes de octubre, en el primer mes de plantación, con una temperatura promedio de 22 °C, la plántula se observó estresada por exceso de calor y efecto chimenea, lo que motivó a la replantación y a la afectación de los parámetros de crecimiento iniciales.

## **VI.7 Comportamiento fisiológico**

### **VI.7.1 Fotosíntesis**

En el ciclo se realizaron siete mediciones de fotosíntesis, desde los 34 hasta los 162 ddt. La evolución de la tasa de fotosíntesis bajo los diferentes tratamientos se muestra en la Figura 18A. Todas las líneas de los tratamientos muestran un patrón similar, con un valor promedio de  $10.1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  desde los 34 hasta los 98 ddt, para luego iniciar un ascenso acelerado llegando a alcanzar valores promedio de  $21.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a los 162 ddt. Como dato relevante es que, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas de muestreo, lo cual significa que ni las frecuencias de riego ni los medios de crecimiento estudiados produjeron resultados diferenciales y que la tendencia observada a lo largo del ciclo es el resultado de las condiciones prevalecientes al momento de las mediciones.

Como se sabe, la fotosíntesis es un proceso fisiológico que depende de varios factores, como la intensidad de la radiación solar, el fotoperíodo (duración del día), la temperatura ambiental, el déficit de presión de vapor, la edad de la hoja y el estado fenológico de la planta. Al respecto, durante los primeros 98 ddt de cultivo, las variables climáticas que influyen sobre esta variable presentaron una tendencia descendente, en el que se registraron bajos niveles de radiación solar incidente, nublados frecuentes, días más cortos, bajas temperaturas, con hojas jóvenes y una planta en pleno crecimiento vegetativo.



**Figura 18.** Valores de Fotosíntesis (A) y Conductancia estomática (B) en pimiento morrón, registrados durante el ciclo como respuesta a ocho tratamientos conformados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz.

Pero a partir de esta fecha, la elevación acelerada de los valores de fotosíntesis fue motivada por una mejoría de las condiciones ambientales, así como la entrada de la planta en la etapa de producción intensiva de frutos y cosecha, en la que se incrementa fuertemente la demanda de fotosintatos. El comportamiento de las variables fisiológicas está directamente ligado con la temperatura y la radiación solar. Varios estudios han

demostrado que la temperatura está correlacionada con muchos factores fisiológicos como conductancia estomática, transpiración y el estado hídrico de la planta.

Por su parte la variable conductancia estomática, al ser un indicador de la apertura de estomas para el intercambio gaseoso de la planta, es una variable fisiológica que determina la fotosíntesis y la transpiración. Al tener una mayor cantidad de estomas abiertos, se obtiene una mayor conductancia, y las tasas de fotosíntesis y transpiración son potencialmente más altas. A su vez, la radiación solar proporciona la energía para realizar la fotosíntesis (Pask *et al.*, 2013).

Los análisis de comparación de Tukey mostraron que, para todas las variables fisiológicas, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos en ninguna de las fechas de muestreo, lo que significa que el comportamiento de estas variables a lo largo del ciclo, no fue modificado por las condiciones impuestas por la combinación de las frecuencias de riego y los medios de crecimiento.

Sin embargo, los factores que afectan las variables fisiológicas son diversos. Al respecto Azcón-Bieto *et al.* (2013) señalan que la tasa fotosintética llega a su nivel máximo en condiciones hídricas adecuadas y cantidades óptimas de CO<sub>2</sub>, niveles suficientes de radiación solar y temperatura. Además, la fotosíntesis puede variar significativamente entre especies de plantas y también en función de la disponibilidad de nutrientes en el suelo, especialmente nitrógeno y fósforo.

La no existencia de significancia entre las variables fisiológicas como respuesta a los tratamientos evaluados, lleva a interpretar que al momento de los muestreos existió un entorno ambiental homogéneo, tanto en la zona de la raíz como en la parte aérea, para que todas las plantas pudieran realizar, por ejemplo, una actividad fotosintética al mismo nivel, en el que las condiciones físicas del suelo, determinadas por los factores estudiados, no tuvieron influencia.

Sin embargo, estos resultados no coinciden con los esperados ni los encontrados por Zakaria *et al.* (2020) quienes reportaron que la restricción para el crecimiento de la raíz (lo cual puede suceder en un suelo compactado) redujo la tasa de fotosíntesis y la actividad fotoquímica del PSII en plantas de pimiento morrón.

### VI.7.2 Conductancia estomática

Se realizaron siete mediciones de conductancia estomática en el ciclo, desde los 34 hasta los 162 ddt. La conductancia estomática es otra variable fisiológica, que al igual que la fotosíntesis, no respondió a las frecuencias de fertirriego aplicadas ni a los medios de crecimiento de la raíz, ya que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, con excepción de la medición a los 34 ddt donde el tratamiento F1-P0000 fue el mejor con  $0.61 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

La conductancia estomática está influenciada por una diversidad de factores ambientales como la radiación solar, temperatura, déficit de presión de vapor y el contenido de agua en el suelo. Desde el establecimiento del cultivo y hasta los 98 ddt, el comportamiento de esta variable estuvo influenciado principalmente por la tendencia descendente de los componentes climáticos. Al igual que en la fotosíntesis, a partir del período señalado el comportamiento de esta característica estuvo determinado por mejores condiciones del entorno y la mayor actividad fisiológica de la planta al estar en producción y desarrollo de frutos.

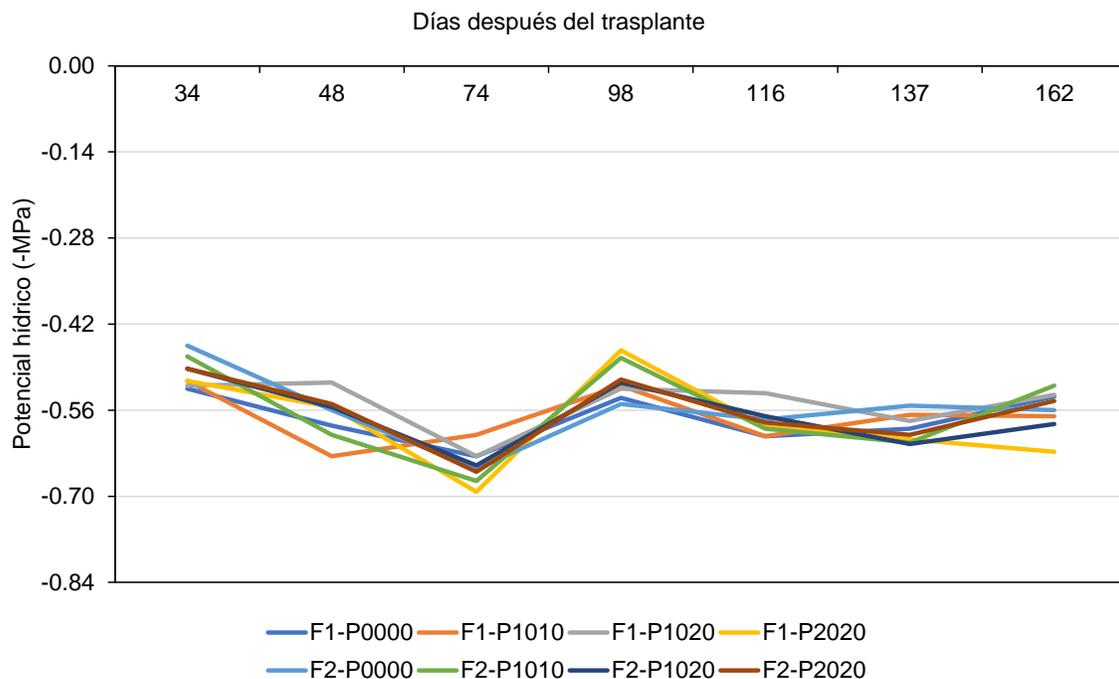
La relación de la radiación solar con algunas variables fisiológicas las estudiaron Jaimez *et al.* (2005), quienes reportaron para pimiento en invernadero que, para radiaciones PAR bajas (menores a  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y comunes para un día nublado), las conductancias estomáticas alcanzaron valores máximos de solo  $200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , lo cual influyó en menores niveles de fotosíntesis, que alcanzaron un máximo de  $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y tasas de transpiración menores a  $3.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . También encontraron que el punto de saturación de fotosíntesis, está alrededor de  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  para los tres híbridos de pimiento morrón.

Las respuestas de las variables fisiológicas también son opuestas a las esperadas, sobre todo a la influencia de la programación del riego en la fisiología del cultivo. Aguilar *et al.* (2019) compararon tres niveles de riego a partir de diferentes porcentajes de agotamiento del agua en el suelo (5, 10 y 15%) bajo sistema de cultivo en invernadero, reportando que la frecuencia de riego repercutió principalmente en la transpiración de la planta, siendo mayor en la dotación al 5%, a la par con un aumento de la conductancia estomática, pero sin un aumento significativo de la fotosíntesis.

Estudiando el efecto de la frecuencia de riego sobre la fisiología vegetal, Rada *et al.* (2005) observaron una disminución significativa en la conductancia estomática a medida que aumentó el estrés hídrico en plantas sometidas a 3, 12 y 25 días sin agua. Encontraron que los niveles de asimilación de CO<sub>2</sub> se redujeron en 25% en las plantas con estrés severo, mientras que los volúmenes de transpiración se redujeron 39%. En este caso, la temperatura de la hoja puede aumentar pudiendo causar daños por calor (Quintal *et al.*, 2012).

### VI.7.3 Potencial hídrico del tallo

Se realizaron siete mediciones de potencial hídrico en el ciclo, desde los 34 hasta los 162 ddt. El potencial hídrico es otra variable fisiológica que no respondió a las frecuencias de fertirriego aplicadas ni a los medios de crecimiento de la raíz, ya que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, en ninguna de las fechas de muestreo (Figura 19).



**Figura 19.** Potencial hídrico del tallo en pimiento morrón, registrado durante el ciclo como respuesta a ocho tratamientos conformados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz.

La respuesta del potencial hídrico a los tratamientos no muestra una tendencia definida a lo largo del ciclo, ya que como se sabe, el movimiento del agua a través de la

planta está regulado por los estomas, por lo que en momentos de mayor demanda de agua ejercida por la atmósfera por un déficit de presión de vapor alto, se genera un potencial hídrico más negativo en el tallo, llegando a producirse el cierre estomático si el abastecimiento de agua desde el suelo no se da con suficiente velocidad.

El potencial hídrico se relaciona positivamente con la cantidad de estrés hídrico al que está sometida la planta. Se puede establecer que, durante el ensayo la planta de pimiento morrón no estuvo sometida a estrés hídrico, ya que los valores obtenidos corresponden a un estado de hidratación normal.

Para el caso del potencial hídrico, se observa que las curvas de respuesta tampoco muestran significancia a ninguno de los factores evaluados en ninguna de las fechas de muestreo, lo que implica que el comportamiento de la variable durante el ciclo es el reflejo de otras condiciones no controlables, imperantes al momento de realizar las mediciones, como los niveles de radiación solar y temperatura, o el estado fenológico de la planta.

Los valores promedio oscilaron entre (-0.56 MPa) y (-0.58 MPa). Los potenciales hídricos obtenidos en este ensayo demuestran que en el ciclo, el cultivo de pimiento no estuvo sometido a estrés hídrico y que fueron mayores a los valores en los cuales algunos autores han reportado el cierre total de estomas para pimiento (-1.8 MPa) (Horton *et al.*, 1982) y (-1.5 MPa) (Aloni *et al.*, 1991).

Un estudio sobre riego deficitario realizado por Quintal *et al.* (2012) señala que el abatimiento del agua disponible en el suelo, es uno de los factores que provoca estrés hídrico de mayor impacto en el crecimiento vegetal y que en los sistemas agrícolas ocasiona pérdidas económicas. Encontraron en Chile habanero que al regar con una lámina de 60% de la humedad aprovechable (40% de NAP) se obtuvo la mejor condición hídrica de la planta, con 55% más de área foliar, 44% más de biomasa total y 84% más de rendimiento de fruto, que con 20% del agua disponible.

Estudiando los efectos de la radiación PAR sobre el microclima en invernadero y las relaciones hídricas e intercambio de gases en tres híbridos de pimiento morrón, Jaimez *et al.* (2005) encontraron que los potenciales hídricos fueron significativamente menores (más negativos) en días con altas radiaciones PAR al mediodía (13.00-14.00 horas), reportando los valores (-1.34 MPa), (-1.37 MPa) y (-1.36 MPa), para los híbridos

evaluados. Resaltan que, al parecer la cantidad y distribución del riego aplicado, evitó disminuciones drásticas en los potenciales hídricos durante el mediodía.

Una condición que provoca que el potencial hídrico de la hoja disminuya (se haga más negativo) es cuando aumenta el estrés de la planta por falta de agua, afectando el crecimiento vegetativo y producción de biomasa (May-Lara *et al.*, 2011). No obstante, se ha descubierto que una reducción moderada de la humedad aprovechable en el suelo (nivel de agotamiento permisible óptimo) podría ser de utilidad para las plantas, ya que en cultivos como tomate se mejora el rendimiento y el uso eficiente de agua, cuando se riega con 80% que con 100% de la humedad aprovechable (Quintal *et al.*, 2012).

En relación a los efectos del bajo nivel de agua disponible en el suelo, algunos autores como Balaguera *et al.* (2008) indican que con menor presión de turgencia en la planta provocada por un déficit hídrico, se restringe el crecimiento celular, lo que se traduce en hojas más pequeñas, menor conductancia estomática y menor crecimiento del tallo.

Al estudiar la respuesta de las plantas al déficit hídrico provocado por el riego deficitario, Chamú-Baranda *et al.* (2011) señalan que el primer mecanismo de defensa es el cierre de estomas para evitar la caída del potencial hídrico, pero que esto disminuye la fotosíntesis y altera el transporte y distribución de fotosintatos, afectando de forma significativa el funcionamiento normal de la planta.

Los resultados obtenidos para las variables fisiológicas no guardan coherencia con los planteados en las hipótesis, al menos para los tratamientos que incorporan al medio P0000, ya que de acuerdo con Kozlowski (1999), la compactación alta del suelo provoca en las plantas alteraciones fisiológicas de diversos tipos con efectos negativos en el desarrollo.

En este mismo sentido, se esperaban resultados desfavorables para el medio P0000, tomando en consideración que las plantas cultivadas en suelo compactado, deberían presentar síntomas de estrés abiótico y sus consecuencias, porque las raíces deberían estar enfrentando restricciones para su desarrollo normal.

En cambio, las plantas establecidas en medios modificados con perlita, con sus raíces creciendo en un entorno favorable y sin estrés por las condiciones del suelo,

deberían exhibir valores más altos de fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración y potencial hídrico.

En relación de los resultados obtenidos para el medio P0000, Zakaria *et al.* (2020) reportaron que no encontraron diferencias significativas en los valores de conductancia estomática en pimiento en invernadero, con y sin restricción de raíces, afirmando que esto demostró que las plantas pueden tener un mecanismo para facilitar su aclimatación en respuesta a un factor limitante.

En este ensayo, las curvas de respuesta de las variables fisiológicas no presentaron un comportamiento definido, porque la planta responde fisiológicamente diferente en función a las condiciones ambientales cambiantes que está enfrentando en un momento dado. Como se sabe, la fotosíntesis es un proceso fisiológico que depende de varios factores, como la intensidad de la radiación solar, el fotoperíodo (duración del día), la temperatura ambiental, el déficit de presión de vapor, el contenido de humedad en el suelo, la conductancia estomática, la edad de la hoja y el estado fenológico de la planta.

Al respecto, cabe resaltar que durante los primeros 98 ddt del cultivo, las variables climáticas que pueden influir sobre la actividad fotosintética presentaron una tendencia descendente, en el que se registraron bajos niveles de radiación solar incidente, nublados frecuentes, días más cortos, bajas temperaturas, con hojas jóvenes y una planta en pleno crecimiento vegetativo.

Por ejemplo, en ese período se obtuvo el nivel más bajo de fotosíntesis, conductancia estomática y transpiración, con  $8.6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $0.22 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y  $5.36 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Por lo tanto, la explicación a la tendencia observada en dicho período, puede ser explicada desde el punto de vista de las condiciones imperantes en el entorno.

Después de los 98 ddt, las cifras de todas las variables presentaron un incremento significativo (62.2% para fotosíntesis, 176% para conductancia estomática y 73% para transpiración), lo cual coincidió con el aumento en los niveles promedio de temperatura y radiación solar, además del inicio de la cosecha, en la que se incrementa fuertemente la demanda de fotosintatos que conduce a mayores tasas de fotosíntesis.

Zakaria *et al.* (2020) reportaron que las plantas de pimiento cultivadas en sustrato en invernadero, con y sin restricción del crecimiento de las raíces, aumentaron el nivel de fotosíntesis cuando comenzó la etapa de floración; después, hubo una ligera reducción porque en ese punto las plantas comenzaron a entrar en la etapa de maduración del fruto. Posteriormente, la actividad fotosintética aumentó nuevamente cuando las plantas comenzaron a florecer después de una cosecha de frutos.

## **VI.8 Variables de rendimiento**

### **VI.8.1 Rendimiento**

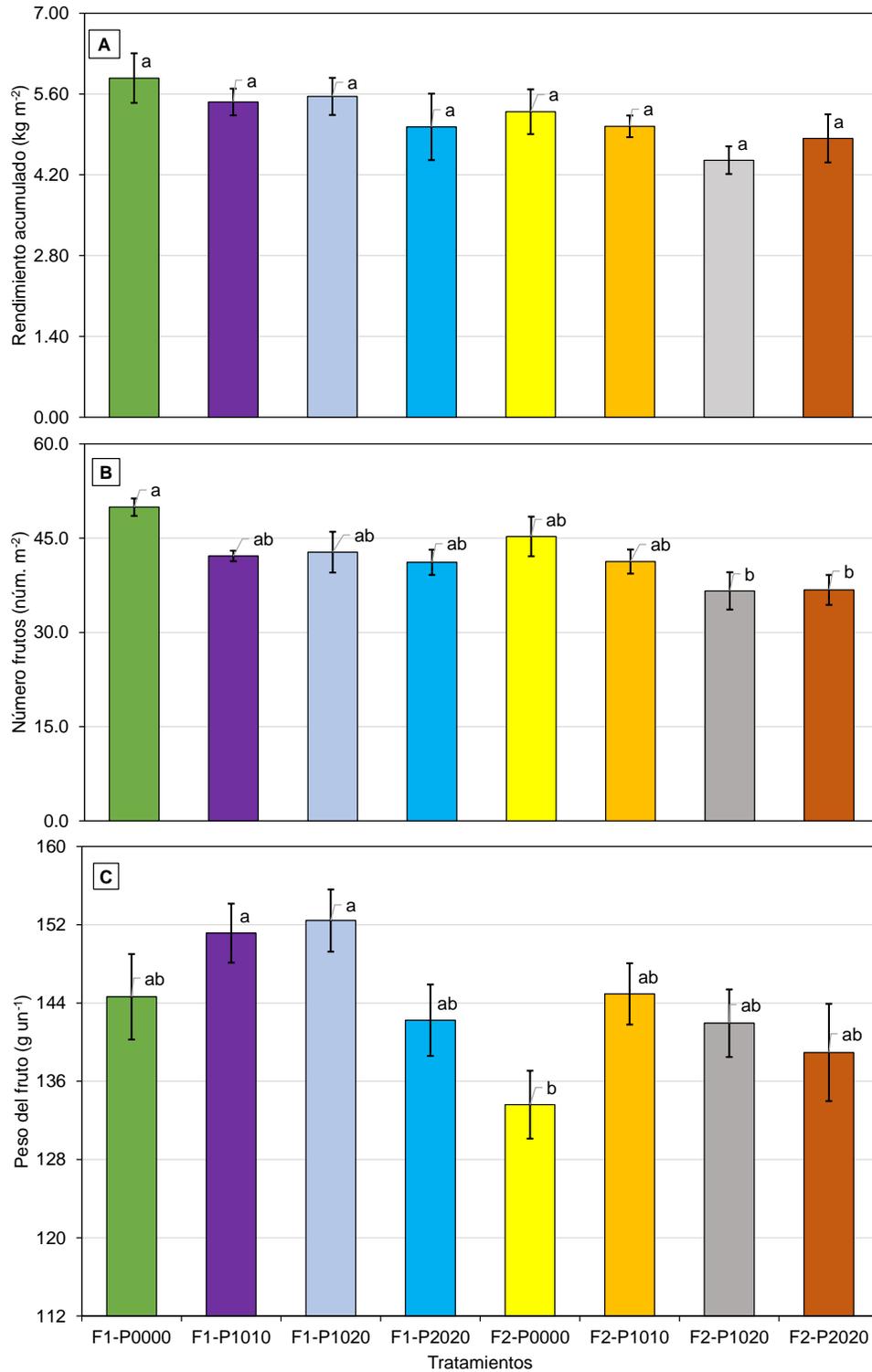
Esta variable se refiere al rendimiento acumulado por metro cuadrado en todo el ensayo. En la Figura 20A se muestra el efecto de ocho tratamientos sobre el rendimiento total alcanzado por el pimiento morrón en todo el ciclo de cultivo. El análisis de comparación de medias de Tukey indica que estadísticamente todos los tratamientos resultaron iguales.

Sin embargo, si resalta una evidente diferencia numérica entre ellos. En términos nominales, el mejor tratamiento fue F1-P0000 con un rendimiento promedio total de 5.88 kg m<sup>-2</sup>, que significa un rendimiento de 58.8 t ha<sup>-1</sup>. Este tratamiento combina a la frecuencia de riego F1 y al medio P0000 o suelo natural. Se aprecia también que, dentro de los tres mejores tratamientos, la frecuencia F1 es la que está presente en todos ellos. El tratamiento con el rendimiento más bajo fue F2-P1020 con 4.45 kg m<sup>-2</sup>.

Los principales componentes del rendimiento de una planta son el número de frutos producidos y el peso unitario del fruto. Para cuantificar el rendimiento por hectárea, se multiplica el rendimiento por planta por la densidad de siembra o de población.

El rendimiento total por metro cuadrado se considera uno de los resultados más relevantes de este estudio, porque la cantidad de frutos cosechados determinan los ingresos totales y la rentabilidad financiera que obtiene el productor por la aplicación de las tecnologías adquiridas.

Los análisis de comparación de medias de Tukey no mostraron la existencia de diferencias significativas en el rendimiento de los tratamientos, es decir, que la combinación de las frecuencias de riego y los medios de crecimiento no produjeron un resultado diferencial. A pesar de la evidente diferencia numérica entre tratamientos, la diferencia estadística fue anulada por la variabilidad de los datos.



**Figura 20.** Variables de rendimiento alcanzadas en pimiento morrón bajo ocho tratamientos integrados por dos frecuencias de riego y cuatro medios de crecimiento de la raíz: (A) Rendimiento total por metro cuadrado en el pimiento morrón, (B) Número total de frutos cosechados por metro cuadrado y (C) Peso promedio del fruto.

En términos absolutos, el mejor tratamiento fue F1-P0000, que asocia a la frecuencia de riego F1 con el suelo compactado o medio P0000, con  $5.88 \text{ kg m}^{-2}$  equivalentes a  $58.8 \text{ t ha}^{-1}$ . Este rendimiento es elevado comparándolo con el reportado por los investigadores López y Ochoa (2019) de la Fundación Produce Sinaloa, quienes evaluaron en campo abierto al pimiento morrón SV1675PB en el ciclo 2017-2018, encontrando un rendimiento de  $44.7 \text{ t ha}^{-1}$ , por lo que se puede ver que la referencia del rendimiento obtenido con este material, fue ampliamente superada con  $14.1 \text{ t ha}^{-1}$ .

Considerando una densidad de población de 35,552 plantas  $\text{ha}^{-1}$ , el rendimiento del mejor tratamiento equivale a  $1.65 \text{ kg planta}^{-1}$ . Estos resultados son muy similares a los reportados por Navarro *et al.* (2010) de  $1.6 \text{ kg planta}^{-1}$  y muy superiores a los encontrados por Gungor y Yildirim (2013), quienes reportaron rendimientos promedio de  $476.3 \text{ g planta}^{-1}$  de pimiento morrón cultivado en una mezcla de sustratos (turba-perlita-arena) en invernadero.

Con respecto a la obtención del mejor rendimiento en suelo compactado, esto es opuesto a lo esperado, como lo confirman los trabajos de Zakaria *et al.* (2020), quienes encontraron que en plantas de pimiento morrón con restricciones para el crecimiento de la raíz, el peso y número de frutos por planta se redujeron significativamente en 23% y 17% respectivamente, en comparación con el testigo. Los rendimientos de chile fueron  $1,396.3 \pm 25.23 \text{ g planta}^{-1}$  para el testigo y  $1,070.6 \pm 10.39 \text{ g planta}^{-1}$  para tratamiento de restricción de raíz.

Numéricamente, los tres mejores tratamientos en rendimiento fueron aquellos regados con la frecuencia F1. Esta aparente predominancia de F1 sobre F2, puede ser atribuible a que las frecuencias de riego evaluadas se determinaron en base a dos niveles de agotamiento del agua disponible del suelo: 10 y 30%.

Con estos parámetros, los contenidos de agua en el suelo fueron diferentes para el cultivo, ya que se regó en diferentes momentos y con diferentes tiempos y láminas de riego. Por lo anterior, se puede apreciar que la programación del riego con un NAP del 10%, matemáticamente produjo mejores resultados en rendimiento que el de 30%.

Además, el nivel del 10% presenta ventajas operativas, sobre todo cuando se trabaja en suelos que presentan problemas de compactación, ya que el riego más frecuente permite manejar láminas y tiempos de aplicación menores, que al ser

fraccionados durante el día, permiten una mejor infiltración del agua de riego en el suelo y evitan los escurrimientos superficiales y el encharcamiento del terreno, reduciendo pérdidas de agua y nutrientes, inconvenientes que se presentan cuando se riega con un NAP del 30%.

Estos resultados son opuestos a los trabajos realizados por Fernández *et al.* (2005) quienes encontraron que el umbral de riego para pimiento en invernadero sin que se produzca estrés hídrico es cuando se consume hasta el 55% del agua disponible en el suelo.

En relación al efecto de la frecuencia de riego en el rendimiento de los cultivos, May-Lara *et al.* (2011) mencionan que en muchas hortalizas se ha comprobado que las respuestas fisiológicas por la reducción del nivel de humedad en el suelo son bien toleradas por la planta, por lo que es viable incrementar la eficiencia en el uso del agua disminuyendo la humedad aprovechable hasta cierto nivel sin afectar el rendimiento.

En el chile habanero, ellos encontraron que las plantas toleran cierto estrés hídrico (reducción en 40% de la humedad aprovechable) sin disminuir significativamente su rendimiento. Ruiz *et al.* (2013) señalan que para el pimiento morrón, se puede agotar hasta el 25-30% del agua total disponible en el suelo, sin que se aprecie una reducción en el rendimiento.

### **VI.8.2 Número de frutos**

El número de frutos cosechados junto con el peso unitario del fruto, representan los principales componentes del rendimiento de una planta de pimiento morrón. Estas características dependen de la variedad, del manejo del cultivo y de las condiciones ambientales imperantes en el ciclo.

El número total de frutos cosechados por metro cuadrado en todo el ensayo para los ocho tratamientos evaluados, se puede observar en la Figura 20B. El análisis de comparación de medias de Tukey indica que se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos, siendo el mejor el F1-P0000 con un rendimiento de 49.9 frutos m<sup>-2</sup>. Después se observa un grupo de cinco tratamientos, considerados como los segundos mejores, en el grupo estadístico clasificado como "ab". En el tercer grupo, clasificado estadísticamente como "b", se encuentran F2-P1020 y F2-P2020, con las menores cantidades de frutos producidos.

### VI.8.3 Peso unitario del fruto

El peso unitario del fruto es uno de los componentes del rendimiento, que junto con el número de frutos cosechados, determinan el rendimiento de una planta de pimiento morrón. Además, es uno de los parámetros que definen la calidad del producto y el mercado al cual será destinado. Esta característica depende de la genética de la planta, del manejo del cultivo y de las condiciones ambientales para el desarrollo.

En la Figura 20C se presentan los resultados finales de la evaluación del peso promedio del fruto como respuesta a los ocho tratamientos estudiados en pimiento morrón. Se aprecia que se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo los mejores F1-P1020 y F1-P1010 con 152.4 y 151.1 g fruto<sup>-1</sup>, respectivamente.

Dichos tratamientos combinan a la frecuencia de riego F1 con dos medios de perlita. En un segundo grupo se observan cinco tratamientos, con clasificación estadística "ab". En el tercer grupo, clasificado como "b", se ubica el tratamiento F2-P0000 con 134 g fruto<sup>-1</sup>.

En cuanto a peso unitario del fruto, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, siendo los mejores F1-P1020 y F1-P1010, con 152.4 y 151.1 g fruto<sup>-1</sup>, respectivamente. Se aprecia que en ellos está involucrada nuevamente la frecuencia de riego F1.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Navarro *et al.* (2010), quienes evaluaron un híbrido de pimiento en invernadero cultivado en perlita con agua no salina, reportando que se obtuvieron los tamaños más grandes, con un peso unitario del fruto de 150 g pieza<sup>-1</sup>, aunque López y Ochoa (2019) señalan que un pimiento que pesa de 130 a 150 g fruto<sup>-1</sup>, es clasificado como tamaño chico.

En cuanto al número de frutos cosechados, también se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el mejor F1-P0000, con 49.9 frutos m<sup>-2</sup>, que considerando una densidad de población de 35,552 plantas ha<sup>-1</sup>, equivale a 14.0 frutos planta<sup>-1</sup>.

Estos resultados son muy similares a los obtenidos por Navarro *et al.* (2010), quienes reportaron que un híbrido de pimiento, alcanzó alrededor de 11 frutos planta<sup>-1</sup>, regado con agua no salina, mientras que los tratamientos de riego con agua salina, rindieron más frutos pero de menor tamaño.

Por su parte, Fernández *et al.* (2005) estudiaron el efecto del déficit hídrico continuo en pimiento cultivado en invernadero, aplicando como tratamientos de riego 100, 50 y 20% de la ETc estimada, encontrando que el déficit de agua tuvo poco efecto sobre el número total de frutos, pero aumentó considerablemente la cantidad de frutos sin valor de mercado por tamaño pequeño y altas incidencias de quemaduras solares.

## VII. CONCLUSIONES

- Los tratamientos evaluados solo mostraron efecto significativo en las variables número de frutos por planta, peso del fruto y altura de planta. Para dichas variables, los mejores tratamientos fueron F1-P0000, F1-P1010 y F1-P1020, y F1-P0000, respectivamente, aunque estos resultados no concuerdan con los planteados en la hipótesis, ya que se esperaba que en el medio P0000 o suelo compactado, las respuestas fueran las más bajas.
- Aunque no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en la producción de raíces, se concluye que los medios de perlita si permitieron que el sistema radicular del pimiento explorara un mayor volumen de suelo, al lograr una mayor crecimiento en forma lateral y extenderse a una mayor profundidad, como quedó planteado en las hipótesis.
- Las aportaciones de nutrientes aplicadas al cultivo mediante dos frecuencias de riego diferentes, resultaron ser iguales al final del ensayo.
- Se observó la tendencia del medio P2020 a promover una mayor expansión de su sistema radicular, tanto vertical como horizontal, con raíces más largas pero más delgadas.
- También se observó la tendencia de la frecuencia de riego F1 a desarrollar sistemas de raíces más compactos, porque al disponer de suficiente agua y nutrientes en el bulbo húmedo, no requieren explorar un mayor volumen de suelo.
- Los dos niveles de agotamiento del agua disponible en el suelo, produjeron programas de riego diferentes, pero las láminas de agua aplicadas al cultivo resultaron ser similares al final del ciclo.

- El manejo de un nivel de agotamiento permisible de 10%, permite una mejor infiltración del agua de riego en el suelo compactado, evitando escurrimientos y encharcamientos del terreno, reduciendo pérdidas de agua y nutrientes.
  
- Por diversas razones, como la pandemia y las condiciones climáticas, se considera que los resultados no son concluyentes sobre sí la modificación del suelo compactado con cilindros de perlita es capaz de promover un mayor desarrollo de raíces en pimiento morrón, por lo que se recomienda realizar más investigaciones de este tipo.
  
- De igual manera, se considera conveniente realizar mayores estudios para concluir si la sustitución del suelo compactado por cilindros de perlita en la zona radicular puede contribuir a incrementar el rendimiento del pimiento morrón.
  
- El fertirriego no produjo efectos significativos sobre la dinámica de las propiedades químicas del extracto de pasta saturada; el pH, conductividad eléctrica y las concentraciones de nutrientes, no se modificaron de tal manera que causaran efectos adversos en el cultivo.

## VIII. PERSPECTIVAS

- En muchas variables evaluadas en este ensayo, sobresale la frecuencia de riego F1 por encima de F2, por lo que a nivel práctico, se debería utilizar la primera en el fertirriego del pimiento morrón en invernadero. Además, F1 presenta ventajas operativas en el manejo del agua de riego, ya que se evitan pérdidas de recursos por escurrimientos superficiales y encharcamientos del terreno, y desde el punto de vista económico, permite ahorros en el uso del agua y nutrientes.
- Aunque los análisis estadísticos no mostraron diferencias significativas en algunas variables como desarrollo de raíces, se observó una tendencia de la frecuencia F1 a desarrollar sistemas radiculares más compactos, ya que la raíz no tiene que extenderse para buscar agua y nutrientes, los cuales están disponibles más cerca con el riego por goteo de alta frecuencia, lo que puede ser importante para el cultivo en un suelo compactado. De hecho, la programación del fertirriego con NAP de 5 a 10%, fraccionado de 4 a 5 veces por evento de riego, pudiera por si mismo considerarse una estrategia de manejo agronómico de los suelos con problemas de compactación sin realizar ninguna modificación a los mismos, es decir, sin la necesidad de efectuar inversiones en mano de obra para la realización de los orificios en el suelo y para la adquisición de la perlita.
- No se encontraron diferencias significativas entre las frecuencias de riego F1 y F2, por lo que las aportaciones de agua y nutrientes que recibió el cultivo fueron las mismas, pero en la frecuencia F2 se observa la tendencia natural de la planta a extenderse en la búsqueda de agua y nutrientes y a desarrollar sistemas de raíces más largos, lo cual pudiera no ser conveniente cuando la planta se encuentra en un suelo compactado, porque no tendría la facilidad para poder incrementar su radio de exploración.
- La perlita es un sustrato adecuado como medio de crecimiento de la raíz, ya que en los tratamientos donde se incluyó a la perlita como el P2020 (independientemente de la frecuencia de riego), se observó una tendencia de la raíz a extenderse más en los sentidos vertical y horizontal, de mejor manera que el medio P0000 o suelo compactado. En los tratamientos que asocian al medio P1010 no se observó que este efecto fuera notable. Sin embargo, la implementación del medio P2020 demandaría 223,267 litros de perlita por hectárea, lo cual puede resultar muy costoso.

## IX. REFERENCIAS

- Aguilar, J. M., Giner, A., Núñez, A., Nájera, I., Juan, F., Baixauli, C., y San Bautista, A. (2019). Comportamiento agronómico y fisiológico de pimiento tipo italiano en invernadero en cultivo sin suelo, bajo diferentes calidades de perlita y dotaciones de riego. *XII Jornadas Del Grupo de Horticultura. Capítulo 2. Técnicas de Cultivo*, 58, 135–138.
- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W. C. T., Tijink, F. G. J., Van Der Linden, J. P., Pires, S., and Sommer, C. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*, 73(1–2), 145–160. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7)
- Alameda, D., Anten, N. P. R., and Villar, R. (2012). Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. *Soil and Tillage Research*, 120, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.11.013>
- Alarcón, A. L. (2006). Fertirrigación del pimiento dulce en invernadero. Capítulo 5. In *Cultivos sin suelo* (1a., pp. 45–52). Reus: Ediciones de Horticultura.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Boletín 56).
- Aloni, B., Daie, J., and Karni, L. (1991). Water relations, photosynthesis and assimilate partitioning in leaves of pepper (*Capsicum annuum*) transplants: Effect of water stress after transplanting. *Journal of Horticultural Science*, 66(1), 75–80. <https://doi.org/10.1080/00221589.1991.11516127>
- Aloni, B., Karni, L., Zaidman, Z., and Schaffer, A. A. (1996). Changes of carbohydrates in pepper (*Capsicum annuum* L.) flowers in relation to their abscission under different shading regimes. *Annals of Botany*, 78(2), 163–168. <https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0109>
- Aloni, B., Pressman, E., and Karni, L. (1999). The effect of fruit load, defoliation and night temperature on the morphology of pepper flowers and on fruit shape. *Annals of Botany*, 83(5), 529–534. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0852>
- Andrade, A., Wolfe, D. W., and Fereres, E. (1993). Leaf expansion, photosynthesis, and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. *Plant and Soil*, 149(2),

175–184. <https://doi.org/10.1007/BF00016607>

- Arroyo-Vargas, L., Tirado-Torres, J. L., Volke-Haller, V. H., y Valdez-Cepeda, R. D. (2013). Normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto y correlaciones entre nutrimentos y rendimiento en pimiento (*capsicum annum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 16(1), 69–82.
- Atwell, B. J. (1993). Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and Experimental Botany*, 33(1), 27–40. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(93\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0098-8472(93)90053-1)
- Avitia-García, E., Pineda-Pineda, J., Castillo-González, A. M., Trejo-Téllez, L. I., Corona-Torres, T., y Cervantes-Urbán, E. (2014). Extracción nutrimental en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(3), 519–524. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i3.955>
- Azcón-Bieto, J., Fleck, I., Aranda, J., y Gómez-Casanovas, N. (2013). Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. In *Fundamentos de fisiología vegetal* (2da., p. 669). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., and Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Balaguera, H. E., Álvarez-Herrera, J. G., and Rodríguez, J. D. (2008). Effect of the water deficit on the transplant of tomato seedlings (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 246–255.
- Barker, J. C. (1990). Effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Journal of Horticultural Science*, 65(3), 323–331. <https://doi.org/10.1080/00221589.1990.11516061>
- Batte, M. T., and Forster, D. L. (2015). Old is New Again: The Economics of Agricultural Gypsum Use - Part One. *Journal of the American Society of Farm Managers and Rural Appraisers*, 56(74), 38. [https://www.researchgate.net/publication/278027941\\_Old\\_is\\_New\\_Again\\_The\\_Economics\\_of\\_Agricultural\\_Gypsum\\_Use](https://www.researchgate.net/publication/278027941_Old_is_New_Again_The_Economics_of_Agricultural_Gypsum_Use)
- Berardi, J., Montico, S., Di Leo, N., Spinozzi, J., y Scaglione, J. (2019). Efecto del escarificado y la fertilización nitrogenada sobre la resistencia a la penetración de las raíces y la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays*) de primera y tardío. In

- Agromensajes* (Vol. 4, Issue 55, pp. 5–7). Facultad de Ciencias Agrarias-UNR.
- Buñay, C. J. (2017). *Etapas fenológicas del cultivo del pimiento (Capsicum annuum. L.) var. verde, bajo las condiciones climáticas del cantón General Antonio Elizalde (Bucay) provincia del Guayas*. Universidad Técnica de Ambato en Ecuador.
- Chamú-Baranda, J. A., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C., Martínez-Villegas, E., y López-Ordaz, A. (2011). Response of sweet pepper to partial root drying in hydroponic and greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(1), 97–110.
- Chen, G., and Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1–2), 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>
- Chen, L., and Dick, W. A. (2011). *Gypsum as an Agricultural Amendment: General Use Guidelines*.
- CONAGUA. (2013). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Saltillo-Ramos Arizpe (0510), Estado de Coahuila*.
- Condés, L. F. (2017). Pimiento. In Cajamar Caja Rural (Ed.), *Cultivos hortícolas al aire libre* (Enero 2017, p. 788). Escobar impresores.
- CSR-Laboratorio. (2006). *Valores del extracto de la pasta saturada del suelo* (p. 1). CSR Servicios.
- De Boer, H. J., Lammertsma, E. I., Wagner-Cremer, F., Dilcher, D. L., Wassen, M. J., and Dekker, S. C. (2011). Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation under rising CO<sub>2</sub>. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(10), 4041–4046. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100555108>
- Dhiman, S. (2018). To eat or not to eat meat: Striking at the root of global warming! In *Handbook of Engaged Sustainability* (Vols. 1–2). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71312-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71312-0_2)
- Díaz, A. (2019). *Urgen a México a aprovechar agricultura protegida para impulsar exportaciones*. La Oferta-NAHP. <https://laoferta.com/2019/11/15/urgen-a-mexico-a-aprovechar-agricultura-protegida-para-impulsar-exportaciones/>
- Dorais, M., and Gosselin, A. (2002). Physiological response of greenhouse vegetable crops to supplemental lighting. *Acta Horticulturae*, 580, 59–67. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.580.6>

- Du, Q., Zhang, D., Jiao, X., Song, X., and Li, J. (2018). Effects of atmospheric and soil water status on photosynthesis and growth in tomato. *Plant, Soil and Environment*, 64 (2018)(No. 1), 13–19. <https://doi.org/10.17221/701/2017-PSE>
- E.-Jaimez, R., Da-Silva, R., D'Aubeterre, A., Allende, J., Rada, F., y Figueiral, R. (2005). Variaciones microclimáticas en invernadero: efecto sobre las relaciones hídricas e intercambio de gases en pimentón (*Capsicum annum*). *Agrociencia*, 39(1), 41–50.
- FAO. (2016). *Compactación del suelo* (p. 2).
- Fernández, M. D., Gallardo, M., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R. B., and Fereres, E. (2005). Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 80(1), 87–96. <https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511897>
- Ferree, D. C., and Streeter, J. G. (2004). Response of container-grown grapevines to soil compaction. *HortScience*, 39(6), 1250–1254. <https://journals.ashs.org/hortsci/abstract/journals/hortsci/39/6/article-p1250.xml>
- Ferree, D. C., Streeter, J. G., and Yuncong, Y. (2004). Response of container-grown apple trees to soil compaction. *HortScience*, 39(1), 40–48. [file:///C:/Users/cq/Downloads/\[23279834 - HortScience\] Response of Container-grown Apple Trees to Soil Compaction.pdf](file:///C:/Users/cq/Downloads/[23279834 - HortScience] Response of Container-grown Apple Trees to Soil Compaction.pdf)
- Figueroa, U., y Cueto, J. A. (2003). Uso sustentable del suelo y abonos orgánicos. In *Abonos orgánicos y Plasticultura* (p. 233). [http://www.smcsmx.org/files/books/abonos\\_org.pdf](http://www.smcsmx.org/files/books/abonos_org.pdf)
- Fitter, A. (2002). Characteristics and functions of root systems. In A. E. y U. K. Yoav Wisel (Ed.), *Plant Roots: The Hidden Half* (Third edit, pp. 21–50).
- Flores, J., Ojeda, W., Hernández, J. M., Lobato, R., Gómez, L., e Iñiguez, M. (2017). *Caracterización agroclimática de la agricultura protegida para la seguridad alimentaria y su adaptación ante el cambio climático*.
- Forsythe, W., Sancho, F., y Villatoro, M. (2005). Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 175–185.
- Freeland, R. S., Wells, L. G., and Dodd, R. B. (1996). Assessing Soil Properties for Site-Specific Agriculture Using Ground Penetrating Radar. *Symposium on the Application*

- of Geophysics to Engineering and Environmental Problems* 1996, 1115–1123.  
<https://doi.org/10.4133/1.2922244>
- Fricke, W. (2017). Water transport and energy. *Plant, Cell & Environment*, 40(6), 977–994. <https://doi.org/10.1111/pce.12848>
- Gardiner, D., Felker, P., and Carr, T. (1999). Cactus extract increases water infiltration rates in two soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(11–12), 1707–1712. <https://doi.org/10.1080/00103629909370323>
- Garrity, D. P., Watts, D. G., Sullivan, C. Y., and Gilley, J. R. (1982). Moisture Deficits and Grain Sorghum Performance: Evapotranspiration-Yield Relationships. *Agronomy Journal*, 74(5), 815–820. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400050011x>
- Gil, R. C. (2007). El ambiente del suelo y el crecimiento de las raíces. *Publicación Miscelánea*, 107, 5.
- Gómez, J. C. (2013). Manual de Prácticas de Laboratorio de Suelos. In *Servicio Nacional de Aprendizaje*.
- González, O., Iglesias, C. E., y Herrera, M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57–63.
- Grzesiak, M. T., Hura, K., Jurczyk, B., Hura, T., Rut, G., Szczyrek, P., and Grzesiak, S. (2017). Physiological markers of stress susceptibility in maize and triticale under different soil compactions and/or soil water contents. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 355–372. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1370143>
- Gungor, F., and Yildirim, E. (2013). Effect of different growing media on quality, growth and yield of pepper (*Capsicum annuum* L.) under greenhouse conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 45(5), 1605–1608.
- Guo, Q.-E., Wang, Y.-Q., Nan, L.-L., Cao, S.-Y., and Che, Z.-X. (2013). Effect of solute type and salinity on soil water availability in orchards in saline semiarid regions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(8), 973–978. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1011.2013.00973>
- Hakansson, I. (1990). A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, 16(1–2), 105–120. [101](https://doi.org/10.1016/0167-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

1987(90)90024-8

- Hamza, M. A., and Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2004.08.009>
- Horto Info. (2017). *Informe pimienta 2017-Hortoinfo*. Página Web. <http://www.hortoinfo.es/index.php/informes/cultivos/6011-inf-pim-2017>
- Horton, R., Beese, F., and Wierenga, P. J. (1982). Physiological Response of Chile Pepper to Trickle Irrigation. *Agronomy Journal*, 74(3), 551–555. <https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400030035x>
- Hossne, A. (2002). Valoración física conformante del ambiente radical. In *Revista UDO Agrícola* (Vol. 2, Issue 1).
- Hossne, A. J., Méndez, J., Leonett, F. A., Meneses, J. E., and Gil, J. A. (2017). Terramechanics of corn root development. *UTCiencia*, 4(3), 183–197.
- Hossne, Américo J. (2008). La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 195–202.
- INTAGRI. (2019). Importancia de la radiación solar en la producción bajo invernadero. In *Serie Horticultura Protegida*.
- Iraqi, D., Gagnon, S., Dubé, S., and Gosselin, A. (1995). Vapor Pressure Deficit (VPD) Effects on the Physiology and Yield of Greenhouse Tomato. *HortScience*, 30(4), 846. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.4.748>
- Johnson, C. E., and Bailey, A. C. (2002). Soil Compaction. In *Advances in Soil Dynamics Volume 2* (pp. 155–178). American Society of Agricultural and Biological Engineers. <https://doi.org/10.13031/2013.9452>
- Kafkafi, U., and Tarchitzky, J. (2012). Fertirrigación: Una Herramienta para una Eficiente Fertilización y Manejo del Agua. In IFA (Ed.), *Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes (IFA) Instituto Internacional de la Potasa (IIP)* (1a.). International Potash Institute.
- Kays, S. J. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 233–247. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00088-X)
- Khan, S., Shah, A., Nawaz, M., and Khan, M. (2017). Impact of different tillage practices on soil physical properties, nitrate leaching and yield attributes of maize (*Zea mays*

- L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(ahead), 0–0.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000019>
- Kozłowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596–619.
- Kramer, H. (2015). *Conservación de los recursos naturales para una Agricultura sostenible. Soluciones para la compactación del suelo.*
- Lévesque, V., Jeanne, T., Dorais, M., Ziadi, N., Hogue, R., and Antoun, H. (2020). Biochars improve tomato and sweet pepper performance and shift bacterial composition in a peat-based growing medium. *Applied Soil Ecology*, 153(September 2019), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103579>
- Lipiec, J., and Hakansson, I. (2000). Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 87–94. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00094-X)
- Liu, F., Cohen, Y., Fuchs, M., Plaut, Z., and Grava, A. (2006). The effect of vapor pressure deficit on leaf area and water transport in flower stems of soil-less culture rose. *Agricultural Water Management*, 81(1), 216–224. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.005>
- López, J., y Ochoa, J. A. (2019). *Validación de híbridos de hortalizas de las principales empresas comerciales en Sinaloa ciclo 2017-2018.*
- López, O. I. (2011). *Evaluación comparativa de los impactos ambientales del cultivo de pimiento bajo invernadero en sistema hidropónico y en suelo, mediante la aplicación de análisis de ciclo de vida. Caso de estudio de dos productores del Estado de Guanajuato, México.* Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Maldonado-Torres, R., Álvarez-Sánchez, M. E., Almaguer-Vargas, G., Barrientos-Priego, A. F., y García-Mateos, R. (2007). Estandares Nutricionales para Aguacatero ‘HASS.’ *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 13(1), 103–108.
- Markoska, V., Lisichkov, K., Boev, B., and Gulaboski, R. (2018). The influence of the perlite as a substrate for improving on some water properties on the fluvial soil with an application of retentional curves. *Journal of Agriculture and Plant Sciences*, 16(1), 73–82.
- Martínez, P, F., Montero, J. I., Baudoin, W., Nisen, A., Grafiadellis, M., Verlodt, H.,

- Jimenez, R., y De Villele, O. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo. Manual 90 FAO* (W. O. Baudoin (ed.); 2da.). FAO.
- Martínez, P.-F., y Montero, J. I. (2002). *El cultivo protegido en clima mediterráneo* (W. O. Baudoin (ed.); 2a. Edició). FAO.
- Martínez, P. F., y Roca, D. (2011). Sustratos para el cultivo sin suelo. Materiales, propiedades y manejo. In V. J. Flórez R. (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo* (1a. edició, Issue June, pp. 37–78). Universidad Nacional de Colombia.
- Materechera, S. A., Alston, A. M., Kirby, J. M., and Dexter, A. R. (1992). Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, *144*(2), 297–303. <https://doi.org/10.1007/BF00012888>
- May-Lara, C., Pérez-Gutiérrez, A., Ruiz-Sánchez, E., Ic-Caamal, A. E., y García-Ramírez, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum Chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *14*(3), 1039–1045.
- McAdam, S. A. M., and Brodribb, T. J. (2016). Linking turgor with ABA biosynthesis: Implications for stomatal responses to vapor pressure deficit across land plants. *Plant Physiology*, *171*(3), 2008–2016. <https://doi.org/10.1104/pp.16.00380>
- Merino, A., Doni, S., Evelpidou, N., Ferreira, T., García-Arias, A. I., Masciandaro, G., and Rodríguez-González, P. M. (2019). *Best Practices in Evaluation and Restoration of Degraded Mediterranean Environments* (A. M. y Otros (ed.); 1a.). IBADER Instituto de Biodiversidade Agraria e Desenvolvimento Rura.
- Molina, E., Salas, R., y Castro, A. (1993). Curva de crecimiento y absorción de nutrimentos en fresa (*Fragaria x ananasa* cv. Chandler) en Alajuela. *Agronomía Costarricense*, *17*(1), 67–73.
- Moreno, E. del C., Mora, R., Sánchez, F., y García-Pérez, V. (2011). Fenología y rendimiento de híbridos de pimiento morrón (*Capsicum annum* L.) cultivados en hidroponia. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, *XVII*(2), 5–18.
- Narro, E. A. (1985). Mejoradores de suelos calcáreos y fertilización fosfatada en el cultivo de la papa. *Agraria. Revista Científica UAAAN*, *1*(1), 57–70.
- Narváez-Ortiz, W. A., Morales-Díaz, A. B., Benavides-Mendoza, A., y Reyes-Valdés, M.

- H. (2015). Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(Publicación Especial), 2383–2397. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i12.769>
- Navarro, J. M., Garrido, C., Flores, P., y Martínez, V. (2010). The effect of salinity on yield and fruit quality of pepper grown in perlite. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(1), 142. <https://doi.org/10.5424/sjar/2010081-1153>
- Navarro, S., y Navarro, G. (2013). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal* (M. P. Libros (ed.); 3a.). Artes Gráficas Cuesta. S. A.
- Orosco, B. E., Núñez, H. G., Pérez, L., Valencia, M., Trejo, L. I., Díaz, F. R., y Martínez, O. A. (2017). Injerto en pimiento morrón: efecto de la salinidad en las características morfológicas. *Memorias Del Sexto Congreso Internacional de Investigación En Ciencias Básicas y Agronómicas*, 135–144. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34309.45288>
- Ottosen, C. O., Rosenqvist, E., and Sørensen, L. (2003). Effect of a dynamic climate control on energy saving, yield and shelf life of spring production of bell peppers (*Capsicum annuum* L.). *European Journal of Horticultural Science*, 68(1), 26–31.
- Palacio, A., y Sánchez, E. (2017). Influencia de la variedad, portainjerto y época de cosecha en la calidad e índices de madurez en pimiento morrónmen. *Nova Scientia*, 9(2), 23.
- Pask, A., Pietragalla, J., Mullan, D., Chávez, P., y Reynolds, M. (2013). Fitomejoramiento fisiológico II: Una guía de campo para la caracterización fenotípica de trigo. In P. C. y M. R. Alistair Pask, Julián Pietragalla, Debra Mullan (Ed.), *CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de maiz y trigo)* (1a.). CIMMYT. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pazaca, K. M. (2019). *Determinación de la densidad crítica en suelos entisoles y alfisoles aplicada al cultivo de ají habanero (Capsicum chinense Jacq)*. Universidad Técnica de Machala en Ecuador.
- Peet, M. M. (1999). Greenhouse crop stress management. *Acta Horticulturae ISHS*, 481, 643–655.
- Penella, C., and Calatayud, A. (2018). Pepper Crop under Climate Change: Grafting as an Environmental Friendly Strategy. In *Climate Resilient Agriculture - Strategies and*

- Perspectives* (pp. 129–155). InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72361>
- Pressman, E., Moshkovitch, H., Rosenfeld, K., Shaked, R., Gamliel, B., and Aloni, B. (1998). Influence of low night temperatures on sweet pepper flower quality and the effect of repeated pollinations, with viable pollen, on fruit setting. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 73(1), 131–136. <https://doi.org/10.1080/14620316.1998.11510955>
- Quintal, W. C., Pérez-Gutiérrez, A., Latournerie, L., May-Lara, C., Ruiz, E., y Martínez, A. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento de chile habanero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(2), 155–160.
- Rada, F., Ramírez, M. E., García-Núñez, C., Jaimez, R. E., y Azócar, A. (2005). Relaciones hídricas e intercambio de gases en *Theobroma cacao* var. Guasare bajo períodos de déficit hídrico. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Universidad Del Zulia*, 22(2), 112–120.
- Ramírez, C. A. (2019). *Efecto del fertirriego salino controlado en el cultivo de pepino en semi-hidroponía durante la etapa de producción*. Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Reche, J. (2010). *Cultivo del Pimiento Dulce en Invernadero*.
- Rubio-Asensio, J. S., Parra, M., and Intrigliolo, D. S. (2020). Open field hydroponics in fruit crops: Developments and challenges. *Fruit Crops: Diagnosis and Management of Nutrient Constraints*, 1(1), 419–430. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818732-6.00030-7>
- Ruiz, J. A., Medina, G., González, I. J., Flores, H. E., Ramírez, G., Ortiz, C., y Byerly, K. F. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos 2da. Edición* (2da. Edici). INIFAP.
- Rylski, I., Aloni, B., Karni, L., and Zaidman, Z. (1994). Flowering, fruit set, fruit development and fruit quality under different environmental conditions in tomato and pepper crops. *Acta Horticulturae*, 366, 45–56. <https://doi.org/10.17660/actahortic.1994.366.3>
- Salazar, C., y Hernández, C. (2018). Respuesta a estrés hídrico controlado del pimiento durante la maduración del fruto. In M. T. Pino (Ed.), *Pimientos para la industria de alimentos e ingredientes*. *Boletín INIA No. 360* (1a., pp. 59–68). INIA.

- Sarkar, B., Basak, B. B., Sarkar, S., Mandal, S., and Bhaduri, D. (2017). Use of soil amendments in an integrated framework for adaptive resource management in agriculture and forestry. In *Adaptive Soil Management : From Theory to Practices* (pp. 143–159). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_7)
- SEMARNAT. (2014). *El Medio Ambiente en México 2013-2014*. Informe Resumen. Capítulo 3. Suelos.
- SEMINIS. (2020). *Pimiento híbrido SV1675PB Seminis*. Página Web. <https://www.seminis.mx/product/sv1675pb/373>
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., and Hafeez, A. (2017). Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(11), 10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>
- Shaxson, F., and Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal: el significado de la porosidad del suelo* (2005th ed.). FAO. <http://www.fao.org/3/y4690s00.htm#Contents>
- Shierlaw, J., and Alston, A. M. (1984). Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, 77, 15–28.
- Sierra, C., Lancelloti, A., y Vidal, I. (2007). Elemental sulphur as pH and soil fertility amendment for some Chilean soils of Regions III and IV. *Agricultura Técnica*, 67(2), 173–181.
- Snakin, V. V., Prisyazhnaya, A. A., and Kovács-Láng, E. (2001). *Soil liquid phase composition* (First edit). ELSEVIER SCIENCE B.V.
- Soane, B. D., and Ouwkerk, C. V. (2000). *Soil Compaction in Crop Production* (Second imp). ELSEVIER SCIENCE B.V.
- Solís, A. (2016). *El pimiento en invernadero con fertirrigación*.
- Tasistro, A. (2019). *Suelos Compactados*.
- Torres, A. P., y Lopez, R. G. (2002). Medición de luz diaria integrada en invernaderos. In *Purdue Extension: Vol. HO-238-SW*.
- Urrestarazu, M., Haro, J., y Manzuela, P. (2005). Reutilización de perlita como enmienda en suelos arcillosos. *Horticultura*, May 2014, 38–41.
- Villa, M., Catalán, E. A., Inzunza, M. A., Román, A., Macías, H., y Cabrera, D. (2014).

*Producción hidropónica de chile habanero en invernadero* (SAGARPA-INIFAP (ed.); Primera Ed). INIFAP-CENID-RASPA.

Villarroel, C., Goykovic, V., Collao, P., Barraza, M., Fernandez, J., Villarroel, A., y Valdivia, R. (2019). Evaluación de desempeño de un invernadero ubicado en el desierto de Atacama, Chile, a través de iot. *Interciencia*, *44*(7), 8.

Widuri, L. I., Lakitan, B., Sakagami, J., Yabuta, S., Kartika, K., and Siaga, E. (2020). Short-term drought exposure decelerated growth and photosynthetic activities in chili pepper (*Capsicum annum* L.). *Annals of Agricultural Sciences*, *65*(2), 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2020.09.002>

Wilson, G., Borch, T., Kremer, R., Faber, M., Hurt, W., Wilson, M., and Logsdon, S. (2008). *Glossary of Soil Science Terms 2008* (I. Soil Science Society of America (ed.); 2008th ed.). Soil Science Society of America, Inc. [www.soils.org](http://www.soils.org)

Xu, H. L., Iraqi, D., and Gosselin, A. (2007). Effect of ambient humidity on physiological activities and fruit yield and quality of greenhouse tomato. *Acta Horticulturae ISHS*, *761*, 85–92. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2007.761.9>

Yahya, Z., Mohammed, A. T., Harun, M. H., and Shuib, A. R. (2012). Oil palm adaptation to compacted alluvial soil (Typic Endoaquepts) in Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, *24*(December), 1533–1541.

Zakaria, N. I., Ismail, M. R., Awang, Y., Megat, P. E., and Berahim, Z. (2020). Effect of root restriction on the growth, photosynthesis rate, and source and sink relationship of chilli (*Capsicum annum* L.) grown in soilless culture. *BioMed Research International*, *2020*, 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2020/2706937>