



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION
EN CIENCIAS AGRICOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO
EDAFOLOGIA**

**MORFOLOGÍA Y FISIOLÓGÍA DE LA RAÍZ DE PIMIENTO
DULCE (*Capsicum annuum* L.) CON AIREACIÓN EN
SUSTRATOS ORGÁNICOS Y MINERALES**

WENDY KARINA GASTÉLUM FERRO

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2007

La Presente tesis titulada: **“Morfología y fisiología de la raíz de pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.) con aireación en sustratos orgánicos y minerales”** realizada por la alumna: Wendy Karina Gastélum Ferro, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR:

CONSEJERO: _____
Dr. Manuel Sandoval Villa

ASESOR: _____
Dr. Prometeo Sánchez García

ASESOR: _____
Dra. Cecilia Beatriz Peña Valdivia

AGRADECIMIENTOS

*A Dios; Porque es por el que soy lo que soy, y lo que seré, gracias por darme, vida, salud y una maravillosa familia y amigos inolvidables.
“En la medida en que el Espíritu del Señor opera en nosotros, nos parecemos más a él y reflejamos más su gloria” (2 Cor. 3:18)*

*Al Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología (CONACYT)
Por brindar el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.*

*Al Colegio de postgraduados
Por brindarme la oportunidad de formarme en sus aulas y permitirme crecer como profesionalista.*

A mi consejo particular;

*Dr. Manuel Sandoval Villa;
Gracias por su confianza, paciencia, y comprensión, gracias por todo su apoyo recibido para la realización de este trabajo, pero sobre todo, gracias por ser mi amigo y mi guía durante todo este tiempo.*

*Dr. Prometeo Sánchez García
Dra. Cecilia Beatriz Peña Valdivia*

Gracias por su colaboración, apoyo y paciencia en la realización del presente trabajo, por ser pieza clave en la culminación del mismo y de manera personal gracias a cada uno de ustedes por permitirme aprender de todos ustedes a crecer como ser humano y como profesionalista.

*Al Personal académico del área de Nutrición Vegetal
Dr. Gabriel Alcántar, Dr. José Luis Tirado, Dra. Nieves Rodríguez, Dr. Arturo Galviz, por ser formadores de mi mente y mi espíritu como profesional, y como persona.*

A la Dra. Maria de Las Nieves Rodríguez Mendoza

Porque además de ser una gran maestra, me brindó el privilegio de su amistad, me dio apoyo incondicional y me hizo ver mis aciertos y errores, pero sobre todo fue mi segunda madre en todo este tiempo, nunca podré agradecerle lo suficiente, Gracias.

Al personal Secretarial y de Campo del área de Nutrición Vegetal

Laurita, Srita. Michel, Don Lupe, Don Manuel y Anita, porque sin su apoyo habría resultado muy difícil todo este tiempo.

A mis amigos

Paty y José Luís, Alberto, Pablo, Domingo, Marco, Misa y Verito.

Martha:

Gracias por tu apoyo, amistad y compañía, pero sobre todo por tu sinceridad siempre

Bere, José Luís e Ibar

Mil gracias por todo, ustedes saben tan bien como yo que este trabajo hubiera sido imposible sin su apoyo.

A mis amigas en Culiacán

O mejor sería decir; mis hermanas; Danny, Heidi y Sujey, porque lo que le pasa a una nos pasa a todas y estamos ahí para apoyar en los tropiezos y aplaudir los aciertos, porque siempre son un hombro para llorar, un oído que escucha y una mano extendida para apoyar, niñas, Mil Gracias.

Al Ing. Jacobo Gaxiola

Porque pase lo que pase sigues ahí, apoyándome en mis locuras, escuchándome y echándome porras, porque en ti encontré al hermano mayor que me regaña si lo requiero pero que también, es un gran amigo y colega. Gracias Hermano

A mis tíos

Moisés y Mary, por todo su apoyo recibido.

A la Familia Blassio Sanchez:

Joel, Caro y Hoffman; Por permitirme ser su amiga y por todo su apoyo recibido, sobre todo por ser la primera mano que se me brindó al llegar a Texcoco, mil gracias.

A mis amigos y compañeros de la agrícola

Ing. Norma Barajas, Ing. Marcos Lim, Ing. Astolfo Valenzuela, Ing. Omar Armenta, Ing. Leonel Molina, Ing. Eduardo Verdugo, M.C. Rubén Sánchez.

Y... a todos aquellos que escapan a mi memoria, pero que siempre están ahí.

DECIDATORIAS

Al mis papás

Sr. Rolando Gastélum: No sé decir otra cosa que esto; 2 jornales, te va a ir bien el sábado, puedes cobrar el cheque cuando quieras papi.

Sra. Juany Ferro: Mi eterno ángel de la guarda, compañera, amiga y cómplice, jamás tendré palabras para agradecerte, ni como pagarte todo lo que haces por mí, mi ejemplo como mujer y madre, espero algún día ser para mi hijo lo que eres tu para mí, mami.

Son los mejores padres que pudiera tener, estoy muy orgullosa de ustedes.

A mi esposo

Carlos; Debo agradecerte todo lo que haces por mí, siempre estás ahí, apoyándome, animándome y enseñándome, porque juntos compartimos tristezas, alegrías, sueños y realidades, confías en mí y eres mi compañero y amigo, siempre cuentas con la palabra exacta para cada situación, porque apenas iniciamos un camino muy largo que andándolo juntos será mas fácil y placentero, por todo eso y mucho mas... TE AMO.

A mi hijo

Calitos; eres el motor de mi vida, mi lindo tesoro, mi "titulo", tu pequeña sonrisa es lo único que necesito para que cada día sea el mejor de todos, Te Quiero Mucho hijo.

A mis Hermanos

Ulises, Misael, Katty, Por todo lo que vivimos, lo que somos y lo que nos queremos, por todo lo que nos une además de los lazos de sangre, les agradezco con el alma, que sean como son y mejor aun que sean mis hermanos.... Los quiero mucho

A Mis abuelos:

Diego Y Paula; por su cariño y apoyo a lo largo de toda mi vida

Manuel y Feliciana; *Porque no importa que haga, o a donde vaya, son mis eternos cómplices y un gran ejemplo para mí, me han dado su apoyo, cariño, consejos y comprensión, pero lo que mas les agradezco son sus regaños que me han abierto los ojos en muchas ocasiones*

A mis suegros:

Sr. Jorge Ramos y Sra. Margarita Barreto, gracias por todo su apoyo y por ser parte importante en esta nueva etapa de mi vida.

A mis cuñados

*Jorge, Paty, y el pequeño Kristopher
Julián, Ulises y Nadia; por su cariño y por todo lo que en este corto tiempo
hemos pasado juntos*

A mis amigos

*Bere, José Luis e Ibar
Ustedes mejor que nadie saben todo acerca de este trabajo, compañeros dentro
y fuera del aula, hermanos por decisión , por ser las personas más lindas que
dios me permitió conocer en mi paso por el colegio, por los recuerdos imborrables
juntos y por ser parte esencial de este trabajo... que es compartido.*

A mis tías

*Daríá, Olga, Briseida y Socorro Ferro, y sus familias, mis mamás adoptivas,
que han estado conmigo todo el tiempo desde el momento mismo de mi
nacimiento, por ser mis aliadas incondicionales y mis porristas oficiales.... Las
quiero.*

*Ana Citlali Guzmán y Florita Gastélum, por tratarme más como una hija y
amiga que como una sobrina, y estar siempre dispuestas a escucharme.*

A mis tíos


*Eleazar Gastélum (Chaar) y Luís Obregón, porque siempre creyeron en mi y en
lo que hago y me brindaron su apoyo incondicional*

A mis ángeles de la guarda


Chemat, Tío Monito, Joaquín; porque se que desde donde estén, siguen vigilándome y guiándome por el camino correcto.

A todos los que creyeron en mí y en este proyecto, mi eterno agradecimiento
Wendy


Frases que me gustaría compartir:

 *Siempre... Piensa lo que estas diciendo y Nunca digas lo que estas pensando*


Rolando Gastélum

 *Lo importante no es lo que eres, lo cardinal para ti es lo que quiere s ser*


Miguel de Unamuno

 *Es mejor saber después de haber pensado y discutido que aceptar los saberes que nadie discute para no tener que pensar.*

Fernando Savater

 *El que no sabe es un imbécil. El que sabe y calla es un criminal*

Bertoldo Brecha

 *La integridad es hacer lo correcto aunque nadie nos esté mirando.*

Jim Stovall

 *Sólo una cosa vuelve un sueño imposible: el miedo a fracasar.*

Paulo Coelho

ÍNDICE

| | |
|--|-------|
| ÍNDICE..... | ix |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | xii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiii |
| APÉNDICES..... | xvi |
| RESUMEN..... | xvii |
| ABSTRACT..... | xviii |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 2 |
| 2.1. Anatomía de la raíz..... | 2 |
| 2.2. Respiración de la raíz..... | 4 |
| 2.3. Demanda de oxígeno de diferentes cultivos..... | 5 |
| 2.4. Respuesta de las plantas a condiciones de anoxia..... | 6 |
| 2.5. Mecanismos de tolerancia a la anoxia..... | 8 |
| 2.6. Oxigenación en diferentes tipos de sistemas hidropónicos..... | 8 |
| 2.6.1. Sistema hidropónico de película nutritiva..... | 9 |
| 2.6.2. Sistema holandés..... | 9 |
| 2.6.3. Técnica del flujo profundo..... | 10 |
| 2.7. Generalidades del pimiento..... | 10 |
| 2.7.1. Descripción botánica y taxonómica..... | 11 |
| 2.7.2. Requerimientos edafoclimáticos..... | 11 |
| 2.7.2.1. Temperatura..... | 12 |
| 2.7.2.2. Luz..... | 12 |
| 2.7.2.3. Humedad relativa..... | 12 |
| 2.7.3. Producción..... | 13 |
| 2.8. Características de los sustratos..... | 14 |
| 2.8.1. Propiedades Físicas..... | 14 |
| 2.8.1.1. Granulometría..... | 15 |
| 2.8.1.2. Porosidad..... | 16 |
| 2.8.1.3. Densidad..... | 17 |
| 2.8.1.4. Capacidad de retención de agua..... | 18 |
| 2.8.1.5. Estructura..... | 18 |
| 2.8.2. Características químicas..... | 19 |
| 2.8.2.1. Químicas..... | 19 |
| 2.8.2.2. Físico-químicas..... | 19 |
| 2.8.2.3. Bioquímicas..... | 19 |
| 2.9. Tipos de sustratos..... | 19 |
| 2.9.1. Según sus propiedades..... | 20 |
| 2.9.2. Por el origen del material..... | 20 |
| 2.9.2.1. Materiales orgánicos..... | 20 |
| 2.9.2.2. Materiales inorgánicos minerales..... | 20 |
| 2.9.3. Descripción de algunos sustratos..... | 21 |
| 2.9.3.1. Sustratos naturales..... | 21 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.9.3.1.1. | Gravas | 21 |
| 2.9.3.1.2. | Arena | 21 |
| 2.9.3.1.3. | Turbas | 22 |
| 2.9.3.1.4. | Fibra de coco | 22 |
| 2.9.3.2. | Sustratos artificiales | 22 |
| 2.9.3.2.1. | Lana de roca | 22 |
| 2.9.3.2.2. | Perlita | 23 |
| 2.9.3.2.3. | Vermiculita | 23 |
| 2.10. | Permeabilidad de la membrana celulares radicales | 23 |
| 2.11. | Conclusiones | 24 |
| III. | OBJETIVOS..... | 26 |
| IV. | HIPÓTESIS..... | 27 |
| V. | MATERIALES Y MÉTODOS | 28 |
| 5.1. | Material Vegetal | 28 |
| 5.2. | Localización y características del sitio experimental | 28 |
| 5.2.1. | Ubicación..... | 28 |
| 5.3. | Establecimiento del cultivo | 29 |
| 5.4. | Aplicación del riego y nutrición del cultivo | 29 |
| 5.4.1. | Aporte de O ₂ a la solución nutritiva | 30 |
| 5.5. | Manejo de la planta | 30 |
| 5.6. | Características de los sustratos evaluadas | 30 |
| 5.6.1. | Análisis físico | 30 |
| 5.6.1.1. | Densidad real | 30 |
| 5.6.1.2. | Retención de humedad..... | 31 |
| 5.6.1.3. | Densidad aparente y porosidad | 31 |
| 5.6.1.4. | Análisis granulométrico | 32 |
| 5.6.2. | Oxígeno disuelto en el sustrato | 33 |
| 5.7. | Características de la solución evaluadas | 34 |
| 5.7.1. | Oxígeno disuelto en la solución | 34 |
| 5.8. | Características de la planta evaluadas | 34 |
| 5.8.1. | Unidades calor | 34 |
| 5.8.2. | Altura de la planta | 35 |
| 5.8.3. | Diámetro de tallo | 35 |
| 5.8.4. | Liberación de electrolitos por la raíz | 35 |
| 5.8.4.1. | Liberación de electrolitos por la raíz en condiciones de invernadero | 36 |
| 5.8.4.2. | Liberación de electrolitos por la raíz en condiciones de estrés | 37 |
| 5.8.4.3. | Liberación de electrolitos en fragmentos de raíz, en condiciones de muerte celular por congelamiento con nitrógeno líquido | 38 |
| 5.8.5. | Producción..... | 39 |
| 5.8.6. | Análisis de los datos | 40 |
| VI. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 41 |
| 6.1. | Análisis físico de los sustratos | 41 |

| | | |
|---------------|---|-----------|
| 6.2. | Oxígeno en el sustrato | 42 |
| 6.3.2. | Variables evaluadas en la solución | 44 |
| 6.3.2.1. | Oxígeno en la solución..... | 44 |
| 6.3.3. | Variables evaluadas en la planta | 45 |
| 6.3.3.1. | Unidades Calor..... | 45 |
| 6.3.3.2. | Altura de las plantas..... | 47 |
| 6.3.3.3. | Diámetro de tallo..... | 48 |
| 6.3.3.4. | Producción..... | 48 |
| 6.3.4. | Características de la raíz | 51 |
| 6.3.4.1. | Liberación de electrolitos..... | 51 |
| 6.3.4.2. | Índice de daño a la raíz..... | 56 |
| VII. | CONCLUSIONES | 60 |
| VIII. | LITERATURA CITADA | 61 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Producción en toneladas de pimiento dulce tipo “Bell” en México durante los últimos seis años..... | 13 |
| Cuadro 2. Cantidad de fertilizante requerida para preparar 100 litros de solución concentrada de nitratos, sulfatos y fosfatos..... | 29 |
| Cuadro 3. Características del oxímetro Hanna | 33 |
| Cuadro 4. Temperaturas críticas para las etapas fenológicas del pimiento dulce tipo “Bell” | 35 |
| Cuadro 5. Clasificación por tamaños para el chile bell tipo Lamuyo (Valenzuela, 2005), | 39 |
| Cuadro 6. Resultados del análisis físico de los sustratos utilizados en los experimentos en invernadero..... | 41 |
| Cuadro 7. Diámetro medio de tallo de plantas de pimiento dulce tipo Bell crecidas en sustratos diferentes con granulometría gruesa y fina..... | 48 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. La endodermis de la raíz es un cilindro que contiene una línea de células delgadas denominadas banda de Caspari, a través de la cual ocurre el movimiento de nutrientes y oxígeno (Mauseth., 1998)..... | 3 |
| Figura 2. Zonas de diferenciación en el interior de la raíz. Los pelos radicales se forman sobre la zona de elongación y de la endodermis. Los primeros vasos vasculares aparecen al iniciar la formación de la raíz (Mauseth., 1998). | 3 |
| Figura 3. Corte transversal de raíz que muestra el gradiente de concentración de oxígeno: en el primer tramo, desde la epidermis hasta las bandas de Caspari, existe mayor concentración que en las partes restantes (Rodríguez, 1996). | 4 |
| Figura 4. Apariencia del cv. Red Maddona F1 utilizado en el presente estudio.... | 28 |
| Figura 5. Segmentación de las raíces para su análisis. | 36 |
| Figura 6. Conductímetro Horiba B-173 utilizado para la determinación de la conductividad eléctrica del medio de resuspensión. | 37 |
| Figura 7. Muestras de raíz de pimiento “Bell” sometidas a estrés por alta temperatura y humedad relativa. | 38 |
| Figura 8. Concentración de oxígeno en los sustratos utilizados para evaluar el efecto de la oxigenación en plantas de pimiento. Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa entre los tratamientos. Según la prueba de Tukey $\alpha = 0.05$ | 42 |
| Figura 9. Concentración de oxígeno en los sustratos que conformaron los tratamientos para la evaluación del efecto de la oxigenación en el crecimiento y fisiología de pimiento, (TcCA: Tezontle chico sin aireación, TcSA: Tezontle chico con aireación, TgCA: Tezontle grande con aireación, TgSA: Tezontle grande sin aireación, PcCA: Peat Moss® chico con aireación, PcSA: Peat Moss® chico con aireación, PgCA: Peat Moss® grande con aireación, PgSA: Peat Moss® grande sin aireación). Las líneas sobre las barras representan el error estándar..... | 43 |
| Figura 10. Concentración de oxígeno y temperaturas en la solución antes y después de la recirculación, durante el ciclo de cultivo. | 44 |
| Figura 11. Unidades calor requeridas por los distintos tratamientos para completar el ciclo del cultivo (TcSA; Tezontle 2–4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2–4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8mm con aireación). | 46 |
| Figura 12. Rendimiento para los tratamientos (TcSA; Tezontle 2–4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2–4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Las barras representan el error estándar. Letras iguales indican que no existe diferencia significativa, Tukey $\alpha = 0.05$ | 49 |

- Figura 13. Número de frutos por tamaño para cada uno de los tratamientos, (Tc; Tezontle 2–4 mm, Tg; Tezontle 6–8 mm, Pc Peat Moss® molido, Pg; Peat Moss® grande). Tamaños: Ch; Chico (< 10.16 cm), M; Mediano (11.43 cm), G; Grande (15.24 cm), R; Rezaga (< 6 cm ó con deformaciones). Letras diferentes indican que existe diferencia entre los sustratos, Tukey $\alpha = 0.05$ 50
- Figura 15. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 mm^2 de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar. 53
- Figura 16. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 mm^3 de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar. 54
- Figura 17. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 cm de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar. 55
- Figura 18. Determinación en 100 mg de tejido fresco del índice de daño (%) de las raíces de las plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía. con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. ((T1 ; tezontle 2-4mm con aire, T2 ; tezontle 2-4mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar. 57

APÉNDICES

| | |
|--|----|
| Apéndice 1: Nomenclatura de tratamientos..... | 66 |
| Apéndice 2: Calendario de muestreos realizados en el sustrato y la solución. | 66 |
| Apéndice 3: Calendario de muestreos..... | 66 |
| Apéndice 4: Cálculos del suministro y consumo de oxígeno en solución NFT a varias temperaturas en planta de tomate en floración del primer racimo | 67 |
| Apéndice 5: Porcentaje de unidades calor requeridas para completar el desarrollo vegetativo de los diferentes tratamientos (T1 ; tezontle 2-4mm con aire, T2 ; tezontle 2-4mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire)..... | 67 |
| Apéndice 6: Porcentaje de unidades calor requeridas para completar la etapa de floración de los diferentes tratamientos. (T1 ; tezontle 2-4mm con aire, T2 ; tezontle 2-4mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire)..... | 68 |
| Apéndice 7: Calendario de muestreos realizados en planta..... | 68 |
| Apéndice 8: Resultado de la prueba de medias para la variable altura de planta. | 69 |

RESUMEN

La pobre oxigenación del sistema radicular en hidroponía, raramente produce síntomas que se evidencien claramente en el cultivo, aunque sí produce disminución del rendimiento y calidad de la cosecha. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del enriquecimiento de oxígeno del medio en la raíz, mediante el control de la liberación de electrolitos. Se usaron tezontle y turba como sustratos, con granulometría gruesa (6-8 mm) y fina (0.5-2.5 mm) cada uno y con y sin aireación forzada del medio. La temperatura de la solución nutritiva aplicada a las plantas disminuyó con la aireación forzada y aumentó la concentración de oxígeno; así, en los sustratos con granulometría gruesa el oxígeno incrementó 6% respecto a aquellos que fueron regados con solución sin aireación, en cuanto a las unidades calor (UC) requeridas para completar cada una de las etapas de desarrollo las cuales se vieron modificadas notablemente por la disponibilidad de oxígeno en el medio radical ya que los resultados evidenciaron que las plantas acumularon menos UC cuando hubo aporte de oxígeno a la solución en combinación con sustrato de granulometría gruesa. La oxigenación de la solución favoreció ligeramente la altura de la planta, aunque las diferencias observadas no fueron significativas, las diferencias generadas por efecto del sustrato, tampoco resultaron estadísticamente significativas ($\alpha = 0.05$) y la altura de las plantas fue similar independientemente de la granulometría. El diámetro de tallo resultó ligeramente mayor en las plantas crecidas en los sustratos con solución nutritiva aireada (11.6 mm) en comparación con las que carecieron de esa condición (11.1 mm). Los diferentes sustratos y granulometrías influyeron en este parámetro del crecimiento, debido a que existieron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$); aquellos sustratos con menor granulometría resultaron con mayores diámetros del tallo. El tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento fue el de tezontle con partículas entre 6 y 8 mm de diámetro y aireación (TgCA), en contraste, el tratamiento que incluyó Peat Moss® con partícula grande (PgCA) y con aireación fue el que generó el menor rendimiento. El índice de daño mostró que la raíz en el Tezontle con granulometría gruesa y solución aireada presentó el menor índice de daño.

ABSTRACT

The poor oxygenation of the root system in hydroponics, rarely induce symptoms in the crop, although it causes a decrease of yield and quality of fruit. The objective of the present study was to evaluate damage to the root due to oxygen deficiency. Treatments derived from Tezontle and Peat Moss® substrates in coarse (6-8 mm) and fine (0.5-2.5 mm) diameter combined with and without external supply of oxygen by means of recycling the nutrient solution were evaluated. The temperature of solution decreased after it was aerated which increased oxygen concentration in the solution. Oxygen concentration in coarse substrates was 6% higher than that of fine substrates. Regarding heat units (HU) required to complete each one of the development stages these were modified notably since the oxygen availability in the root environment evidenced that plants accumulated less HU when there was external oxygen supply to the solution in combination with thick grain substrate. The oxygenation of the solution slightly improved plant height, although the observed differences were not significant, differences due to substrate, neither were statistically significant ($\alpha = 0.05$) and plant height among treatments was similar independently of substrate diameter. The stem diameter was lightly thicker in plants grown in substrates irrigated with aerated nutrient solution (11.6 mm) in comparison to those that lacked that condition (11.1 mm). The different substrates and substrate diameter influenced stem diameter ($\alpha = 0.05$); those substrates with smaller grain resulted in thicker stems. The treatment that obtained the highest yield corresponded to Tezontle with particles between 6 and 8 mm of diameter and aeration (TgCA), in contrast, the treatment that included Peat Moss® with coarse particles (PgCA) and with aeration was the one that generated the lowest yield. The root damage index indicated that the coarse Tezontle (6-8 mm diameter) with aeration showed the lowest root index damage.

I. INTRODUCCIÓN

El requerimiento de oxígeno (O_2) por las plantas se conoce desde la década de 1960 pero hasta que se desarrollaron los sistemas hidropónicos comerciales como la película nutritiva (NFT por sus siglas en inglés) y el uso de sustratos se iniciaron las observaciones detalladas del efecto del O_2 disuelto en la solución nutritiva en las plantas, el cual se provee a éstas junto con los nutrimentos y el agua (Morgan, 2001). Las raíces en un estado saludable, con un suministro adecuado de O_2 , desarrollan un control máximo de selectividad por los iones de la solución. La energía necesaria para este proceso es obtenida de la respiración radicular, la cual se inhibe cuando falta el O_2 (Jackson, 1980). La oxigenación limitada del sistema radicular en hidroponía, raramente produce síntomas que se evidencien claramente en el cultivo, aunque si produce una disminución del rendimiento y calidad de la cosecha (Morgan, 2001). La mayoría de las investigaciones evalúan la conductividad eléctrica (CE) y el pH, y pocas son las que incluyen evaluación de los niveles de O_2 disuelto en los sustratos (Caron *et al.*, 1999; Caron *et al.*, 2001).

Se ha demostrado que muchos cultivos comerciales pueden sobrevivir y, mas aun, producir en una solución con concentraciones de O_2 menores a las del aire que rodea las hojas. Cuando no se detecta O_2 en la zona radicular se dice que existe anoxia, y pocas especies soportan tales condiciones. Es importante reconocer los síntomas producidos por la anoxia en los sistemas de crecimiento hidropónico, donde con frecuencia los síntomas son confundidos con otras fisiopatías (Morgan, 2001).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el desarrollo de la raíz de pimiento en hidroponía, con la aplicación de O_2 a la solución mediante aireación forzada y, a la vez comparar la respuesta a dos sustratos, uno orgánico (Peat Moss[®]) y el otro mineral (tezontle) con dos granulometrías cada uno.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Anatomía de la raíz

Muchas plantas pueden absorber la humedad atmosférica en forma de niebla o rocío, pero la absorción de las raíces es la que aporta la mayor proporción de agua (Azcón–Bieto y Talón, 2000).

El agua que entra a la planta a través de las raíces sigue la siguiente ruta: pelo radical, células del cortex, endodermis y tejido conductor de agua y sales minerales, el xilema. Este tejido, que inicia en las partes diferenciadas de la raíz, conduce el agua desde las raíces hasta las partes más alejadas de la parte aérea. El xilema está asociado al floema, lo que permite el intercambio de compuestos entre ambos tejidos.

Las células que se hallan entre el xilema y el floema producen un cambium vascular en la región interna del xilema y externa del floema lo que resulta en el incremento del diámetro de la raíz (Salisbury y Ross, 1994). En la raíz el agua es absorbida intensamente por las células del periciclo ya que el potencial hídrico es menor que el de las células de la endodermis. En el periciclo el agua se transporta de forma similar que en el parénquima de los árboles maderables, en los que se genera un gradiente de potencial osmótico dentro de los vasos vasculares (Šebánek, 1992; Figuras 1 y 2).

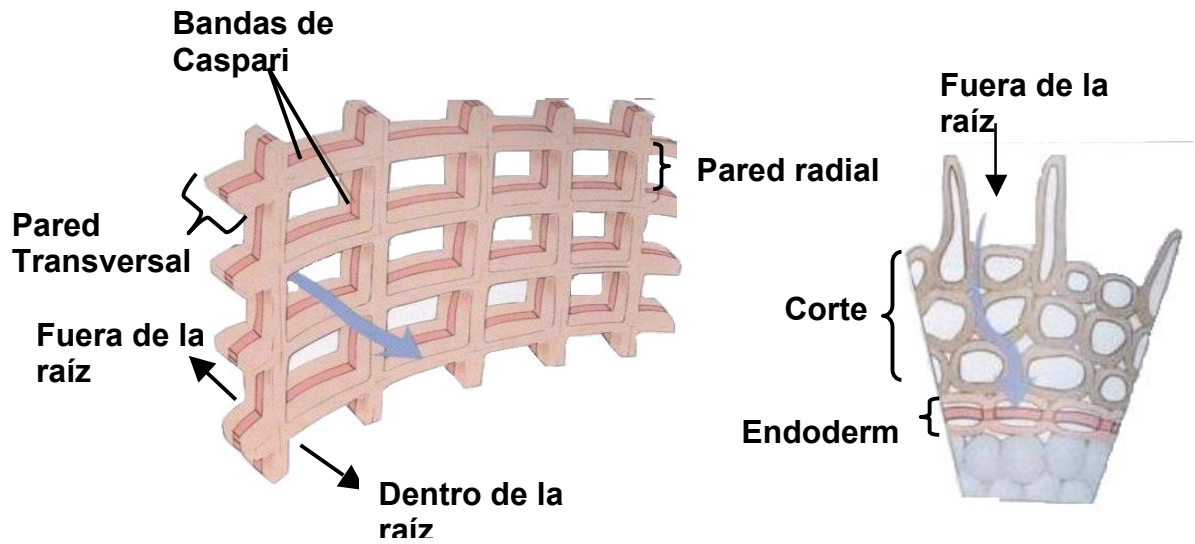


Figura 1. La endodermis de la raíz es un cilindro que contiene una línea de células delgadas denominadas banda de Caspari, a través de la cuales ocurre el movimiento de nutrimentos y oxígeno (Mauseth, 1998).

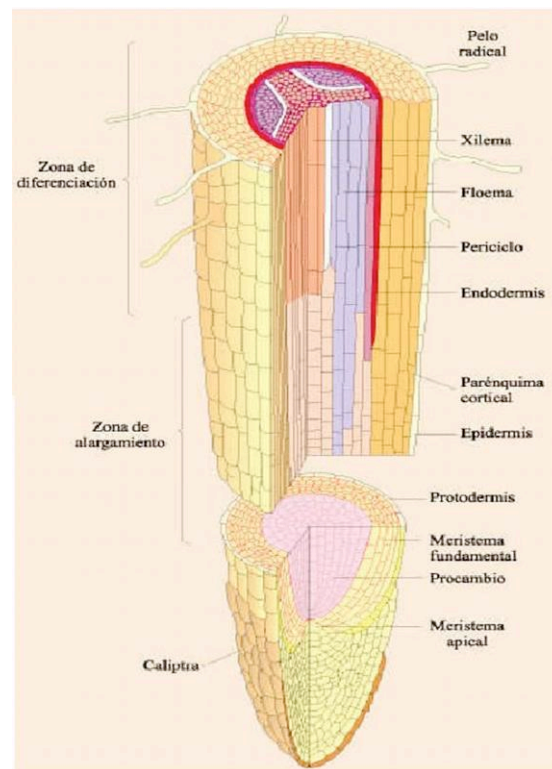


Figura 2. Zonas de diferenciación en el interior de la raíz. Los pelos radicales se forman sobre la zona de elongación y de la endodermis. Los primeros vasos vasculares aparecen al iniciar la formación de la raíz (Mauseth., 1998).

2.2. Respiración de la raíz

La inhibición de la respiración es rápida y ocurre cuando la concentración de O_2 está abajo de la $K_m [O_2]$ de la enzima citocromo-oxidasa ($K_m [O_2] = 14 \mu M$, equivalente a 0.013% de O_2), lo que indica que el sistema es sensible a la falta de O_2 , con la consecuente inhibición de la formación y el consumo de ATP. Adicionalmente, concentraciones bajas de O_2 conducen a la planta por un sendero específico de ahorro de energía derivada de la degradación de sacarosa, y reducen el consumo de O_2 que permite mejorar el rendimiento de la planta (Geingerberger, 2003).

El gasto de energía metabólica incluye un gasto por respiración, ya que la energía es obtenida a partir de la glucólisis, o consumo de algunos sustratos orgánicos, en este proceso se utiliza el oxígeno.

La absorción activa se favorece al generarse una mayor concentración de O_2 en la parte externa de la raíz (Figura 3) lo que produce la energía necesaria para el transporte de los iones, en la endodermis se encuentra una menor concentración de O_2 por lo que entonces existe una menor eficiencia en la actividad de transporte (Rodríguez, 1996).

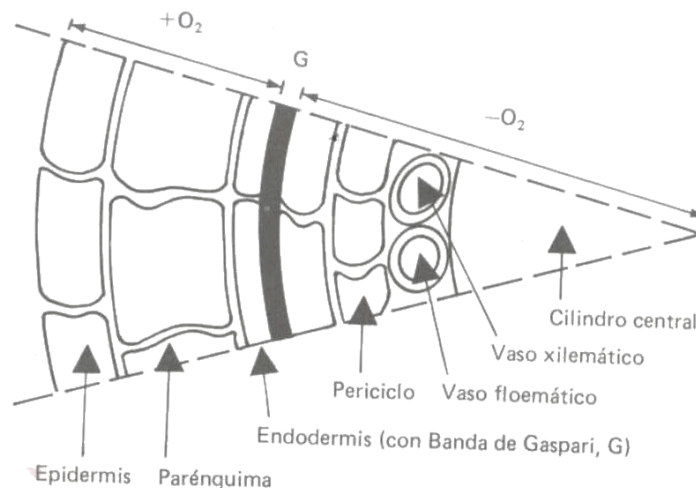


Figura 3. Corte transversal de raíz que muestra el gradiente de concentración de oxígeno: en el primer tramo, desde la epidermis hasta las bandas de Gaspari, existe mayor concentración que en las partes restantes (Rodríguez, 1996).

Existen diversos factores que pueden tener efecto en la determinación de la tasa respiratoria de las raíces, entre los más relevantes están: a) el contenido de humedad del suelo o del sustrato (disminuye con la concentración de O₂), b) la temperatura ambiente y del sustrato o suelo (a menor temperatura, menor tasa respiración) y c) la concentración de O₂ en el medio (la raíz tomará solo el O₂ necesario para realizar sus funciones independientemente de que el medio este saturado del mismo. De igual forma, la disponibilidad del O₂ en ciertas condiciones de crecimiento limitará la tasa respiratoria, y se verá reducida la respiración si el O₂ en el medio es insuficiente (Azcón–Bieto y Talón, 2000). La heterogeneidad en el ambiente de la raíz da como resultado un crecimiento diferenciado del sistema radical (Shumacher y Smucker, 1984).

2.3. Demanda de oxígeno de diferentes cultivos

Los requerimientos de O₂ y la habilidad de la planta para superar condiciones de anaerobiosis, dependen de la especie y del porte y etapa fenológica de la planta. Generalmente, plantas pequeñas como la lechuga requieren menor cantidad de O₂ que las grandes y con frutos (Morgan, 2001).

Existen mecanismos de adaptación a niveles bajos de O₂ en los tejidos que se encuentran con cierta frecuencia en hipoxia o anoxia, estos mecanismos pueden ser: a) la expansión de los espacios intracelulares para formar espacios aéreos en tejidos donde la difusión del O₂ pudiera ser limitante (estos aerenquimas absorben el O₂ del suelo o del aire y favorecen el intercambio gaseoso rápido y eficiente entre las células), b) la respiración a través de los tallos, como en las plantas que viven en terrenos inundados, en estos casos el intercambio gaseoso se realiza en la zona de conexión raíz-tallo (permeable al CO₂ y al O₂), c) formación de neumatóforos (raíces que crecen encima de la superficie del agua, captan el O₂ del aire y lo difunden a las raíces sumergidas (Azcón–Bieto y Talón, 2000).

Numerosos estudios en hidroponía ha demostrado que el O₂ puede ser un factor limitante (cuando se encuentra en cantidades inadecuadas) para el crecimiento normal de las plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) debido a que reduce la absorción de nutrientes y agua ; en contraste, no fue detectado como limitante para el crecimiento de la lechuga (Morgan, 2001), lo que indicó que este cultivo otros similares tienen una demanda menor de O₂.

Resultados obtenidos por Giserøld y Kempton (1983) indicaron que en un cultivo de pepino el O₂ de la solución hidropónica de las plantas en etapa reproductora se agotó antes que el de las plantas de tomate en etapa vegetativa.

2.4. Respuesta de las plantas a condiciones de anoxia

Las plantas en condiciones naturales pueden enfrentar condiciones con concentraciones de O₂ normales (normoxia) y deficientes (hipoxia) ó ambientes con ausencia total (anoxia). Muchos procesos metabólicos se ven afectados por deficiencias de O₂, pero en la mayor parte de los experimentos realizados los eventos como la hipoxia o anoxia se relacionan directamente con la respiración de la raíz y con el metabolismo del nitrógeno (Sousa, 2002). En condiciones normales, las raíces obtienen el O₂ que necesitan para la respiración mitocondrial directamente del suelo. El entorno radicular está en contacto con el O₂ del suelo a una presión equivalente a la atmosférica. Sin embargo, cuando el suelo se satura con agua, el intercambio de gases con la atmósfera queda restringido a su porción más superficial, lo que genera condiciones de anoxia (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

Los daños por carencia o escasez de O₂ en la zona radicular difieren en severidad entre las especies vegetales. La falta de O₂ reduce la permeabilidad de las raíces al agua y provoca acumulación de toxinas, y el agua y los minerales son absorbidos en cantidades insuficientes para el crecimiento (Taiz y Zeiger., 2002).

En condiciones de anoxia total, el crecimiento de la raíz se detiene totalmente en las plantas sensibles y la reacción es dependiente del tiempo de

permanencia en esas condiciones. Sí el tiempo es mayor a 4 horas, el ápice de la raíz muere, pero si el periodo de anoxia se prolonga más de 24 horas, el daño en la raíz es totalmente irreversible (Fallik *et al.*, 2003).

La falta de O₂ detiene la elongación y estimula la expansión radial de la base del vástago. A este proceso se le conoce como hipertrofia del tallo. Adicionalmente, la anoxia inhibe el ciclo de los ácidos tricarbóxicos y la respiración, y como consecuencia la producción de ATP, NAD⁺ y de NADP⁺ (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

Brisson *et al.* (2002) observaron en plantas de arroz de invierno que con la ausencia de O₂ en el perfil del suelo, la concentración de O₂ en la solución es aproximadamente 0.2 mol m⁻³ y cuando la presión del agua del suelo es positiva (presencia de agua en el suelo) la concentración de O₂ cae a concentraciones de 0.11 a 0.12 mol m⁻³. Los mismos autores señalaron la ausencia de significancia en la correlación entre el decremento del crecimiento de la raíz y la concentración de O₂ por debajo del umbral de 0.12 mol m⁻³, pero es significativa cuando la concentración de O₂ alcanza el valor de 0.05 mol m⁻³.

Shumacher y Smucker (1984) mencionaron que en plantas de fríjol sometidas a anoxia se redujo el área foliar y el volumen radical entre 6 y 30%, en comparación con las que fueron mantenidas con aireación.

Los resultados obtenidos por Smith *et al.* (1989) en plantas de kiwi (*Actinidia chinensis*) indican que el crecimiento de las raíces fue significativamente menor cuando se redujo la oxigenación y el crecimiento de las raíces fue inversamente proporcional al número de horas por día que la planta estuvo suministrado de O₂. Los mismos autores señalaron que una disminución de la oxigenación de las raíces resulta en una reducción rápida de la conductancia estomática de las plantas.

Zeroni y colaboradores (1983) encontraron que plantas de tomate cultivadas en agua y sometidas a diferentes gradientes de concentración de O₂ en la solución, presentaron un crecimiento vegetativo lineal cuando la concentración de O₂ fue superior al 50%, mientras que con concentraciones superiores a 60% el

crecimiento vegetativo fue exponencial. Además, señalaron que el rendimiento y calidad del fruto incrementaron con la concentración de O₂ en la solución.

2.5. Mecanismos de tolerancia a la anoxia

La adaptación de una planta a la anoxia siempre está relacionada con una crisis de energía en la misma planta. La tolerancia a la anoxia es fundamental en los cultivos para zonas inundadas como el arroz o en los cultivos hortícolas producidos en hidroponía (Gibbs y Greenway, 2003). De acuerdo con resultados obtenidos por los mismos autores, la anoxia puede ser consecuencia de una inundación del sistema radical de las plantas.

La tolerancia a la anoxia depende de numerosas condiciones ambientales, incluso el régimen de oxigenación antes de que la planta sea sometida a la anoxia. Greenway y Gibbs (2003) mencionan que la tolerancia se expresa temprano, usualmente cuando la planta sufre condiciones de pre-hipoxia, también conocida como estrés anóxico.

Para sobrevivir a una crisis de energía, las células de la planta reducen sus requerimientos de energía para su mantenimiento y limitan la cantidad de energía utilizada durante el catabolismo anaeróbico. Limitar el consumo de energía es crítico para sobrevivir (Fallik *et al.*, 2003). La anoxia en las plantas reduce la producción de energía entre 65 y 97% respecto a las bien aireadas (Gibbs y Greenway, 2003).

2.6. Oxigenación en diferentes tipos de sistemas hidropónicos

Existen diferentes factores que afectan el balance de O₂ en la solución nutritiva, como la actividad metabólica del sistema radical, el efecto de microorganismos y algas, la introducción deliberada de O₂ atmosférico y la tasa de difusión en la solución. El O₂ y otros gases son solubles en agua, aunque si ésta está saturada, solo una pequeña cantidad de O₂ estará disuelto en la

solución nutritiva (Morgan, 2001). El mismo autor señala que el agua sin nutrimentos está en equilibrio con el aire, con 9 a 10 mg L⁻¹ de O₂ disuelto a 20 °C, esta capacidad de solubilidad de oxígeno se reduce en presencia de sales, aunque en concentraciones equivalentes a una conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas entre 1 y 2 dS m⁻¹ no se tiene efecto importante ya que las reducciones van de 0.2 a 0.4%.

Las soluciones nutritivas suministran O₂ y agua a las plantas. Si el sistema radical está rodeado sólo por un flujo de aire, la oxigenación será plena debido a que la atmósfera contiene excelentes niveles del mismo, sin embargo las raíces también requieren agua, y esta es la barrera para la difusión de gases como el O₂, el CO₂ y el etileno, ya que estos gases se mueven a tasas hasta 12 000 veces menores en el agua que en el aire (Morgan, 2001).

2.6.1. Sistema hidropónico de película nutritiva

La técnica de la película nutritiva o NFT por sus siglas en inglés (Nutritive Film Technique) está diseñada de manera tal que pueda mantener una concentración elevada de O₂ en la solución. En este sistema se hace recircular la solución continuamente en los canales de cultivo, con lo que se aumenta la superficie de contacto con la atmósfera y se facilita la difusión del O₂ y la absorción del agua y O₂ por las raíces (Resh, 1987; Burrage, 1992).

2.6.2. Sistema holandés

En este sistema se dan cuatro ó mas riegos por día, la solución nutritiva es forzada a circular en caídas de cascada o bien se inyectan burbujas para enriquecerla con O₂, y, al aplicar el nuevo riego, la solución nutritiva aplicada sustituye a la anterior empobrecida de O₂ (Urrestarazu, 2000).

2.6.3. Técnica del flujo profundo

La técnica del flujo profundo (DFT por sus siglas en inglés) tiene los mismos principios del NFT pero difiere de él en que la solución se mantiene a cierta altura todo el tiempo y puede ser un sistema con o sin flujo. Las soluciones profundas deben contener mayor concentración de O₂ y este debe ser introducido manualmente ya que el sistema radicular se encuentra sumergido totalmente, con frecuencia se le inyecta aire a la solución mediante el burbujeo de la misma (Zeroni, 1983).

2.7. Generalidades del pimiento

América es considerada el centro de origen del chile (*Capsicum* spp.). Algunos autores han opinado que podría ser nativo de la India; sin embargo, las evidencias más abundantes indican que Perú y México cultivaron pimientos desde tiempos precolombinos. Posteriormente, fue difundido en el norte de EE.UU. y luego del descubrimiento de América fue transferido a Europa, Asia y al resto del mundo. Hungría es uno de los países que ha desarrollado abundantemente el pimiento, desde su introducción a mediados del siglo XVI; su desarrollo como un cultivo en gran escala se remonta a la época Napoleónica, y ha tenido una serie de altibajos, como la influencia de la 1ra y 2da guerra mundial (Nuez y Acosta, 1996).

En algunos países de América Latina, el chile picante es conocido con el nombre de ají, en Guatemala se le conoce como pimiento. La variedad de nombres ocasiona confusiones para su identificación. En relación con esto, debe señalarse que existe una variedad de chiles dulces denominados pimientos. En México a todas las especies del género *Capsicum* se les conoce como chile, independientemente de la especie botánica (Nuez y Acosta, 1996).

El chile se adapta a una amplitud altitudinal, desde el nivel del mar hasta los 2300 m de altitud, por lo que el cultivo puede ser afectado por diversos

factores agroecológicos que condicionan su producción y productividad (De Vilmorin, 1977).

2.7.1. Descripción botánica y taxonómica

El pimiento es una planta anual bajo cultivo, perenne en estado silvestre, consta de un tallo principal de crecimiento limitado y erecto. A partir de cierta altura emite dos o tres ramificaciones, dependiendo de la variedad y continua ramificándose de forma dicotómica hasta terminar su ciclo, la planta tiene hojas oblongas, lanceoladas o un poco anchas, terminadas en punta, que se van adelgazando en la base para formar un pecíolo más o menos alargado (De Vilmorin, 1977). Sus flores son blancas, solitarias, localizadas en la intersección de las hojas, y que forman frutos de formas variadas, de pared un poco carnosa, primeramente verdes, volviéndose rojos, amarillos o violeta oscuro al madurar, y que contienen semillas blancas, aplanadas, de una duración germinativa de cuatro años (Velasco, 2002). Su sistema radicular es pivotante y profundo (dependiendo de la profundidad y textura del suelo), con numerosas raíces adventicias que horizontalmente pueden alcanzar una longitud comprendida entre 50 cm y 1 m (Nuez y Acosta, 1996).

2.7.2. Requerimientos edafoclimáticos

El pimiento tiene requerimientos climáticos muy similares a los de la berenjena y el tomate, aun cuando los pimientos resisten temperaturas menores, este cultivo se produce mejor en un clima relativamente caluroso, en el que la temporada de crecimiento es larga y donde existe poco peligro de heladas (De Vilmorin, 1976).

De acuerdo con Mata (2001), el chile tiene un desarrollo óptimo o satisfactorio en suelos arenosos, francos o areno-arcillosos; pero no son recomendables suelos arcillosos pesados. El pH de 5.4 a 6.8 es el óptimo para

que el cultivo prospere adecuadamente, es decir, tiene una sensibilidad a la salinidad clasificada como media, debido a que soporta contenidos de 2,560 a 6,400 mg kg⁻¹ en la solución del suelo.

2.7.2.1. Temperatura

El chile es una planta termófila que requiere calor y humedad; su óptimo desarrollo es en los 25 °C (Domínguez, 1993). Su crecimiento esta en un rango de temperatura de 18 a 31 °C; debajo de los 13 °C su crecimiento y desarrollo se ve detenido y se observa un deterioro en la calidad de las yemas florales a una temperatura de 5 °C (Guenkov, 1974), así como con temperatura mayor a los 35 °C (Castaños, 1993). Según Cochran (1983) y Castaños (1993) la temperatura ideal es de 18.3 a 26 °C durante el día y de 15.5 a 18.3 °C durante la noche.

De Vilmorin (1976) menciona que la actividad del pimiento se detiene a una temperatura de 5 a 6 °C y, que aborta sus flores a temperaturas mayores a los 32 °C, además una temperatura mayor a los 27 °C causa malformaciones en los frutos y las temperaturas mayores de 35 °C bloquean el proceso de fructificación.

2.7.2.2. Luz

Bajo un fotoperíodo corto se adelanta la floración diez días en relación con uno largo y alta temperatura, esto principalmente en etapas tempranas y producción floral, en donde ocasionan la caída de un gran número de flores (Cochran, 1983).

2.7.2.3. Humedad relativa

La humedad relativa entre el 50 y 70% se considera óptima, mientras que una humedad el 95% se es alta y afecta la polinización, disminuyendo con esto el número de frutos, aunque el chile es cultivado en climas fríos. La humedad

relativa combinada con la temperatura afecta considerablemente la floración y cuajado de frutos (De Vilmorin, 1977).

2.7.3. Producción

México pasó de ser el quinto productor de chile en 1990 al segundo lugar en el año 2000, con una producción de 1, 813,252 Mg (Cuadro 1). Sin embargo, a pesar de esto, su producción se encuentra todavía muy por debajo de lo obtenido por China quien se mantiene en el primer lugar con el 42.3% de la producción mundial, mientras que México se encuentra desde hace 5 años en la segunda posición mundial con un 8.6% de la producción (www.mercanet.cnp.go.cr, 2005), manteniendo un crecimiento promedio anual de 10.51% por arriba de la tasa promedio mundial (FAOSTAT, 2005).

Cuadro 1. Producción en toneladas de pimiento dulce tipo “Bell” en México durante los últimos seis años.

| Año | Toneladas producidas | Ranking mundial | Fuente |
|------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 2000 | 1, 813,252 | 2 ^{do} (Después de China) | FAOSTAT (2004) |
| 2001 | 1,671,000 | 2 ^{do} (Después de China) | www.mercanet.cnp.go.cr (2005) |
| 2002 | 1,089.579 | 2 ^{do} (Después de China) | FAOSTAT (2004) |
| 2003 | 1.733.900 | 2 ^{do} (Después de China) | www.mexicocalidadsuprema.com (2006) |
| 2004 | 1,311,628 | 2 ^{do} (Después de China) | www.mexbest.com (2005) |
| 2005 | 1,925,023 | No reportado | www.mexbest.com (2006) |

2.8. Características de los sustratos

Existe un incremento notable en nivel mundial de la producción hortícola en sistemas protegidos, independientes del suelo, esto conlleva a la producción en sustratos, sobre todo en aquellos que estén al alcance del productor. En este contexto, el suelo y el agua también deben considerarse sustratos en el contexto de la hidroponía (Schnitzeler y Heuberger, 2001).

La evolución de los sustratos es paralela a la del cultivo sin suelo. Dos hechos claros que influyeron en la evolución del concepto de sustrato distinto del suelo natural. El primero fue el descubrimiento de que todas las plantas tienen los mismos requerimientos básicos, lo que llevó a la universalización de los sustratos. El segundo fue el darse cuenta de que el medio de cultivo solo proporciona soporte, humedad, aireación y nutrientes minerales, llevando, en consecuencia, a definir que no contenían suelo natural (Pastor, 1998).

Un sustrato es material sólido distinto del suelo (algunos autores consideran el suelo como sustrato), puede ser natural, sintético o producto (residuo de algún proceso de manufactura industrial), mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor ya sea puro ó mezclado, permite el anclaje del sistema radical de la planta y desempeña por tanto, ser el soporte de la planta, y puede o no proveerla de nutrientes (Urrestarazu, 2000). Las características que deben tomarse en cuenta para elegir el sustrato adecuado son:

2.8.1. Propiedades Físicas

Las propiedades físicas o características físicas vienen determinadas por la estructura interna de las partículas que forman el material, la distribución granulométrica y tipo de empaquetamiento (Pastor, 1998), dentro de los más importantes se pueden mencionar los siguientes:

2.8.1.1. Granulometría

Esta característica es la primera caracterización necesaria en un sustrato y se refiere a la proporción que guardan los diferentes tamaños de partículas que lo componen. Generalmente en los sustratos predominan las partículas con un diámetro superior a 0.05 mm, por lo tanto para realizar un análisis granulométrico es necesario es suficiente con solamente utilizar el método del tamizado (García, 1999).

Burés (1998) menciona que la variabilidad que ocurre con la granulometría de los sustratos, afecta todas sus propiedades físicas, por lo que antes de iniciar con cualquier determinación para caracterizar un sustrato primero se deben determinar sus características granulométricas.

De acuerdo con García (1999) tanto el número de tamices, como la abertura de la malla correspondiente pueden variar y el uso de éstos depende principalmente de las normativas de referencia y del tipo de sustrato que se trate. Asimismo, menciona que los resultados de los análisis practicados a los sustratos se deben presentar convencionalmente en términos de la proporción en peso de cada fracción respecto al peso fresco total de la muestra, además de indicar el intervalo granulométrico de que se trate.

Ansorena (1994), menciona que la clasificación por tamaño de partículas de los sustratos orgánicos es distinta a la que se utiliza en suelos minerales. En estos últimos las partículas menores a 2 mm suelen agruparse en diferentes fracciones que van desde arena gruesa hasta arcilla, pero en el caso de los sustratos inertes, y debido a que no existe un sistema de clasificación granulométrica de las diferentes fracciones que resultan del tamizado, se han adaptado tamices de acuerdo a la región de que se trate.

El tamaño de los gránulos o fibras condiciona el comportamiento del sustrato, ya que además de su densidad aparente varía su comportamiento hídrico a causa de su porosidad externa que aumenta el tamaño de poros conforme sea mayor la granulometría (Urrestarazu, 2000).

2.8.1.2. Porosidad

Es el volumen total del medio no ocupado por las partículas sólidas, y, por lo tanto lo estará por aire o agua en determinada proporción, normalmente se expresa como porcentaje respecto al volumen aparente y su valor óptimo no debe ser menor de 80–85%, aunque una menor porosidad suele ser utilizada para lograr mayores ventajas en determinadas condiciones (Urrestarazu, 1997).

Generalmente los sustratos tienen dos tipos de porosidad; interna y externa, la externa es la que se genera por el propio empaquetamiento de las partículas, la porosidad interna depende de la naturaleza de las partículas y puede estar abierta o cerrada (Pastor, 1998). La porosidad de un sustrato debe ser abierta, pues la porosidad ocluida, al no estar en contacto con el espacio abierto, no ocurre el intercambio de fluidos y por lo tanto no sirve como almacén para la raíz, y, la única ventaja que tendrá será el menor peso del sustrato (Terrés *et al.*, 2001).

El grosor de los poros condiciona la aireación y retención de agua de sustrato, los poros gruesos suponen una menor relación superficie/volumen, por lo que el equilibrio tensión superficial/fuerzas gravitacionales se reestablece cuando el poro queda solo parcialmente lleno de agua, formando con esta una película de grosor determinado (Urrestarazu, 2000).

La porosidad varía en un amplio intervalo, desde un 30% en suelos compactados hasta valores de 95% en algunas turbas, como promedio los buenos suelos de campo con hierba contiene aproximadamente un 50% de poros, mientras que los sustratos poseen una porosidad que puede alcanzar valores de hasta un 95% ó superiores, aunque se recomienda como mínimo un 85% (Ansorena, 1994).

La falta de acuerdo entre los diversos autores sobre una porosidad de aire óptima puede deberse a la dificultad para diferenciar tolerancia de las diversas plantas a bajos niveles de aireación, a los efectos de los diferentes manejos y

factores ambientales, así como en los métodos utilizados para la determinación de la porosidad (García, 1999).

2.8.1.3. Densidad

La densidad de un sustrato se puede referir bien a la del material sólido que lo compone y entonces se habla de densidad real, o bien la densidad calculada considerando el espacio poroso total ocupado por los componentes sólidos mas el espacio poroso y se le denomina entonces densidad aparente (Terrés *et al.*, 2001).

La densidad real es la relación entre la masa o peso de las partículas y el volumen real que éstas ocupan, puede o no considerar los poros internos de las partículas según el método que se utilice para su determinación dando valores distintos para la determinación picnométrica (Pastor, 1998). El mismo autor señala que se pueden utilizar picnómetros de aire para determinar la densidad real de los sustratos o bien ésta se puede calcular a partir del conocimiento de la densidad real de la materia orgánica y del material según sea el caso.

Los diferentes minerales presentan diversas densidades de partículas, pero por fines prácticos se puede asumir que pesan 2.65 g mL^{-1} . Aunque los materiales orgánicos tienen diferentes densidades, así que 1.55 g mL^{-1} sería un buen promedio a considerar (García, 1999).

El conocimiento de la densidad aparente es muy importante, no sólo porque permite calcular la porosidad, sino que además, proporciona por si mismo diversa información útil; cantidad de sólido contenido en un volumen de sustrato comprado a granel, preparación de mezclas, ejecución del análisis químico en base a volumen entre otros (Ansorena, 1994).

2.8.1.4. Capacidad de retención de agua

Para el óptimo crecimiento de las plantas en contenedor es necesario que la distribución de tamaños de poro sea la adecuada para que el sustrato retenga cantidades convenientes de agua y aire. Pero no es suficiente que la cantidad total de agua contenida en un medio de cultivo sea la necesaria para la planta, ya que puede ser retenida con una fuerza muy elevada, superior a la de succión que es capaz de ejercer la planta (Ansorena, 1994).

Lo que mas debe de interesar es la capacidad de retención de agua disponible (Ad), y, esta se define como la cantidad de agua retenida por el sustrato entre su capacidad de contenedor y el PMP (García, 1999). El valor de la Ad dependerá de la cantidad total de agua retenida por el sustrato y de la forma en que dicha agua se halla distribuida entre los poros (Ansorena, 1994).

Existen dos fuerzas que retienen el agua en los poros mas pequeños del sustrato, estas son; las capilares y las osmóticas, las fuerzas capilares son el resultado de la atracción del agua por las superficies, son tanto mayores cuanto menor es el diámetro de los poros como consecuencia de partícula menor (García, 1999).

2.8.1.5. Estructura

El sustrato puede ser granular o bien fibrilar, la primera no tiene forma estable, y se acopla fácilmente a la forma del contenedor, mientras que la segunda dependerá de las características de las fibras (Urrestarazu, 2000). Si éstas están cementadas, conservan su forma rígida, y no se adaptan al recipiente, pero tiene cierta facilidad de cambio de volumen y consistencia cuando son mojadas (Terrés *et al.*, 2001).

2.8.2. Características químicas

La reactividad química de un sustrato se define como la transferencia de materia desde el sustrato y solución nutritiva a la planta que alimenta a través de las raíces. Esta transferencia es recíproca entre sustrato y la solución nutritiva y puede ser debida a reacciones de distinta naturaleza (Terrés *et al.*, 2001).

2.8.2.1. Químicas

- Ⓢ Efectos fitotóxicos por liberación de iones H^+ e OH^- .
- Ⓢ Efectos carenciales debidos a la hidrólisis alcalina de algunos sustratos.
- Ⓢ Efectos osmóticos por un exceso de sales solubles.

2.8.2.2. Físico-químicas

Son reacciones de intercambio de iones, se dan en sustratos con contenidos de materia orgánica o de origen arcilloso.

2.8.2.3. Bioquímicas

Las propiedades bioquímicas están representadas por reacciones que producen biodegradación de los componentes del sustrato; por lo que suelen preferirse los sustratos inertes a los químicamente activos. La actividad química aporta a la solución nutritiva elementos adicionales por hidrólisis o disolución (Urrestarazu, 2000).

2.9. Tipos de sustratos

Existen diferentes criterios para la clasificación de los sustratos, basados en su origen, naturaleza, propiedades químicas, físicas y biológicas, entre otras.

2.9.1. Según sus propiedades

Según sus propiedades los sustratos se clasifican en inertes o activos:

➤ Sustratos químicamente inertes:

Arena granítica o silíceas, grava, roca volcánica, perlita, arcilla expandida, lana de roca, entre otros.

➤ Sustratos químicamente activos:

Turbas rubias y negras, corteza de pino, vermiculita, materiales ligno- celulósicos, entre otros.

Las diferencias entre inertes y activos se determinan por la capacidad de intercambio catiónico (CIC) o capacidad de almacenamiento de nutrientes (Urrestarazu, 2000).

2.9.2. Por el origen del material

2.9.2.1. Materiales orgánicos

- Ⓢ De origen natural. Se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica.
- Ⓢ De síntesis. Son polímeros orgánicos.
- Ⓢ Sub-productos y residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. Requieren de compostaje.

2.9.2.2. Materiales inorgánicos minerales

- Ⓢ De origen natural. Se obtienen a partir de rocas o minerales de diversos orígenes modificados sólo ligeramente.

- ⊕ Transformaciones. A partir de rocas ó minerales mediante tratamientos físicos con cierto nivel de complejidad.
- ⊕ Residuos y sub-productos industriales. Incluyen materiales de distintas actividades industriales (Urrestarazu, 2000).

2.9.3. Descripción de algunos sustratos

Los sustratos utilizados para los cultivos hidropónicos se clasifican como sustratos naturales y sustratos artificiales. A continuación se describen algunos de estos.

2.9.3.1. Sustratos naturales

2.9.3.1.1. Gravas

Las partículas de este sustrato poseen un diámetro de 5 a 15 mm, y entre estos destacan las gravas de cuarzo, la piedra pómez y todas aquellas que poseen menos de 10% de carbonato de calcio. Su densidad aparente es de 1.5 a 1.8 mg m⁻³. Poseen estabilidad estructural buena, capacidad de retención de agua baja y porosidad mayor a 40% de su volumen (Terrés *et al.*, 2001).

2.9.3.1.2. Arena

La arena que proporciona mejores resultados es la de río, la granulometría más adecuada está entre 0.5 y 2 mm de diámetro. Posee una densidad aparente similar a la de la grava. Su capacidad de retención de agua es media (20% del peso y más del 35% del volumen), con el tiempo y la compactación disminuye su capacidad de aireación y tiene CIC nula (Urrestarazu, 1997).

2.9.3.1.3. Turbas

Son materiales de origen vegetal con propiedades físicas y químicas variables según su origen. Éstas pueden clasificarse en turbas rubias y turbas negras. Las turbas rubias tienen mayor contenido de materia orgánica y están menos descompuestas, mientras que las turbas negras están mineralizadas y tienen, por tanto, un contenido mayor de materia orgánica (Terrés *et al.*, 2001).

2.9.3.1.4. Fibra de coco

Este sustrato se obtiene de la fibra presente en el fruto del cocotero. Esta fibra tiene capacidad de retención de agua de hasta 3 ó 4 veces su peso, un pH ligeramente ácido (6.3-6.5) y una densidad aparente de 200 kg m^{-3} , su porosidad es buena y se recomienda lavarla mediante inmersión en agua antes de sus uso ya que contiene iones sodio y cloro en concentraciones considerables que ocasionan daño a plántulas y transplantes (Urrestarazu, 2000).

2.9.3.2. Sustratos artificiales

2.9.3.2.1. Lana de roca

Es un material obtenido a partir de la fundición industrial a más de $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ de una mezcla de rocas basálticas, calcáreas y carbón de coque. A este material fundido se le da una estructura fibrosa, se prensa, endurece y corta en la forma deseada. La CIC es casi nula. La estructura es homogénea, posee un balance entre la capacidad de retención de agua y aireación, pero con el tiempo presenta degradación de su estructura, lo que representa una vida útil máxima de tres ciclos de cultivo (Urrestarazu, 2000).

2.9.3.2.2. Perlita

Material obtenido mediante un tratamiento térmico a unos 1000 – 1200 °C de rocas de sílice volcánica, del grupo de las riolitas. Se presenta en partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1.5 y 6 mm, con una densidad baja, posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad, la CIC es nula y la durabilidad está limitada por el tipo de cultivo (Terrés *et al.*, 2001).

2.9.3.2.3. Vermiculita

Se obtiene por la exfoliación de un tipo de micas sometido a temperaturas superiores a los 800 °C. Su densidad aparente es de 90 a 140 kg m⁻³, se presenta en escamas de 5 a 10 mm de longitud. Puede retener hasta 350 L m³ de agua y posee alta capacidad de aireación, aunque tiende a compactarse. La CIC de este sustrato es prácticamente nula (Terrés *et al.*, 2001).

2.10. Permeabilidad de la membrana celulares radicales

Las membranas son componentes esenciales de las células que permiten su autonomía respecto al medio en que se encuentran, así como la existencia de distintos compartimentos o regiones subcelulares en su interior (Revilla *et al.*, 2000). Las membranas han sido catalogadas como sitios de la respuesta a varios tipos de estrés ambiental durante mucho tiempo; sin embargo, solo recientemente ha sido estudiada la naturaleza de estas respuestas a nivel de membrana (Palta, 1990).

El transporte de la mayoría de los nutrientes y reguladores de crecimiento ocurre por el torrente de transpiración. La velocidad y la cantidad del agua que se mueve de la raíz al ápice de crecimiento, condicionan la cantidad y la concentración de sustancias que llegan a la zona de crecimiento. Comprender la

fuerza y la resistencia que controlan los movimientos del agua a través del continuo tierra-planta-aire y el cambio constante de señales químicas potenciales es esencial para comprender el impacto de las condiciones del suelo sobre el funcionamiento de la raíz y su interacción con los demás tejidos en crecimiento (Markhart y Smith, 1990).

De acuerdo con Markhart y Smith (1990), los sistemas radicales son el sitio limitante para el movimiento del agua desde el suelo a la hoja. Este hecho se demuestra fácilmente con plantas de tomate semi marchitas, con y sin sistema radical (extirpado manualmente) y colocadas en agua, la planta sin sistema radical recuperará la turgencia más rápidamente.

2.11. Conclusiones

México participa activamente en el mercado de las exportaciones de hortalizas en el nivel mundial, sus principales productos de exportación en este rubro son; el tomate, pepino y pimiento dulce tipo "Bell", en éste último pasó de ser el quinto productor en 1990 al segundo lugar en el 2000, y en esa posición se ha mantenido hasta la fecha, con un crecimiento promedio anual de 10.51%, superior a la tasa promedio mundial.

Varios estudios en hidroponía han demostrado que el O₂, que naturalmente se disuelve en el agua, es suficiente para el crecimiento normal de las plantas de tomate. Sin embargo, se carece de información para el cultivo de la lechuga y los pimientos dulces, y existe la posibilidad de que para la producción de estos cultivos también estén ocurriendo deficiencias de O₂ originadas en una posible demanda mayor de O₂.

Las soluciones nutritivas ofrecen O₂ y agua a las plantas, pero si el sistema radical está rodeado sólo por un flujo de aire, la oxigenación será plena debido a que la atmósfera contiene niveles adecuados del mismo. Sin embargo, las raíces también requieren agua, y esta es la barrera para la difusión de gases como el O₂, CO₂ y etileno, ya que estos gases se mueven hasta 12 000 veces más lento en

agua que en aire. Existen numerosos sistemas hidropónicos diseñados para aportar O_2 además de agua y nutrimentos como el sistema NFT, holandés y DFT.

Muchos factores pueden influir en la determinación de la tasa de respiración de las raíces, entre las más importantes están: a) el contenido de humedad del suelo o del sustrato, b) la temperatura ambiente y del sustrato o suelo y c) la concentración de O_2 en el medio. La heterogeneidad del ambiente radical da como resultado un crecimiento diferenciado del sistema radical de la planta.

Los requerimientos de O_2 y la habilidad de la planta para superar condiciones de anaerobiosis dependen de la especie, generalmente, plantas con porte pequeño, como la lechuga, requieren menor cantidad de O_2 que las plantas grandes y en fructificación, como los pimientos dulces o los tomates.

III. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General



Evaluar el comportamiento morfológico y fisiológico de la raíz, el crecimiento y producción del pimiento (*Capsicum annuum* L.) desarrollado en sustratos minerales y orgánicos, con y sin aireación de la solución nutritiva.

3.2. Objetivos Particulares



Estudiar el desarrollo del pimiento dulce tipo “Bell” (*Capsicum annuum* L.) en diferentes granulometrías de sustratos orgánicos y minerales.



Cuantificar el rendimiento del pimiento dulce tipo “Bell” (*Capsicum annuum* L.) en cada uno de los sustratos y granulometrías seleccionados.

IV. HIPÓTESIS

4.1. Hipótesis General



Las raíces de *Capsicum annuum* L. no son afectadas por el suministro adicional de O₂ en la solución nutritiva.



Hipótesis Específicas



El rendimiento del cultivo no es afectado por el suministro de aire en la solución nutritiva.



El rendimiento de *Capsicum annuum* no es afectado por el uso de sustratos de partículas de diferentes tamaños.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Material Vegetal

El material vegetal utilizado para el presente estudio fue el cv. Red Madonna F1 de HARRIS MORAN (Figura 4), el cual es un fruto clásico, del tipo lamuyo, con tres lóbulos, rojo oscuro, pared lisa y firme, y calidad para empaque de mediana a grande. El porte muestra una planta con capacidad de soporte amplio para la carga de la fruta.



Figura 4. Apariencia del cv. Red Maddona F1 utilizado en el presente estudio.

5.2. Localización y características del sitio experimental

5.2.1. Ubicación

El experimento fue establecido en un invernadero, vertitúnel de estructura metálica y polietileno semi-lechoso, del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, con localización geográfica en los 19° 29' latitud Norte y 98° 54' longitud Oeste y a una altura de 2240 msnm.

5.3. Establecimiento del cultivo

El cultivo se estableció en julio de 2004, por medio del transplante. Los sustratos se colocaron en bolsas de polietileno con capacidad de 10 kg, las cuales fueron utilizadas como contenedores, con una densidad de población de dos plantas por maceta, las bolsas se colocaron a 10 cm una de la otra y con una separación de 1.5 m entre hileras. Se utilizó un sistema de riego por goteo con un gasto de 2 L h⁻¹.

5.4. Aplicación del riego y nutrición del cultivo

Se prepararon 100 L de solución concentrada, que se utilizó después preparar 2500 L a partir de 22.5 L de la primera (solución A: nitrato de calcio y nitrato de potasio más 10 L de una solución B (sulfato de potasio, sulfato de magnesio y fosfato monopotásico; Cuadro 2). Los 2500 L se contuvieron en un tanque, se recircularon y posteriormente fueron utilizados para el riego, el cual fue aplicado uniformemente en todos los tratamientos y, el volumen del mismo fue definido de acuerdo a la evapotranspiración de la planta. Se utilizó la solución universal Steiner (1966 y 1984) (Cuadro 2) en todos los tratamientos del experimento. El enriquecimiento de O₂ fue el factor de estudio.

Cuadro 2. Cantidad de fertilizante requerida para preparar 100 litros de solución concentrada de nitratos, sulfatos y fosfatos.

| Solución | Sal fertilizante | Fórmula química | Cantidad (kg) |
|----------|----------------------|--------------------------------------|---------------|
| A | Nitrato de calcio | CaNO ₃ ·4H ₂ O | 13.1 |
| | Nitrato de potasio | KNO ₃ | 3.82 |
| B | Sulfato de potasio | K ₂ SO ₄ | 7.68 |
| | Sulfato de magnesio | MgSO ₄ ·7H ₂ O | 13.6 |
| | Fosfato monopotásico | K ₂ HPO ₄ | 3.77 |

5.4.1. Aporte de O₂ a la solución nutritiva

La solución nutritiva utilizada fue recirculada por espacio de 40 minutos antes de cada riego para asegurar el suministro de O₂ al concluir la recirculación se regó normalmente, según las necesidades del cultivo.

5.5. Manejo de la planta

La planta se mantuvo con dos tallos a partir de la primera bifurcación mediante poda, después se eliminaron los brotes y se dejó únicamente un fruto por bifurcación. Tanto el raleo como el deshoje y la poda fueron realizados aproximadamente una vez por semana en dependencia del desarrollo de la planta y hasta los 135 días después del transplante.

5.6. Características de los sustratos evaluadas

5.6.1. Análisis físico

Se determinó el espacio poroso total (EPT), densidad real (Dr), densidad aparente (Da), curva de retención de humedad y un análisis granulométrico a los sustratos. Las determinaciones se realizaron por duplicado y se utilizó la metodología descrita por Ansorena (1994).

5.6.1.1. Densidad real

Se pesó un matraz aforado de 100 mL (Pm), se añadió una cantidad de sustrato secado a 105 °C y se pesó nuevamente (Ps). Se añadió agua destilada y hervida hasta la mitad del volumen del matraz. Se dejó reposar durante 24 h y se expulsó el aire haciendo hervir el contenido del matraz durante algunos minutos con una agitación suave. El matraz se pesó y se llenó con agua destilada hervida

previamente y enfriada a 20 °C. Se llenó hasta la mitad con agua destilada, se colocó en baño termostático a 20 °C. Después de retirar del baño, se secó el exterior del matraz y se pesó (Pa). El valor de la densidad real del sustrato se obtuvo con la siguiente igualdad;

$$Dr = Da (Ps - Pm) / (Ps - Pm) - (Psa - Pa)$$

Donde:

Dr = densidad real (mg / cm³)

Pa = densidad del agua a 20 °C

5.6.1.2. Retención de humedad

Para obtener la curva de liberación de agua de los sustratos se aplicó la técnica descrita por De Boodt *et al.* (1974), la cual se basa en establecer tensiones a los sustratos situados en embudos de Haines mediante un sistema de vasos comunicantes.

5.6.1.3. Densidad aparente y porosidad

Se utilizaron macetas de tipo comercial de 1.5 L de capacidad, se pesaron y llenaron hasta el borde a intervalos de 100 mL con el sustrato secado a peso constante a 105 °C. Se aplicó un peso de 650 g por tres minutos sobre el sustrato para facilitar el proceso de compactación, y se agregó más sustrato cuando el volumen se redujo naturalmente. Una vez llenas las macetas se pesaron nuevamente y se cubrieron en el extremo superior con un fragmento de polietileno, sujetado con una banda elástica. Las cubetas fueron colocadas en bandejas de polietileno a la cual se le fue agregando agua a intervalos de media hora para que penetrara lentamente por los orificios del fondo de la maceta, esto con el fin de humedecer el sustrato por capilaridad, y se agregó agua hasta que el

nivel coincidió con el del sustrato dentro de la maceta. Una vez saturados los sustratos, las macetas fueron retiradas del agua para permitir el drenaje; así, el volumen tomado fue equivalente al volumen utilizado en invernaderos comerciales.

El procedimiento se realizó por triplicado y, después de la última saturación se mantuvieron las macetas dentro del agua y, se evitó el drenaje de las macetas colocando un tapón de goma en los orificios, y se secó la maceta por el exterior. Las macetas fueron colocadas sobre un embudo y se destaparon los orificios para que el agua se drenara por espacio de 30 minutos sobre el recolector. Al final del procedimiento se midió el agua colectada y la densidad aparente se calculó con la siguiente igualdad:

$$D_a \text{ (kg L}^{-1}\text{)} = (P_2 - P_1) / V$$

Donde:

P2 = peso de la maceta + peso del sustrato (kg)

P1 = peso de la maceta (kg)

V = volumen del sustrato (L)

La porosidad se calculó la siguiente igualdad:

$$P_a \text{ (\%)} = 100 V_1 / V_2$$

Donde:

V1 = volumen del agua colectado (mL)

V2 = volumen del sustrato (mL)

5.6.1.4. Análisis granulométrico

Se pasaron 100 g de sustrato, secado al aire, por tamices de 4.76, 3.36, 2, 1, 0.5 y 0.25 mm en una tamizadora, durante 10 minutos a máxima velocidad, posteriormente se pesó el contenido de cada tamiz y del colector en el fondo.

5.6.2. Oxígeno disuelto en el sustrato

La cuantificación del oxígeno retenido en los sustratos se determinaron con un oxímetro (Cuadro 3), en cada maceta, después de cada riego, durante tres meses, al inicio cada tercer día y a partir de los 4 meses del establecimiento del cultivo se tomó la lectura semanalmente hasta el final del ciclo del cultivo.

Cuadro 3. Características del oxímetro Hanna.

| | | |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Rango | Mg O ₂ L ⁻¹ | 0.00 a 19.99 |
| | % de saturación de O ₂ | 0.00 a 100 |
| | °C | 0 a 50 |
| Precisión (a 20 °C) | Mg O ₂ L ⁻¹ | ± 1.5 % f. Escala |
| | % de saturación de O ₂ | ± 1.5 % f. Escala |
| | °C | ± 0.5 |
| Calibración | Automática en aire saturado al 100% | |
| Compensación de temperatura | Automática de 0 a 50 °C | |
| Compensación de altitud | 0 a 1900 m resolución de 100 m | |
| Compensación de salinidad | 0 a 40 g L ⁻¹ resolución 1 g L ⁻¹ | |
| Sonda | HI 76407/4 sonda O.D. polarográfica | |
| Alimentación | 4 x 1.5V AAA pilas / Aprox. 200 Autoapagado después de 4 horas. Alimentación para 12VDC | |

5.7. Características de la solución evaluadas

5.7.1. Oxígeno disuelto en la solución

La concentración de O₂ (mg L⁻¹) fue determinada con el oxímetro, descrito en el Cuadro 3, cada tercer día antes y después de la recirculación.

5.8. Características de la planta evaluadas

5.8.1. Unidades calor

Se tomaron las lecturas de temperaturas máxima y mínima diarias para calcular las unidades calor a la floración, fructificación y madurez del fruto, las unidades calor (también conocidas como grados-día de desarrollo; GDD) necesarias para cada una de las etapas fenológicas anteriores se calcularon multiplicando la diferencia de la temperatura media menos el punto crítico para los diferentes periodos multiplicada por el número de días al suceso (Ortiz-Solorio, 1987):

$$UC = ((T \text{ max.} + T \text{ min.}) / 2] - PC) * D$$

Donde:

UC= unidades calor

T máx.= temperatura máxima

T min.= temperatura mínima

PC= punto crítico y

D= número de días al suceso.

En el Cuadro 4 se muestran las temperaturas requeridas ó punto crítico (PC) del cultivo del pimiento.

Cuadro 4. Temperaturas críticas para las etapas fenológicas del pimiento dulce tipo “Bell”.

| Fase del cultivo | Temperatura (°C) | | |
|----------------------------|----------------------------------|--------|--------|
| | Óptima | Mínima | Máxima |
| Germinación | 20 - 25 20 – 25 (día) | 13 | 40 |
| Crecimiento vegetativo | 16 – 18 (noche) 26 – 28 (día) | 15 | 32 |
| Floración y fructificación | 18 – 20 (noche) | 18 | 35 |

5.8.2. Altura de la planta

La altura se cuantificó cada 15 días, para lo cual se marcó y midió un tallo de cada planta, a partir del trasplante. Para esta determinación se utilizó un flexómetro colocado en la base del tallo principal y extendiéndolo hasta el ápice de crecimiento.

5.8.3. Diámetro de tallo

El diámetro del tallo se tomó en la base del tallo, aproximadamente a 3 cm de la superficie del sustrato, las lecturas fueron tomadas cada quince días a partir del trasplante con un vernier digital.

5.8.4. Liberación de electrolitos por la raíz

La integridad de las membranas se cuantificó indirectamente mediante los cambios en la conductividad eléctrica (CE) del medio de resuspensión de las raíces para lo cual se llevaron a cabo muestreos destructivos de estas al final del ciclo del cultivo. Mediante ensayos preliminares se definieron las proporciones de tejido:agua y tiempos de evaluación para cuantificar la máxima liberación de electrolitos por la raíz. Las condiciones seleccionadas fueron: 1) muestras

provenientes directamente del invernadero, 2) muestras mantenidas a altas temperaturas y humedad relativa durante 24 h y 3) muestras congeladas. Estas dos últimas condiciones se utilizaron para obtener el índice de daño.

El procedimiento para la determinación de la liberación de electrolitos consistió en sacar la planta de la maceta (una cada vez para minimizar el daño por deshidratación), y cubrirla con una bolsa negra para protegerla del ambiente; una vez en el laboratorio, las raíces fueron cuidadosamente lavadas con agua corriente y después con agua destilada; fueron seleccionadas las tres raíces más gruesas, segmentadas en fragmentos de 2 cm, medidos inicialmente en forma aproximada con una regla (Figura 5) y enseguida, con precisión, con un vernier digital. Se obtuvieron 12 segmentos por tratamiento y repetición, de ellos se utilizaron tres para el registro de materia seca, y tres para cada una de las de las condiciones seleccionadas para la cuantificación de la liberación de electrolitos.



Figura 5. Segmentación de las raíces para su análisis.

5.8.4.1. Liberación de electrolitos por la raíz en condiciones de invernadero

Los trozos de la raíz se lavaron con agua destilada durante 1 min para eliminar los residuos de sustrato, se colocaron en vasos de polivinilo, de 100 mL,

con 50 mL de agua desionizada y se mantuvieron con agitación ligera y constante a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), durante 1 ½ h. La CE y el pH del medio de resuspensión se determinaron cada 30 min durante 1 ½ h, en 100 µL del medio y con un conductímetro (Horiba B-173) (Figura 6). La CE, dependiente de la liberación de electrolitos por la raíz, fue expresada por unidad de peso (mg), volumen (mm^3), longitud (cm) y área (cm^2) de la raíz.



Figura 6. Conductímetro Horiba B-173 utilizado para la determinación de la conductividad eléctrica del medio de resuspensión.

5.8.4.2. Liberación de electrolitos por la raíz en condiciones de estrés

Los segmentos de raíz medidos y pesados se sujetaron con un segmento de hilo de cáñamo, a la boca de un frasco con 20 mL de agua, de tal manera que el segmento no tocara el agua, el procedimiento se realizó por triplicado y se colocaron los frascos en una germinadora a temperatura constante de 37 °C, durante 24 h (Figura 7), posteriormente, los segmentos fueron retirados y se realizó el procedimiento anterior para determinar la CE del medio de resuspensión.



Figura 7. Muestras de raíz de pimiento “Bell” sometidas a estrés por alta temperatura y humedad relativa.

5.8.4.3. Liberación de electrolitos en fragmentos de raíz, en condiciones de muerte celular por congelamiento con nitrógeno líquido

Cuando se tuvieron preparados los segmentos de la raíz se envolvieron en papel aluminio al cual se le hicieron pequeñas perforaciones y se colocaron en un matraz Erlenmeyer, en tanto se recababan las muestras restantes, las que ya habían sido procesadas se colocaron en un congelador, a -30°C , una vez que estuvo listo el total de las muestras fueron colocadas en el liofilizador por 72 h para su deshidratación. Después de la liofilización se determinó la biomasa de los segmentos.

Otro grupo de muestras congeladas por inmersión en nitrógeno líquido se utilizaron para cuantificar la CE del medio. Esta lectura tomada como la máxima liberación de electrolitos por la raíz.

El índice de daño fue calculado con el método descrito por Prášil y Zámečník (1998), el cual se basa en la hipótesis de que la cantidad de electrolitos liberados es directamente proporcional al daño ocurrido en las membranas de los tejidos al ser sometidos a una condición inductora de estrés, en este caso contenido de O_2 tanto en el sustrato como en la solución. El cálculo se realiza con siguiente igualdad:

$$Id (\%) = ((Rt-Ro) / (Rf-Ro)) \times 100$$

Donde:

Id= índice de daño

Rt= conductividad eléctrica de las muestras en los tratamientos 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8.

Ro= conductividad eléctrica del tratamiento 4 (Tezontle de 6 a 8 mm sin aireación) dado a que es el más comúnmente usado comercialmente, y

Rf= conductividad eléctrica de la muestra congelada en N líquido.

5.8.5. Producción

Para cuantificar la producción se los frutos con una madurez del 75 al 80% fueron cosechados. Los frutos fueron clasificados de acuerdo con los tamaños incluidos en una tabla de calibres de empaque proporcionada por la casa Semillera (www.harrismoran.com) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clasificación por tamaños para el chile bell tipo Lamuyo (Valenzuela, 2005).

| Clasificación | Tamaño (cm) |
|---------------|-------------------------|
| Super | > 22.86 |
| Extragrande | 19.05 |
| Grande | 15.24 |
| Mediano | 11.43 |
| Chico | <10.16 |
| Rezaga | < 6 ó con deformaciones |

Después de realizar la clasificación con la guía del Cuadro 5 los frutos se separaron en dos grupos, calidad nacional y calidad de exportación (de acuerdo

con los criterios utilizados por los empaques del Valle de Culiacán*) para esta clasificación se tomaron en cuenta defectos, como deformidad, daño por quemaduras de sol, frutos galleta, frutos asoleados, frutos dañados por virosis, frutos dañados por bacterias, frutos suficientemente pequeños para quedar en alguna clasificación, en un total de seis cortes y los resultados fueron expresados en t ha⁻¹.

5.8.6. Análisis de los datos

Se utilizó el Sistema de Análisis Estadístico SAS (SAS, 1999-2000) para aplicar la prueba de Tukey y el procedimiento GLM de SAS para cada una de las variables que fueron evaluadas.

* Comunicación personal del M.C, Rubén Sánchez, jefe de fertirriego del Proyecto Altata, de la Compañía agrícola; Del Campo y Asociados, en Culiacán, Sinaloa.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se presentan en dos grupos, uno corresponde a las evaluaciones realizadas en el laboratorio, e incluye los resultados del análisis físico y granulométrico de los sustratos, previo a su utilización en el invernadero. El segundo grupo incluye los resultados referentes al crecimiento y fisiología de las plantas y específicamente de las raíces.

6.1. Análisis físico de los sustratos

Los resultados obtenidos en la caracterización física de los sustratos se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados del análisis físico de los sustratos utilizados en los experimentos en invernadero.

| Sustrato | Densidad real (g cm ⁻³) | Densidad aparente (g m ⁻³) | Porosidad (%) |
|--------------------|--|---|------------------|
| Tezontle 2 – 4mm | 2.76 | 1.73 | 37 |
| Tezontle 6 – 8mm | 3.21 | 2.12 | 55 |
| Peat-Moss® Natural | 1.56 | 0.11 | 93 |
| Peat-Moss® Molido | 2.12 | 0.49 | 85 |

Los resultados de las propiedades físicas de los sustratos fueron utilizados para seleccionar los tiempos, cantidades y volúmenes de riegos para los tratamientos, en combinación con la temperatura, evapotranspiración y etapa fenológica del cultivo.

6.2. Oxígeno en el sustrato

De acuerdo con la prueba de comparación de medias (Tukey ($\alpha = 0.05$)) en los tratamientos con tezontle de granulometría fina (2 a 4 mm) así como en el Peat Moss® de granulometría gruesa existieron diferencias estadísticas significativas en el O₂ retenido, mientras que el Peat Moss® con granulometría fina y el tezontle grueso (6 – 8 mm) si se observaron diferencias en contenido de O₂ del sustrato (Figura 8).

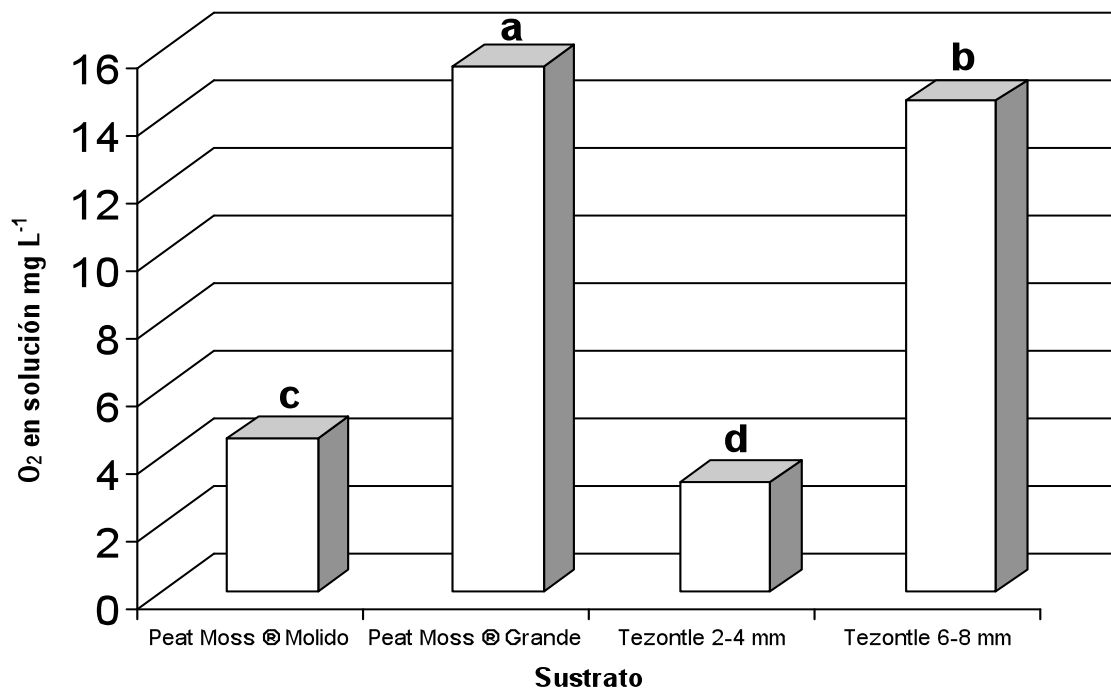


Figura 8. Concentración de oxígeno en los sustratos utilizados para evaluar el efecto de la oxigenación en plantas de pimiento. Letras diferentes indican la existencia de diferencia significativa entre los tratamientos. Según la prueba de Tukey $\alpha = 0.05$.

De acuerdo con la figura 9 la concentración de O₂ en cada uno de los sustratos presentó diferencias para cada uno con y sin aireación, teniendo las mayores concentraciones aquellos que tienen granulometrías grandes y dentro de éstos los que fueron sometidos a aireación forzada, acorde con la misma figura,

fuel tezontle de granulometría gruesa con y sin aireación los que presentaron mayor concentración de O₂.

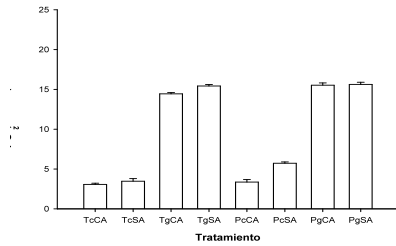


Figura 9. Concentración de oxígeno en los sustratos que conformaron los tratamientos para la evaluación del efecto de la oxigenación en el crecimiento y fisiología de pimiento, (TcCA: Tezontle chico sin aireación, TcSA: Tezontle chico con aireación, TgCA: Tezontle grande con aireación, TgSA: Tezontle grande sin aireación, PcCA: Peat Moss® chico con aireación, PcSA: Peat Moss® chico con aireación, PgCA: Peat Moss® grande con aireación, PgSA: Peat Moss® grande sin aireación). Las líneas sobre las barras representan el error estándar.

La falta de O₂ reduce la permeabilidad de las raíces al agua y habrá acumulación de toxinas; así el agua y los minerales serán absorbidos en cantidades insuficientes para el crecimiento; así, la planta se mantendrá en condiciones de estrés. El primer síntoma que se presenta como resultado de una oxigenación pobre es el marchitamiento de la planta durante las horas con mayor luminosidad y temperatura (Morgan, 2001).

6.3.2. Variables evaluadas en la solución

6.3.2.1. Oxígeno en la solución

La concentración de O₂ en la solución varió con la temperatura ambiente; a mayor temperatura, menor concentración de O₂ en la solución (Figura 10). La concentración de O₂ en la solución, la temperatura de ésta, antes y después de la recirculación, también afectaron la concentración final de O₂ en la solución.

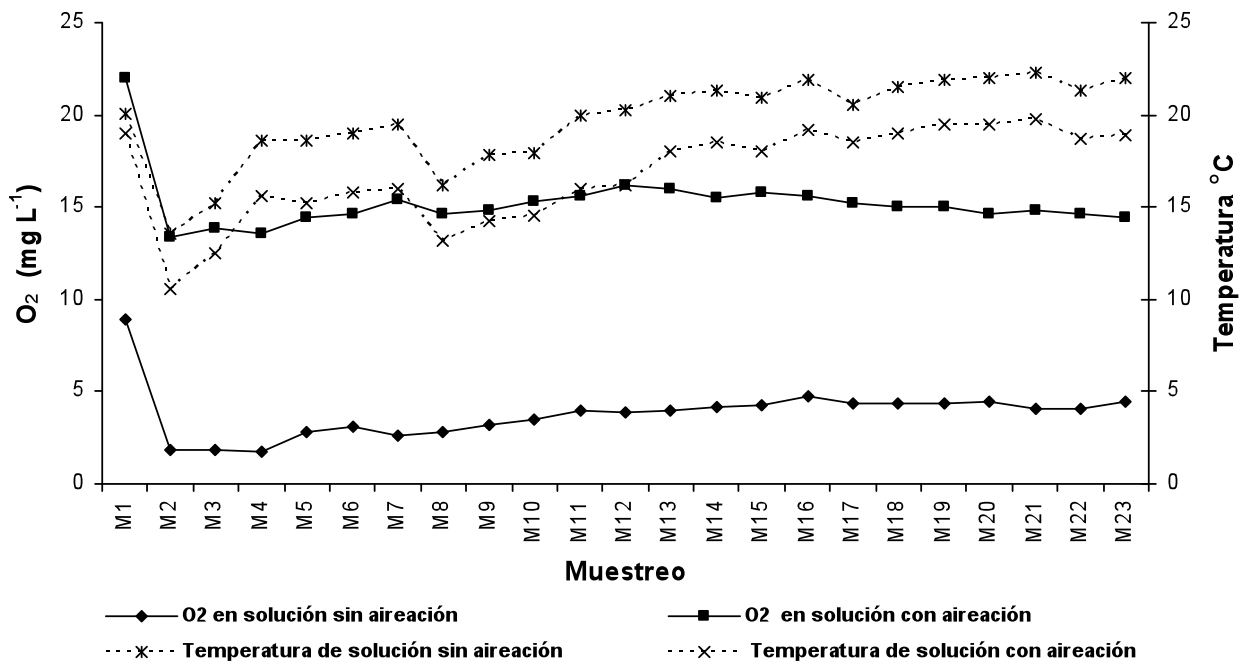


Figura 10. Concentración de oxígeno y temperaturas en la solución antes y después de la recirculación, durante el ciclo de cultivo.

Después de recircular la solución, disminuyó su temperatura media 3 °C. Así, debería facilitarse la absorción de los iones y la difusión del O₂, incorporado y/o enriquecido durante la misma recirculación (Jackson, 1980, Morgan, 2001). En el presente estudio se comprobó que la disponibilidad y transporte del O₂ están directamente relacionados con la temperatura, pues la cantidad máxima

disponible en una solución nutritiva disminuye con el aumento de la temperatura, mientras que el efecto contrario ocurre con la capacidad de difusión del mismo (Urrestarazu, 2000, Morgan, 2001; Apéndice 4).

La absorción de agua y nutrimentos por la raíz de las plantas depende, entre otros factores, de la temperatura de la solución nutritiva y del entorno radical. La absorción de nutrimentos disminuye cuando la temperatura alrededor de la raíz decrece a 12 °C o menos, así mismo, la absorción de agua y nutrimentos es estimulada con temperaturas por arriba de los 20 °C; aunque la temperatura óptima de la raíz y su entorno es de 28 °C (Daskalaki y Burrage, 1998).

6.3.3. Variables evaluadas en la planta

6.3.3.1. Unidades Calor

El tratamiento de tezontle con granulometría gruesa (6 a 8 mm) y aireación acumuló menos unidades calor (UC, 3,202 °C días) al completar el desarrollo vegetativo, respecto al resto de los tratamientos (Figura 11; Apéndice 5), mientras que los tratamientos que acumularon la mayor cantidad de UC fueron los tratamientos de Peat Moss® de granulometría fina y con aireación (6) y de granulometría gruesa sin aireación (7) con 19758 y 14704 UC respectivamente.

Así, es posible indicar que las UC acumuladas para completar la etapa vegetativa entre los tratamiento evaluados en la presente fueron notablemente modificadas por la disponibilidad de oxígeno en el medio radical (Figura 11).

Algo similar, al efecto de la disponibilidad de oxígeno en la acumulación de UC para el desarrollo vegetativo sucedió para alcanzar la floración. Se cuantificaron diferencias notablemente amplias entre las UC acumuladas por los tratamientos (Apéndice 6, Figura 11).

Los resultados evidenciaron que las plantas acumularon menos UC cuando hubo aporte de oxígeno a la solución y el sustrato contenía granulometría gruesa. Esto demuestra que la raíz en esas condiciones localiza los espacios necesarios para desarrollarse adecuadamente y mejora la absorción de nutrientes, lo que da como resultado un mejor porte y desarrollo de la planta, seguramente redundarán en una cosecha abundante de frutos de buena calidad (Figura 11).

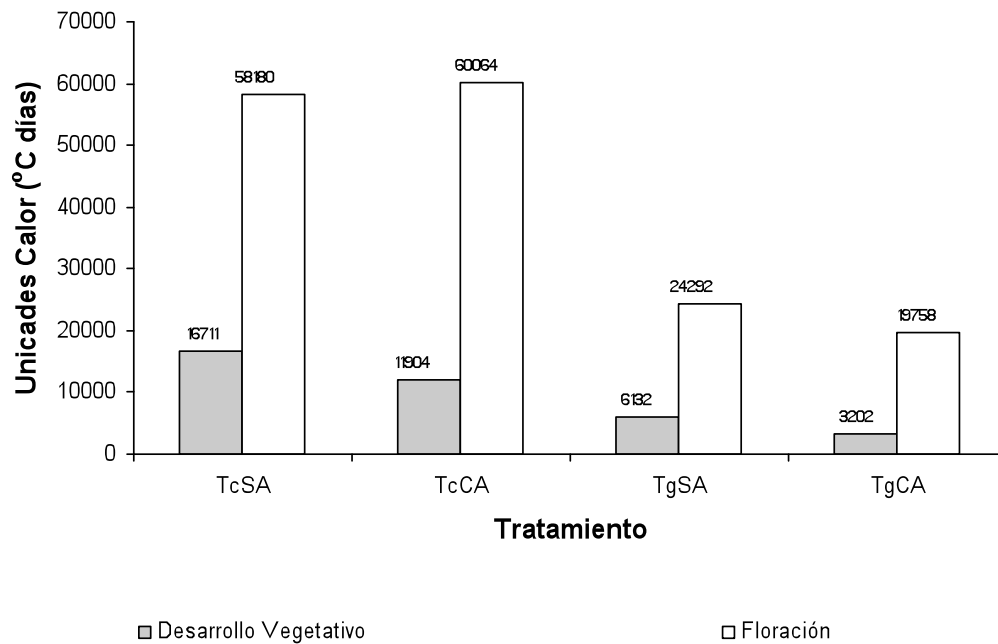


Figura 11. Unidades calor requeridas por los distintos tratamientos para completar el ciclo del cultivo (TcSA; Tezontle 2–4 mm, sin aireación; TcCA; Tezontle 2–4 mm con aireación; TgSA; Tezontle 6–8 mm, sin aireación; TgCA; Tezontle 6–8 mm con aireación).

Uno de los factores abióticos con mayor impacto en la tasa respiratoria es la temperatura. Independientemente de la tasa absoluta de respiración, los incrementos de la temperatura generan caídas exponenciales de la respiración.

La solubilidad del O_2 disminuye conforme la temperatura aumenta y la difusión del O_2 dentro del tejido es insuficiente para compensar el incremento de la actividad de las enzimas respiratorias. A temperaturas mayores de $45\text{ }^\circ\text{C}$, la

respiración empieza a decaer, hasta detenerse, debido a la desnaturalización de las proteínas y la desorganización de las membranas (Azcón-Bieto y Talón, 2000).

6.3.3.2. Altura de las plantas

La oxigenación de la solución favoreció ligeramente la altura de la planta, aunque las diferencias observadas no fueron significativas, las diferencias generadas por efecto del sustrato, tampoco resultaron estadísticamente significativas y la altura de las plantas fue similar independientemente de la granulometría (Apéndice 8).

De acuerdo con Delfine *et al.* (2000) el estrés reduce en la planta el índice del área foliar (LAI, por sus siglas en inglés), lo que se traduce en una disminución del porte de la planta y, posteriormente del rendimiento.

La concentración de O₂ en el interior del tejido influye en la fotosíntesis de diversos modos, algunos transportadores de electrones que participan en la asimilación de CO₂ pueden ser oxidados por el O₂. En particular la ferredoxina parece ser sensitiva al O₂. Con luz brillante concentraciones altas de O₂ causan un daño irreversible a los compuestos que participan en la fotosíntesis, probablemente por oxidación (Bidwell, 1979). Un daño de esta naturaleza se traduce en un menor porte y vigor de las plantas.

La falta de O₂ estimula el crecimiento por elongación de las células del tallo de las plantas hidrófilas. Esta adaptación constituye una respuesta particular ya que en la mayoría de las plantas que se ven sometidas a estrés de este tipo se minimiza el crecimiento vegetativo de la parte aérea de la planta (Azcón – Bieto y Talón, 2000).

Una oxigenación adecuada, mejora el metabolismo y el equilibrio hormonal en las plantas, incrementa la tasa fotosintética y la absorción de nutrimentos, lo que da como resultado, plantas más productivas y más resistentes (Pinto *et al.*, 2000).

6.3.3.3. Diámetro de tallo

El diámetro de tallo resultó ligeramente mayor en las plantas crecidas en los sustratos con solución nutritiva aireada (11.6 mm) en comparación con las que carecieron de esa condición (11.1 mm). Los diferentes sustratos y granulometrías influyeron en este parámetro del crecimiento, debido a que existieron diferencias significativas; aquellos sustratos con menor granulometría resultaron con mayores diámetros del tallo (Cuadro 7).

Cuadro 7. Diámetro medio de tallo de plantas de pimiento dulce tipo Bell crecidas en sustratos diferentes con granulometría gruesa y fina.

| Sustrato | Diámetro de tallo (mm) |
|-------------------|------------------------|
| Peat Moss® molido | 13.48 a |
| Peat Moss® grande | 10.92 c |
| Tezontle 2–4 mm | 12.43 a |
| Tezontle 6–8 mm | 8.83 b |

Valores seguidos de la misma letra no son significativamente similares (Tukey, $\alpha = 0.05$)

6.3.3.4. Producción

El Tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento fue el de tezontle con partículas entre 6 y 8 mm de diámetro y aireación (TgCA) cuyo rendimiento estimado fue de 3.10 t ha^{-1} , de las que el 33% fue de tamaño mediano, 27% de tamaño grande y sólo el 18% de rezaga. En contraste, el tratamiento que incluyó Peat Moss® con partícula grande (PgCA) y con aireación fue el que generó el menor rendimiento, con 1.19 t ha^{-1} , de las que sólo el 14% fue de tamaño grande, y 39% fueron rezaga (Figura 12).

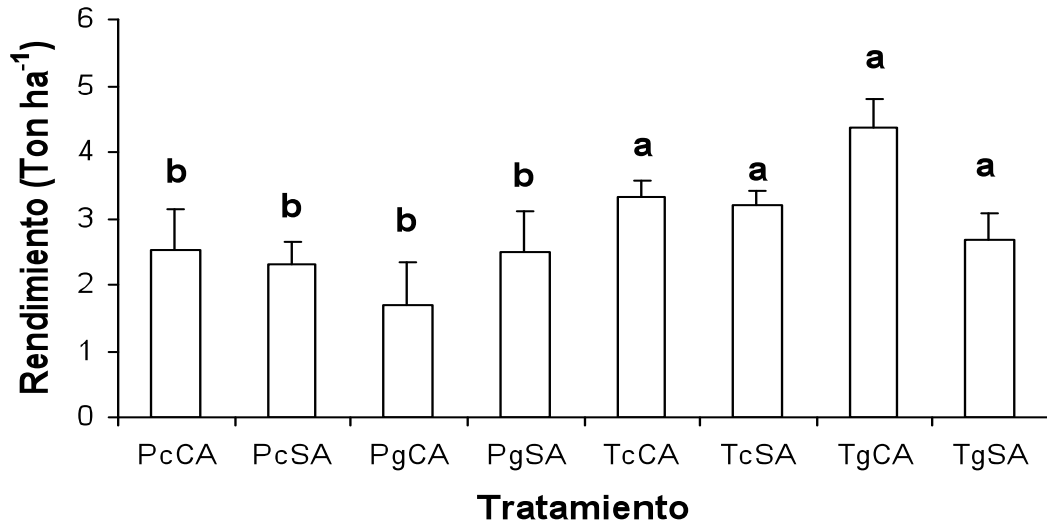


Figura 12. Rendimiento para los tratamientos (TcSA; Tezontle 2–4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2–4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Las barras representan el error estándar. Letras iguales indican que no existe diferencia significativa, Tukey $\alpha = 0.05$.

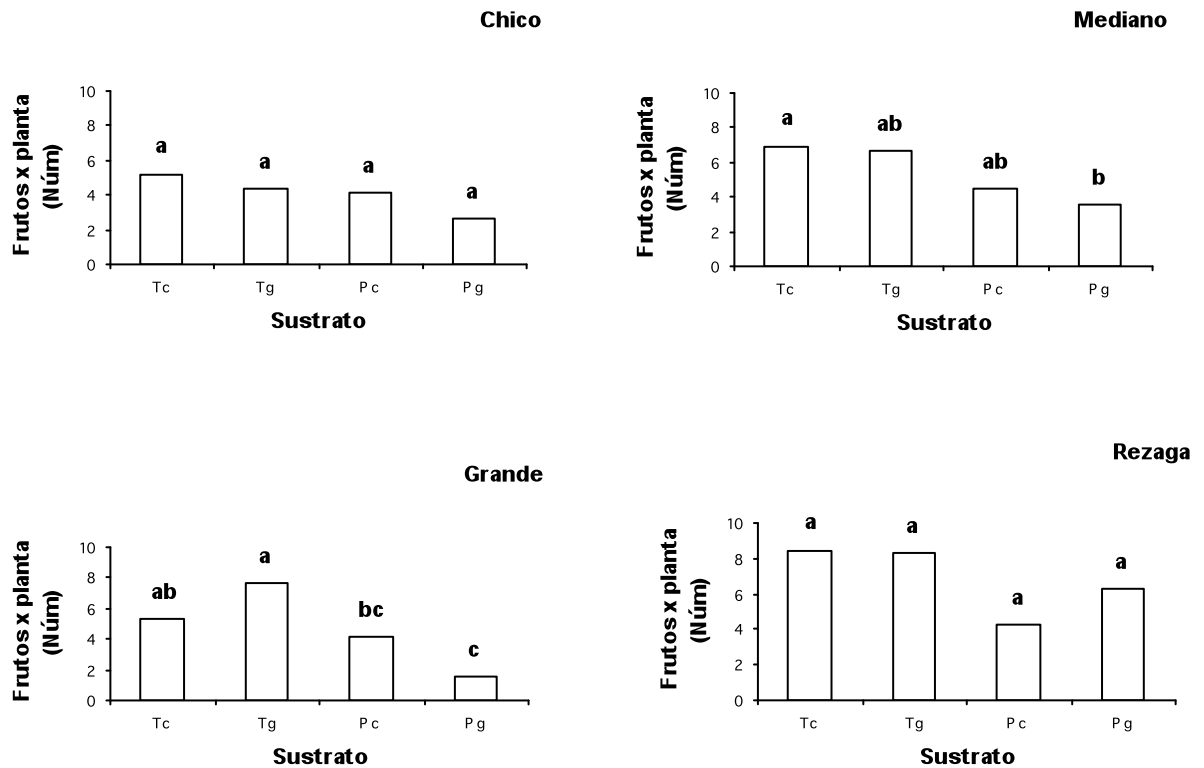


Figura 13. Número de frutos por tamaño para cada uno de los tratamientos, (Tc; Tezontle 2–4 mm, Tg; Tezontle 6–8 mm, Pc Peat Moss® molido, Pg; Peat Moss® grande). Tamaños: Ch; Chico (< 10.16 cm), M; Mediano (11.43 cm), G; Grande (15.24 cm), R; Rezaga (< 6 cm ó con deformaciones). Letras diferentes indican que existe diferencia entre los sustratos, Tukey $\alpha = 0.05$.

El estrés hídrico o la falta de aireación correcta afecta rápidamente la conductancia estomática y eventualmente disminuye la tasa fotosintética, esto conduce a la disminución del rendimiento y calidad de los frutos, sin excluir los de pimiento (Delfine *et al.*, 2000). Aunque, las plantas respondan positivamente a una amplitud de concentraciones y se adaptan a la falta de O_2 y puedan sobrevivir aun cuando los niveles de este gas sean notablemente bajos, el efecto final es inconveniente se trata de la disminución tanto del rendimiento como de la calidad de los frutos (Morgan, 2001).

Las deficiencias de O_2 en las raíces de las plantas detienen el crecimiento, ocasionan marchitamiento y epinastía de las hojas, esto, dan lugar a la senescencia y abscisión, cierre de estomas, fotosaturación e incremento de la

respiración. Este envejecimiento provocará que las plantas de interés agronómico disminuyan los rendimientos esperados (Azcon-Bieto y Talón, 2000).

6.3.4. Características de la raíz

6.3.4.1. Liberación de electrolitos

La liberación de electrolitos en una medida indirecta de la integridad y la funcionalidad de las membranas de los tejidos vegetales, así, la tasa de liberación de electrolitos puede ayudar a evaluar el daño sufrido por algún factor biótico o abiótico (temperaturas extremas, déficit de agua, deficiencias de O₂, deficiencias nutrimentales, etc.) en los tejidos (Palta, 1990).

La liberación de electrolitos puede evaluarse de diferentes maneras, de las mas comunes se pueden mencionar; cuantificar la conductividad eléctrica del medio acuoso en el que se depositan los tejidos vegetales y cuantificar los iones liberados a ese medio acuoso. Cuando las membranas se dañan pierden parcial o totalmente su capacidad de selectividad, y se alteran sus mecanismos de control para la entrada y salida de solutos, por lo que, al permanecerle tejido durante algún tiempo en un medio acuoso con una concentración mínima de solutos (agua desionizada) se induce una salida descontrolada del contenido interno (Pràšil y Zámeècnik, 1998). Resultado de la disminución, parcial o total de la selectividad de las membranas, los componentes liberados son diversos, como minerales, aminoácidos, ácidos orgánicos, azúcares y otros (Cruz, 2001).

En el presente estudio en 100 mg de tejido fresco el tratamiento que liberó la mayor cantidad de electrolitos fue el de tezontle con granulometría entre 2 y 4 mm y sin aireación, mientras que el que se vio menos afectado fue el de Peat Moss® con aireación (Figura 14). En 1 mm² y 1 mm³ de raíz este último tratamiento, presentó el menor daño y el Tratamiento de Peat Moss® chico sin aireación el que más electrolitos liberó en ambos casos (Figuras 15 y 16). En los segmentos de 1 cm de tejido el tratamiento de Peat Moss® chico con aireación

es el que resultó menos dañado mientras que la mayor cantidad de electrolitos liberada ocurrió con el Tratamiento de tezontle grueso (6-8 mm) sin aireación (Figura 17).

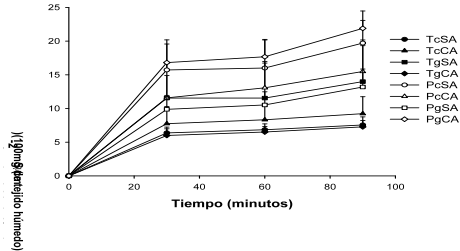


Figura 14. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 100 mg de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum annuum* L.), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

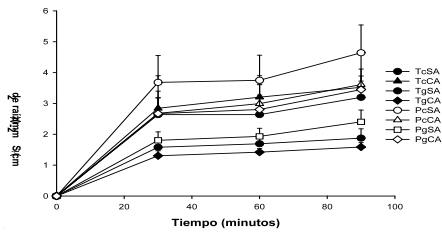


Figura 14. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 mm^2 de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

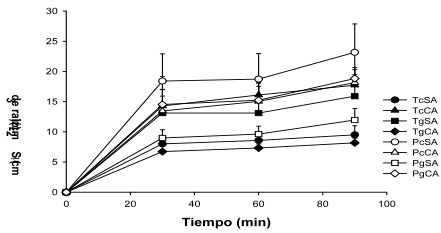


Figura 15. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 cm^3 de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8 mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8 mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

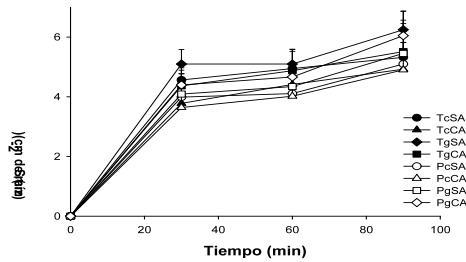


Figura 16. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-2}$) del medio de resuspensión generada por los electrolitos liberados por 1 cm de raíces (frescas) de plantas de pimiento dulce tipo bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (TcSA; Tezontle 2 – 4 mm, sin aireación: TcCA; Tezontle 2 – 4 mm con aireación: TgSA; Tezontle 6-8mm, sin aireación: TgCA; Tezontle 6-8mm con aireación: PcSA; Peat Moss® molido sin aireación: PcCA; Peat Moss® molido con aireación: PgSA; Peat Moss® grande sin aireación: PgCA; Peat Moss® con aireación). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

En todos los tratamientos la dinámica de liberación de electrolitos ocurrió de forma similar; una tasa de liberación muy rápida los primeros 30 min y, una mucho más lenta los siguientes 60 minutos, al término de los cuales las lecturas se estabilizaron. En general, se observó que las plantas en los sustratos con granulometría mayor (tezontle en los dos tamaños) sufrieron menos daño en las membranas, que aquellas en los sustratos con tamaño de partícula pequeño (Peat Moss® en las dos granulometrías) lo anterior, puede indicar que las granulometrías pequeñas impiden la expansión libre de las raíces al tener un espacio poroso menor, por lo que aun con aplicación de aireación, la respiración se restringe. Estos resultados son acordes con lo encontrado por Prášil y Zámečník (1998), quienes atribuyeron este comportamiento a daños en las

membranas radicales debidos a la falta de O₂; además, los mismos investigadores obtuvieron resultados similares a los de la presente investigación, una tasas de liberación rápida al inicio, seguida de una tasa de liberación menor, en segmentos de hoja de *Brasita napus* L. y de *Triticum aestivum* L.

Normalmente son añadidas partículas grandes a sustratos que tienden a compactarse a menudo para mejorar sus propiedades de aireación (el almacenamiento y el intercambio gaseoso). En investigaciones recientes se ha observado que fragmentos grandes de cualquier sustrato pueden crear una barrera impermeable, que restringen a difusión gaseosa en el entorno (Caron *et al.*, 2001).

El ambiente radicular rara vez es óptimo para el desarrollo efectivo y eficaz de las plantas, y uno de los factores limitantes principales puede ser la deficiencia de O₂, lo cual sumerge a la planta en un estado de estrés. Las partículas grandes del sustrato son mejores y más efectivas para la difusión del O₂ a largo plazo que las partículas pequeñas y la mejor forma de medir esto es la tasa de difusión de oxígeno (ODR por sus siglas en inglés; Miller, 1986).

6.3.4.2. Índice de daño a la raíz

De acuerdo con el método descrito por Pràšil y Zámeèník (1998) para cuantificar el índice de daño, la cantidad de electrolitos liberados es directamente proporcional al daño ocurrido en las membranas de los tejidos al ser sometidos a una situación conductora de estrés, es este caso la concentración limitada de oxígeno.

Tanto en 100 mg de tejido, como en un segmento de 1 cm de longitud y 1 mm³ de raíz el menor porcentaje de daño se presentó en el tratamiento con tezontle grueso (6 a 8 mm) con aireación, mientras que los tratamientos con Peat Moss® de partícula chica, sin aireación y Peat Moss® de partícula grande, con aireación presentaron el mayor índice de daño (Figuras 18 y 19). En general, los tratamientos que presentaron mayor daño son los de granulometría pequeña

(Peat Moss® con granulometría grande y el molido), independientemente de la aireación.

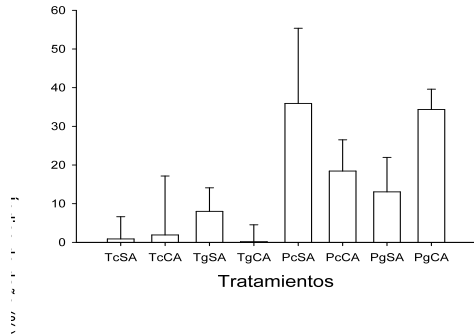


Figura 17. Determinación en 100 mg de tejido fresco del índice de daño (%) de las raíces de las plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía, con Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. ((T1 ; tezontle 2-4 mm con aire, T2 ; tezontle 2-4 mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire). Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

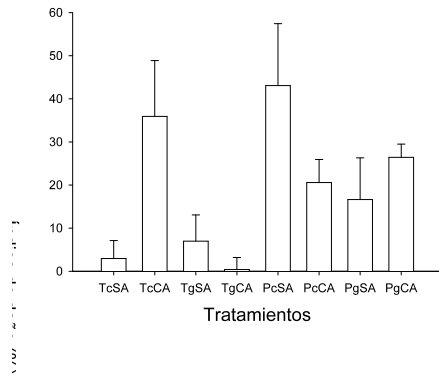


Figura 19. Determinación en un segmento de 1 mm³ del tejido fresco del índice de daño (%) de las raíces de las plantas de pimiento dulce tipo Bell (*Capsicum Annuum L.*), cultivadas en invernadero, en hidroponía. Tezontle (T) y Peat Moss® (PM) como soporte. (T1 ; tezontle 2-4 mm con aire, T2 ; tezontle 2-4 mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire).. Cada punto representa el promedio de cuatro repeticiones más el error estándar.

El índice de daño permitió determinar que las membranas radicales de las plantas del tratamiento con tezontle de partícula grande regado con medio sin aireación, fueron significativamente ($P \leq 0.05$) menos alteradas en las condiciones de cultivo; mientras que los tratamientos con Peat Moss® de partícula normal y molido y regados con medio aireado presentaron el índice de daño mayor. En general, los tratamientos con granulometría pequeña generaron daño mayor, independientemente de la aireación. Así, los resultados obtenidos muestran que el tezontle con granulometría de 6 a 8 mm regado con solución aireada es el sustrato que generó menos daño en el sistema radical. Con lo anterior, se

comprobó que para el mejor desarrollo, la raíz debe contar con un determinado nivel de O_2 en el medio y espacio suficiente, con los que los tejidos desarrollen tasas respiratorias adecuadas y superficie de contacto amplias que permitan la absorción balanceada de los nutrimentos (Azcon-Bieto y Talón, 2000).

Es conveniente señalar que el índice de daño mostró tendencias similares cuando las evaluaciones se desarrollaron con segmentos irregulares de raíz de 100 mg de peso respecto a las conformadas por segmentos de 1 cm^3 . Sin embargo, aún cuando los valores están ajustados a porcentaje, existieron diferencias notables en algunos tratamientos. Lo anterior podría ser efecto de algunos factores como la irregularidad de la superficie y/o superficie total del tejido expuesta al medio de resuspensión, así como proporción de tejido/medio de resuspensión. Al respecto, Prášil y Zámečník (1998) señalaron que la CE del medio (conductividad absoluta) puede ser afectada por la concentración de electrolitos del tejido, la tasa de liberación de ellos y la cantidad de muestra.

Con frecuencia, la presencia de partículas de tamaño grande en el medio de crecimiento de las plantas incrementa la porosidad (θ_a), por ello, es frecuente la práctica de preparar mezclas de sustratos con las que se asegure el incremento de θ_a y por ende la aireación, lo que aumenta la probabilidad del desarrollo adecuado de la raíz. Sin embargo, aunque es cierto que la aireación está relacionada con θ_a , también es dependiente de la conexión entre los poros que almacenan el aire. Este parámetro se incluye en la ecuación de difusión gaseosa con el símbolo “ y ”. El coeficiente de poros efectivos está ligado a la difusión gaseosa del sustrato (D_s) a través de la ecuación propuesta por King y Smith (1987): $D_s = D_o * y * \theta_a$, donde D_o representa el coeficiente de difusión del gas (Caron *et al.*, 2001).

Dependiendo de su origen y granulometría los sustratos tendrán un mayor número de macro o micro poros según sea el caso, las raíces solo aprovechan el agua contenida en los macroporos, por ejemplo, el tezontle posee un mayor número de macroporos que la perlita o la lana de roca.

VII. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las que se desarrolló el presente estudio, se concluye lo siguiente:

- ↗ Las raíces de *Capsicum annuum* L. son afectadas por el suministro de O₂ a la solución nutritiva.
- ↗ El rendimiento del cultivo es afectado positivamente por el suministro de aire a la solución nutritiva.
- ↗ El rendimiento del cultivo es mayor en el tezontle con taño de partículas de 6 a 8 mm de diámetro.
- ↗ Las plantas que crecen en tezontle de partícula gruesa (6-8 mm) con aireación, requieren menor cantidad de unidades calor para completar las diferentes etapas de desarrollo.
- ↗ El tezontle de partícula gruesa (6-8 mm) con aireación disminuye considerablemente el índice de daño a las raíces de las plantas.
- ↗ El tezontle de granulometría gruesa (6-8 mm) con aireación es el que favorece la calidad y el rendimiento de los frutos.
- ↗ El tezontle con granulometría gruesa (6-8 mm) y con aireación disminuye considerablemente los frutos no comercializables.

VIII. LITERATURA CITADA

- Ansorena M., J. 1994. Sustratos. Propiedades y Caracterización. Mundi–Prensa. Madrid, España.
- Azcón–Bieto, J. y M. Talón. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal, Ed. McGraw Hill, Madrid, España.
- Bidwell, R. G. S. 1979. Fisiología Vegetal, primera edición en español. Editorial A.G.T. México, D.F., México.
- Brisson, N., B. Rebiere, D. Zimmer, and P. Renault. 2002. Response of the root system of a winter wheat crop to waterlogging. *Plant and Soil* 243: 43–55.
- Burés, S. 1998. Preparación y selección de sustratos. En; Tecnología de sustratos, aplicaron a la producción viverística, ornamental, hortícola y forestal. (ed): J. N. Pastor. España. Págs. 19 – 45.
- Burrage S.W. 1992. Nutrient film technique in protected cultivation. *Acta Hort.* 23:23-38.
- Caron. J., and V.K.N. Nkongolo. 1999. Aeration in growing media: recent developments. *Acta Hort.* 481:545 – 551.
- Caron, J., Rivière L. M. and P. Morel. 2001. Aeration in growing media containing large particle size. *Acta Hort.* 548: 229–235.
- Castaños C., M. 1993. Horticultura: Manejo Simplificado. Colección Fénix. U. A. Chapingo. Chapingo, México.
- Cochran, A. H. 1983. A Morphological study of flower and seed development in pepper, *J. Agric. Res.* 56:395-419.
- Cruz, C. S. 2001. Características fisiológicas y biofísicas de la raíz de maíz (*Zea mays* L.) involucradas en la tolerancia a la sequia. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 69 p.
- Daskalaki, A., and S.W. Burrage. 1998. Solution temperature and the uptake of water and nutrients by cucumber (*Cucumis sativus* L.) in hydroponics. *Acta Hort.* 458:317–323.
- De Boodt M., Verdonk O., and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 67: 2054–2062.

- Delfine, S., A. Alvino., F. Loreto., M. Centritto, and G. Santarelli. 2000. Effects of water stress on the yield and photosynthesis of field-grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Acta Hort.* 537: 223–229.
- De Vilmorin, D.F. 1977. *El Cultivo del Pimiento Dulce Tipo Bell*. Ed. Diana. México, D.F.
- Domínguez V., A. 1993. *Fertigación*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. pp. 109-132.
- Drew, M.C. and L.H. Stolzy, (2000). Growth Under Oxygen Stress. In: *Plants Roots The Hidden Half*, editors: Waisel Yoav, Eshel Amram, Kafkafi Uzi. Marcel Dekker ed. New York.U.S.A.
- Fallik, E. P., Y. Tuvia-Alkalai, S. S., Y., and H. Zucckermann. 2003. A 24-h anoxia treatment reduces decay development while maintaining tomato fruit quality. *Postharvest Biology and Technology* 29:233- 236.
- García, E. 1980. Modificaciones al sistema de clasificación de Köpen para las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México, D. F.
- García C., O. 1999. *Materiales orgánicos como sustratos para la producción de Epipremnum aureum y Spathiphyllum wallisii cultivadas en maceta*. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Geingerberger, P. 2003. Response of plant metabolism to too little oxygen. *Current Opinion in Plant Biology* 6: 247–256.
- Guenkov, G. 1974. *Fundamentos de la Horticultura Cubana*. Organismos del Instituto Cubano del Libro. La Habana, Cuba.
- Gibbs, J., and H. Greenway. 2003. Mechanisms of anoxia in plants I. Growth, survival and anaerobic catabolism. *Functional Plant Biology* 30: 1–47.
- Giserøld, H. R., and R. J. Kempton. 1983. The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. *Scientia Hort.* 20: 23–33.
- Greenway, H., and J. Gibbs. 2003. Mechanisms of anoxia in plants II. Energy requirements for maintenance and energy distribution to essential processes. *Functional Plant Biology* 30: 999–1036.
- Jackson, M. B. 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. *Acta Hort.* 98: 61-75.

- King, J.A., and K.A. Smith. 1987. Gaseous diffusion through peat. *J. Soil Sci.* 38: 173-177.
- Markhart III, A. H., and B. Smith. 1990. Measurement of root hydraulic conductance. *Hortscience* 25:282-287.
- Mata V., H. 2001. Requerimientos nutricionales del chile serrano (*Capsicum annuum* L.) con fertirrigación y acolchado plástico. Tesis de Doctor en Ciencias. Edafología. C. P. Montecillo, Edo. de México.
- Mauseth, J. D. 1998. *Botany: An Introduction to Plant Biology*. Second ed. Jones & Bartlett Publisher. Sudbury, MA, USA.
- Miller, D. E. 1986. Root systems in relation to stress tolerance. *Hortscience* 21: 963-970.
- Morgan, L. 2001. ¿Se están sofocando las plantas?, la importancia del oxígeno en hidroponía. *Practical Hydroponics and Greenhouses* 52. *In: Red Hidroponia; Boletín informativo número 11, abril – junio*. Ed. R A. Rodríguez D. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú.
- Nuez, F., Gil O., R. y J. Acosta. 1996. *El Cultivo de Chiles, Pimientos y Ajíes*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. 607 p.
- Ortiz-Solorio, C. A. 1987. *Agroclimatología Cuantitativa, con Aplicación en la Republica Mexicana*. 3ª edición. Dpto. de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 327 p.
- Palta, J., P. 1990. Stress interactions at the cellular and membrane levels. *Hortscience* 25: 1377-1381.
- Pastor, S., J. N. 1998. *Tecnología de Sustratos, Aplicación a la Producción Viverística Ornamental, Hortícola y Forestal*. Edit. Universitat de Lleida. Lleida, España.
- Pinto. J. M., T. A. Botrel, E. C. Machado, and J. C. Feitosa Filho. 2000. The effect of CO₂ applied through irrigation. *Acta Hort.* 537: 267-272.
- Prášil, I., and J. Zámečník. , J. 1998. The use of a conductivity measurement method for assessing freezing injury. I. Influence of leakage time, segment number, size and shape in a simple on evaluation of the degree of injury. *Environ. Exp. Bot.* 40: 1-10.

- Resh, H. M. 1987. Cultivos Hidropónicos: Nuevas Tecnologías de Producción. 2^{da} edición. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Revilla, G. y I. Zarra. 2000. La fisiología y su impacto social. La célula. *In*: Azcon-Bieto y Talón, M. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Ed. McGraw Hill. Madrid, España. p. 1-16.
- Rodríguez S., F. 1996. Fertilizantes, Nutrición Vegetal. AGT. Editores. 157pp. México, D.F.
- Salisbury, F. B., y C. W. Ross 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana. México, D.F.
- Sánchez-Urdaneta, A. B., Peña-Valdivia, C. B., Trejo L., C., Aguirre, R., Cárdenas S., E., y Galicia-Jiménez, A. 2003. Permeabilidad de las membranas radicales de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre y domesticado bajo déficit de humedad. *INCI* 28:597-603.
- SAS. 1999-2000. SAS user's guide Statistics. Version 8.1. SAS institute. Cary, NC. USA. 1290 p.
- Šebánek, J. 1992. Plant Physiology. Ed. Elsevier. Czechoslovakia. 453 p.
- Schumacher, T. E. and A. J. M. Smucker. 1984. Effect of localized anoxia on *Phaseolus vulgaris* L. root growth. *J. Exp. Bot.* 35: 1039–1047.
- Schnitzler, W. H., and H. Heuberger. 2001. Greenhouse bell pepper cultivation in low cost hydroponic systems. *Acta Hort.* 548:43–49.
- Schumacher, T. E., and A. J. M. Smucker. 1985. Carbon transport and root respiration of split root systems of *Phaseolus vulgaris* L. subjected to short term localized anoxia. *Plant Physiol.* 78:359–364.
- Smith, G. S., J. G. Buwalda, T. G. A. Green and C. J. Clark. 1989. Effect of oxygen supply and temperature at root on physiology of kiwifruit vines. *New Phytol.* 113, 431- 438.
- Steiner, A. A. 1966. The influence of the chemical composition of a nutrient solution on the production of tomato plants. *Plant and Soil* 24:455–466.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. 6th International Congress of Soilless Culture. 633 – 649. Lunteren, The Netherlands.
- Sousa, C. A. F., and L. de Sodek. 2002. The metabolic response of plant to oxygen deficiency. *Brazilian J. Plant Physiol.* 14:83–94.

- Taiz, L., and E. Zeiger. 2002. Plant Physiology. 3rd edition. Ed. Sinahuer Associates. Sunderland, MA, U.S.A.
- Terrés, V. L., A. Artetxe, A. Beunza, E. Sáins de la Maza and M. Lezaun. 2001. Physical properties of the substrates. Proc. 5th IS Protect. Cult. Mild Winter Clim (eds) Fernández, Martínez & Castilla. Acta Hort. 559: 663-668.
- Urrestarazu G., M. 2000. Manual de Cultivo sin Suelo. Mundi-Prensa. Almería, España.
- Valenzuela U. y J. G. 2005. Validación de Variedades de Hortalizas, Día de Demostración de Campo, Otoño – Invierno 2004–2005. Campo Experimental del Valle de Culiacán. Culiacán, Sinaloa, México.
- Velasco P., L. A. 2002. Evaluación de la rentabilidad y de la ventaja comparativa del cultivo del pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo condiciones de fertirrigación en el estado de Guanajuato P/V 2001 y 2002 y sus perspectivas de mercado. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Zeroni, M., Gale, J. and J. Ben-Asher. 1983. Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. Scientia Hort. 19:213–220.

Direcciones Electrónicas

- FAOSTAT. 2000. www.fao.org. Revisado el 16 de febrero de 2004.
- FAOSTAT. 2004 www.fao.org. Revisado el 30 de noviembre de 2005
- FAOSTAT. 2005. www.fao.org. Revisado el 15 de abril de 2006.
- HARRIS MORAN. 2005. www.harrismoran.com. Revisado el 20 de enero de 2005.
- MERCANET. 2005. www.mercanet.cnp.go.cr . Revisado el 25 de marzo de 2006
- MEXBEST. 2005. www.mexbest.com . Revisado el 25 de marzo de 2006.
- MEXBEST. 2006. www.mexbest.com . Revisado el 25 de marzo de 2006.
- MEXICO CALIDAD SUPREMA. 2006. www.mexicocalidadsuprema.com .Revisado el 25 de marzo de 2006.

IX. APÉNDICES

Apéndice 1. Nomenclatura de tratamientos.

| Número | Sustrato | Granulometría | Aireación | Clave |
|--------|------------|---------------|-----------|-------|
| 1 | Tezontle | 2 – 4 mm | S/A | TcSA |
| 2 | Tezontle | 2 – 4 mm | C/A | TcCA |
| 3 | Tezontle | 6 – 8 mm | S/A | TgSA |
| 4 | Tezontle | 6 – 8 mm | C/A | TgCA |
| 5 | Peat Moss® | Grande | S/A | PgSA |
| 6 | Peat Moss® | Grande | C/A | PgCA |
| 7 | Peat Moss® | Molido | S/A | PcSA |
| 8 | Peat Moss® | Molido | C/A | PcCA |

Apéndice 2. Calendario de muestreos realizados en el sustrato y la solución.

| Fecha | # de Muestreo | Fecha | # de Muestreo | Fecha | # de Muestreo |
|-----------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| 20-Dic-04 | 1 | 18-Ene-05 | 10 | 22-Feb-05 | 19 |
| 23-Dic-04 | 2 | 21-Ene-05 | 11 | 07-Mar-05 | 20 |
| 26-Dic-04 | 3 | 24-Ene-05 | 12 | 15-Mar-05 | 21 |
| 29-Dic-04 | 4 | 27-Ene-05 | 13 | 22-Mar-05 | 22 |
| 03-Ene-05 | 5 | 02-Feb-05 | 14 | 01-Abr-05 | 23 |
| 06-Ene-05 | 6 | 05-Feb-05 | 15 | | |
| 09-Ene-05 | 7 | 08-Feb-05 | 16 | | |
| 12-Ene-05 | 8 | 12-Feb-05 | 17 | | |
| 15-Ene-05 | 9 | 15-Feb-05 | 18 | | |

Apéndice 3. Calendario de muestreos.

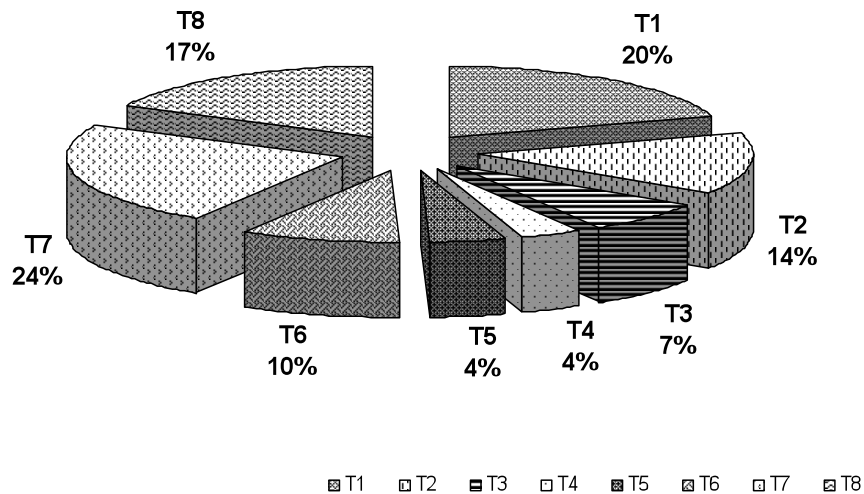
| Fecha | # de muestreo | ddt | Fecha | # de muestreo | ddt |
|-----------|---------------|-----|-----------|---------------|-----|
| 20-Dic-04 | 1 | 50 | 22-Feb-05 | 19 | 116 |
| 03-Ene-05 | 5 | 66 | 15-Mar-05 | 21 | 137 |
| 15-Ene-05 | 9 | 81 | 01-Abr-05 | 23 | 157 |
| 02-Feb-05 | 14 | 96 | | | |

Apéndice 4. Cálculos del suministro y consumo de oxígeno en solución NFT a varias temperaturas en planta de tomate en floración del primer racimo (Morgan, 2001).

| Temperatura (°C) | | | |
|---|------|------|-----|
| 10° | 15° | 20° | 25° |
| Volumen de la solución por planta L ⁻¹ | | | |
| 2 | 2 | 2 | 2 |
| Peso fresco de las raíces por planta (g) | | | |
| 200 | 200 | 200 | 200 |
| Consumo de oxígeno por las raíces (mg planta ⁻¹ hora ⁻¹) | | | |
| 46 | 65 | 92 | 129 |
| Contenido de oxígeno en una solución bien aireada | | | |
| 22.8 | 20.4 | 18.6 | 17 |

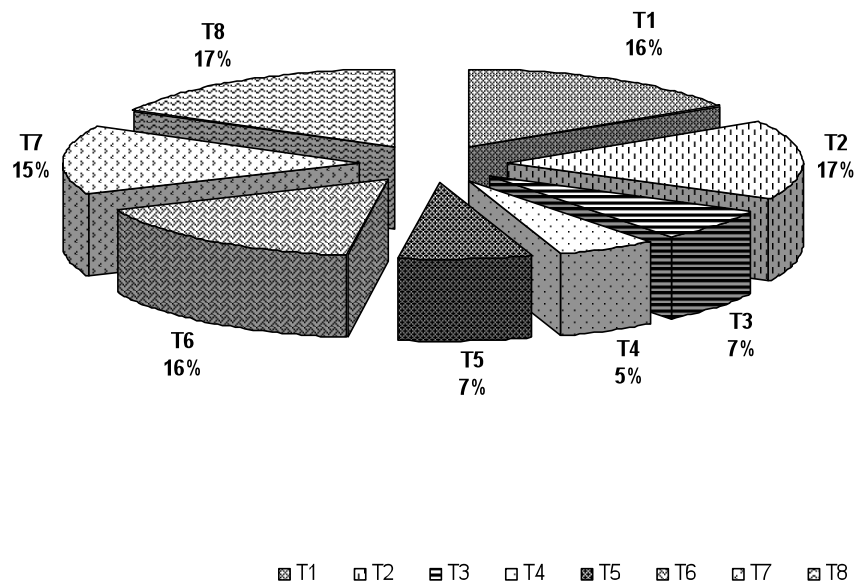
Apéndice 5. Porcentaje de unidades calor requeridas para completar el desarrollo vegetativo de los diferentes tratamientos (T1 ; tezontle 2-4 mm con aire, T2 ; tezontle 2-4 mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire).

Desarrollo Vegetativo



Apéndice 6. Porcentaje de unidades calor requeridas para completar la etapa de floración de los diferentes tratamientos. (T1 ; tezontle 2-4 mm con aire, T2 ; tezontle 2-4 mm sin aire, T3 ; tezontle 6-8 mm con aire, T4 ; tezontle 6-8 mm sin aire, T5 ; Peat Moss® grande con aire, T6 ; Peat Moss® grande sin aire, T7 ; Peat moss® molido con aire, T8 ; Peat Moss® molido sin aire).

Floración



Apéndice 7. Calendario de muestreos realizados en planta.

| Fecha | # muestreo | Días después del transplante |
|-----------|------------|------------------------------|
| 11/Dic/04 | 1 | 41 |
| 28/Dic/04 | 2 | 60 |
| 16/Ene/05 | 3 | 75 |
| 30/Ene/05 | 4 | 90 |
| 11/Feb/05 | 5 | 105 |
| 01/Mar/05 | 6 | 120 |
| 04/Abr/05 | 7 | 154 |

Apéndice 8. Resultado de la prueba de medias para la variable altura de planta.

| Sustrato | Peat Moss® molido | Peat Moss® grande | Tezontle 2 – 4 mm | Tezontle 6 – 8 mm |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Altura final | 48.719 a | 45.163 a | 45.106 a | 47.425 a |