



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN**  
**PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL**  
**UNIDAD OAXACA**



**DOCTORADO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN**  
**Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS**  
**NATURALES**  
**(PROTECCIÓN Y PRODUCCIÓN VEGETAL)**

**EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS PASIVOS DE OXIGENACION**  
**RADICULAR EN CULTIVO HIDROPONICO RECIRCULANTE**  
**DE TOMATE Y LECHUGA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**PRESENTA**

**ROBERTO LÓPEZ POZOS**

**DIRECTORES DE TESIS**  
**DR. GABINO ALBERTO MARTÍNEZ GUTIERREZ**  
**DR. RAFAEL PÉREZ PACHECO**

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca

Diciembre de 2011



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 28 del mes de noviembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA)** para examinar la tesis de grado titulada: "Evaluación de dos métodos pasivos de oxigenación radicular en cultivo hidropónico recirculante de tomate y lechuga"

Presentada por el alumno:

**López**

Apellido paterno

**Pozos**

materno

**Roberto**

nombre(s)

Con registro: 

A	0	8	0	4	3	5
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de: **DOCTOR EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

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

#### LA COMISION REVISORA

Directores de tesis:

  
Dr. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez

  
Dr. Rafael Pérez Pacheco

  
Dr. Jaime Ruiz Vega

  
Dra. Martha Angélica Bautista Cruz

  
Dr. Alfonso Vásquez López

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 25 del mes noviembre del año 2011, el (la) que suscribe **López Pozos Roberto** alumno (a) del Programa de **DOCTORADO EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A080435**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Dres. Gabino Alberto Martínez Gutiérrez y Rafael Pérez Pacheco y cede los derechos del trabajo titulado: **“Evaluación de dos métodos pasivos de oxigenación radicular en cultivo hidropónico recirculante de tomate y lechuga”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [robertolopez62@hotmail.com](mailto:robertolopez62@hotmail.com) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
**Roberto López Pozos**



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.

## RESUMEN

La oxigenación inadecuada de la solución nutritiva (SN) puede producir hipoxia radicular en muchas plantas, este hecho afecta la absorción de nutrientes y agua y su producción puede verse disminuida. En cultivos de lámina de recirculación nutritiva (NFT Nutrient Film Technique) el sistema puede producir hipoxia por la baja solubilidad del oxígeno en la SN, pero bien oxigenada puede funcionar como fuente de oxígeno para las raíces. Con el objetivo de evaluar la incorporación de oxígeno por dos métodos pasivos, se estudió el efecto de la pendiente al 2 y 4 % en contenedores de 24 m de longitud y el efecto de la inclusión de flujos de variación rápida de la SN: con cero, una, dos y tres caídas de SN que produjeran saltos hidráulicos. Se midió el oxígeno disuelto y las variables de rendimiento del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. c.v. Pony express) y lechuga (*Lactuca sativa* L.c.v. Satine). El oxígeno disuelto en la SN siempre fue mayor en el cultivo de lechuga en comparación con el de jitomate. Para la lechuga el comportamiento del oxígeno disuelto en la SN durante el día fue similar, el contenido de oxígeno en la SN no tuvo diferencias en contenedores de 4 % y 2 % de pendiente ni por número de saltos hidráulicos. El rendimiento en peso fresco de la parte aérea fue mayor para el tratamiento con 4 % de pendiente y 3 saltos hidráulicos. El peso seco en la raíz también fue mayor para ese tratamiento. En el tomate, el oxígeno disuelto en la SN fue mayor en los contenedores del 4 % de pendiente, también hubo diferencias por el número de saltos hidráulicos. Al medio día cuando el contenido de oxígeno fue menor, aumento proporcionalmente con el número de saltos hidráulicos. El rendimiento productivo de frutos fue mayor en los

contenedores con el 4 % de pendiente, también tuvo incrementos de producción con mayor número de saltos hidráulicos. Se encontraron fuertes correlaciones ( $r = 0.98$ ) entre el número de saltos hidráulicos y la producción de los canales con el 2 % lo que indica que el factor limitante fue el oxígeno. Los resultados de producción indican que la lechuga no tiene limitante por oxígeno en los tratamientos estudiados, mientras que el jitomate tuvo la mejor producción con canales con el del 4 % de pendiente, y tres saltos hidráulicos.

## ABSTRACT

The inadequate oxygenation of the nutrient solution (NS) can produce root hypoxia in many plants, this fact affects the uptake of nutrients and water and its yield can be reduced. In cultures of Nutrient Film Technique (NFT) the system can produce hypoxia by the low solubility of oxygen in the NS, but it can work well oxygenated as a source of oxygen to roots. In order to evaluate the incorporation of oxygen by two passive methods, we studied the effect of slope at 2 and 4% in containers of 24 m in length and including the effect of rapidly varying flow of the NS, with zero, one, two and three drops of NS that produce hydraulic jumps. Dissolved oxygen was measured and variables of crop yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill cv Pony Express) and lettuce (*Lactuca sativa* L cv Satine). Dissolved oxygen in the NS was always higher in growing lettuce compared with tomato. For lettuce the behavior of dissolved oxygen in the NS during the day was similar, the oxygen content in the NS did not differ in containers of 4% and 2% slope or by number of hydraulic jumps. The fresh weight yield of the shoots was greater for treatment with 4% slope and 3 hydraulic jumps. The root dry weight was also greater for this treatment. In tomato, the dissolved oxygen in the NS was greater in containers of 4% slope, there were also differences by the number of hydraulic jumps. At noon, when the oxygen content was lower, increased proportionally with the number of hydraulic jumps. The production yield of fruits was higher in the container with 4% slope, also had production increases with increasing hydraulic jumps. There is a correlation between the number of hydraulic jumps and the production of channels with 2% indicating that the limiting factor was oxygen. The results indicate that

production of lettuce has no oxygen limitation in the treatments studied, while tomato production had the best channels with 4% slope, and three hydraulic jumps.



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto Politécnico Nacional por haberme brindado las facilidades y apoyos necesarios para la realización de los estudios de doctorado y la elaboración de la tesis “Evaluación de dos métodos pasivos de oxigenación radicular en cultivo hidropónico recirculante de tomate y lechuga”.

Al personal académico del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, (CIIDIR IPN - Unidad Oaxaca) por la formación académica brindada.

Al personal administrativo y de apoyo del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, (CIIDIR IPN - Unidad Oaxaca) por el soporte brindado durante la realización de mis estudios en el periodo 2007-2011.

Debo agradecer de manera especial al Dr. Gabino A. Martínez Gutiérrez por su amistad y apoyo brindado en el transcurso del desarrollo del trabajo, por sus sugerencias y recomendaciones para el mejoramiento de este trabajo.

Al Dr. Rafael Pérez Pacheco por el apoyo brindado durante el transcurso de los estudios

Un sincero agradecimiento a los miembros de la Comisión Revisora Dr. Jaime Ruiz Vega, Dra. Martha Angélica Bautista Cruz y Dr. Alfonso Vásquez López por las observaciones realizadas, sus valiosas críticas y correcciones aportadas.

A la Universidad del Mar por las facilidades brindadas durante el periodo de estudios.



## **DEDICATORIA**

Para Charo mi compañera y esposa, a ella especialmente le dedico esta Tesis. Por su paciencia, por su comprensión, por su empeño, por su estoicismo, por su fuerza, por su amor, por ser tal y como es. Porque Ella es la persona que más directamente ha sufrido las consecuencias del trabajo realizado.

Este trabajo también va dedicado a Roberto, Omar y Laura, mis hijos que con su vida diaria, amor y cariño me enseñan a ver al mundo diferente. En los que he puesto mi paciencia, mi cariño.

En sí esta Tesis está dedicada a mi familia por el tiempo que no compartí con ellos, los paseos, la playa, las reuniones familiares, por el tiempo que tuvimos que hacer las cosas separados, pero que al final del camino llegamos a la meta.

## CONTENIDO

Resumen.....	iv
Abstract.....	vi
Cuadros.....	xiii
Figuras.....	xiv

### **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL**

1.1. Introducción .....	1
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Particulares.....	5
1.4. Revisión De Literatura .....	6
1.4.1. La importancia del oxígeno en la respiración radicular .....	7
1.4.2. Factores que afectan el contenido de oxígeno disuelto en NFT .....	13
1.4.3. Demanda diferenciada de oxígeno en el cultivo de tomate y lechuga.....	20

### **CAPÍTULO 2. OXIGENACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN PLANTAS DE LECHUGA EN SISTEMA HIDROPONICO RECIRCULANTE COMO EFECTO DE LA PENDIENTE Y SALTO HIDRAULICO .....**

27

(The oxygenation of the nutrient solution on lettuce plants in a recirculating hydroponic system as the effect of slope and gaps)

2.1. Resumen .....	28
2.2 Abstract .....	29

2.3. Introducción .....	30
2.4. Materiales y Métodos.....	32
2.5. Resultados y Discusión .....	34
2.6. Conclusiones .....	37
2.7. Literatura Citada .....	38
<b>CAPÍTULO 3. EFECTO DE LAS PENDIENTES Y SALTOS HIDRÁULICOS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA SOBRE EL RENDIMIENTO DE TOMATE CULTIVADO EN NFT Y CLIMA CÁLIDO .....</b>	<b>45</b>
(THE EFFECTS OF SLOPE AND CHANNEL NUTRIENT SOLUTION GAP NUMBER ON THE YIELD OF TOMATO CROPS BY AN NFT SYSTEM UNDER A WARM CLIMATE)	
3.1. Abstract .....	45
3.2. Introduction .....	46
3.3. Materials and Methods .....	47
3.4. Results and Discussion .....	49
3.5. Conclusions .....	50
3.6. Literature Cited .....	51

**CAPÍTULO 4. DOS MÉTODOS DE OXIGENACIÓN PASIVA EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE Y LECHUGA EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO RECIRCULANTE TIPO NFT. .... 57**

(Two passive methods of oxygenation in the nutrient solution for the production of tomato and lettuce in an hydroponic system NFT type)

4.1. Resumen ..... 57

4.2. Summary ..... 58

4.3. Introducción ..... 59

4.4. Materiales y Métodos ..... 61

4.5. Resultados y Discusión ..... 63

4.6. Conclusiones ..... 68

4.7. Bibliografía ..... 69

**5. CONCLUSIONES GENERALES Y LITERATURA CITADA**

5.1. Conclusiones Generales ..... 80

5.2. Literatura Citada de la Revisión de Literatura ..... 81

ANEXO..... 88

## **Cuadros**

Cuadro 2.1. Temperatura de la solución nutritiva y oxígeno disuelto en el canal de NFT vs el tratamiento a diferentes horas del día.

Cuadro 2.2. Rendimientos de la lechuga en peso fresco según la pendiente y el número de saltos hidráulicos

Cuadro 2.3. Rendimientos de la lechuga en peso seco según la pendiente y el número de saltos hidráulicos

Table 3.1. Nutrient solution temperature (°C) and average dissolved oxygen in the NFT channel vs. the treatment, at different solar hours.

Table 3.2. Tomato yield ( $\text{g plant}^{-1}$ ) vs. slope and gap number.

Cuadro 4.1. Contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva de acuerdo a la pendiente del contenedor, número de saltos hidráulicos y cultivo durante el desarrollo de la plantación.

Cuadro 4.2. Rendimiento Productivo del cultivo de lechuga según la pendiente y el número de caídas en los contenedores.

Cuadro 4.3. Rendimiento de jitomate ( $\text{g planta}^{-1}$ ) de acuerdo a la pendiente y número de caídas en los contenedores

## Figuras

Fig. 3.1. Linear correlation between gap numbers in the channel (abscissa) and the yield (ordinate, g plant<sup>-1</sup>) of a tomato crop by NFT modified for warm climates.

Fig. 3.2. Linear correlation between dissolved oxygen in the channel (abscissa, %) and the yield (ordinate, g plant<sup>-1</sup>) of a tomato crop by NFT modified for warm climates.

Figura 4.1. Diagrama de la instalación de los contenedores para lechuga y tomate. El tanque receptor para la recirculación de la SN y el número de caídas de la SN de acuerdo al tratamiento. La distribución y arreglo de los contenedores son similares para los tratamientos de la pendiente del 2 y 4 %.

Figura 4.2. Contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva a la entrada y salida de los contenedores. A. Contenedor con 2 % de pendiente y con siembra de lechuga. B. Contenedor con 4 % de pendiente y con siembra de lechuga. C. Contenedor con 2 % de pendiente y con siembra de jitomate. B. Contenedor con 4 % de pendiente y con siembra de jitomate.

## CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1. Introducción

Las raíces son órganos aeróbicos que necesitan oxígeno para crecer y funcionar, requieren que esté en la concentración adecuada para una respiración aeróbica eficiente (Jackson, 1980). El crecimiento de las plantas y toda la actividad biológica que tiene lugar en la zona radicular consume  $O_2$  de manera continua para la absorción de nutrientes. La disminución o la falta de oxígeno en la zona radicular puede llegar a provocar hipoxia y producir daños en la planta disminuyendo y retardando su crecimiento y ganancia de peso (Zeroni *et al.*, 1983; Zheng *et al.*, 2007) o puede llegar a producir daños severos y/o la muerte de la planta (Drew, 1997).

En la técnica hidropónica NFT las plantas absorben agua, nutrientes y oxígeno directamente de la SN que está recirculando a través de las raíces de las plantas (Urrestarazu, 2004). La SN se oxigena principalmente en el estanque colector donde se produce la turbulencia al retornar la solución y mientras mayor sea la concentración de oxígeno disuelto, mayor será su disponibilidad para el sistema radicular de las plantas (Carrasco e Izquierdo, 1996). Sin embargo, los coeficientes de difusión del oxígeno hacia la solución nutritiva en condiciones normales de temperatura y presión atmosférica es baja y es una limitante de oxigenación (ASTM, 1996; Jenkins *et al.*, 1983), este fenómeno se vuelve relevante cuando produce hipoxia en los cultivos en los sistemas NFT porque sus rendimientos disminuyen, además de que existen otros factores que también



reducen el oxígeno disuelto en la SN como son el aumento de la temperatura (Sojka *et al.*, 1975), la actividad metabólica del sistema radicular de las plantas, los microorganismos que estén presentes en la SN (Chérif *et al.*, 1997; Morgan, 2001), y la especie que se esté desarrollando (Resh, 2006; Urrestarazu, 2004), en estas condiciones la solución funciona como una barrera para el uso del oxígeno por la raíz lo que limita la producción vegetal en estos sistemas. Durante mucho tiempo se han realizado estudios sobre el efecto del oxígeno en el desarrollo de las plantas durante el siglo pasado (Dean, 1933; Kramer, 1951; Luxmoore *et al.*, 1970; Drew *et al.*, 1997) y en lo que va este siglo (Morgan 2001; Morgan, 2011; Nakano *et al.*, 2007), aunque la mayoría se enfoca en los estudios fisiológicos, anatómicos y bioquímicos que causa la hipoxia en el desarrollo de las plantas, son pocos los autores que han desarrollado métodos que sean aplicables a la producción comercial hidropónica en soluciones que eviten esa dificultad.

## **1.2. Justificación**

Los cultivos hidropónicos son una tecnología alternativa para la producción intensiva de una gran cantidad de hortalizas en pequeñas superficies, la mayoría de las explotaciones comerciales son sistemas abiertos que utilizan sustratos para sostener las plantas. El reemplazo de los sustratos y la SN perdida generan residuos que pueden llegar a contaminar el ambiente, suelo y mantos acuíferos. Es importante evitar los problemas mencionados antes de que se conviertan en un problema irreversible. Los sistemas hidropónicos cerrados disminuyen esos efectos contaminantes porque evitan la pérdida de la solución nutritiva y optimizan el uso del agua y de fertilizantes, especialmente los sistemas en SN como NFT, a raíz flotante o la técnica de flujo profundo, no utilizan sustrato por lo que no generan residuos. A mediano plazo se prevé el cambio a estos sistemas que son los que menos afectan el ambiente y preservan el recurso agua, sin embargo enfrentan problemas en la oxigenación de la SN para la respiración radicular de las plantas que afectan negativamente la producción. Actualmente se utiliza la introducción forzada de oxígeno por burbujeo, o se integran aparatos para que aumenten el contacto de la solución con el aire o generen turbulencia para mejorar la oxigenación. Las modificaciones no han resultado completamente adecuadas para los cultivos a nivel comercial o porque no son eficientes o porque aumentan los costos de producción. Es por ello que es importante realizar estudios para encontrar métodos que sean más efectivos en la oxigenación, que sean aplicables a nivel comercial y que no aumenten los costos de producción. Experimentar las necesidades de oxígeno en una planta con altas necesidades de oxígeno como el

tomate y de bajas necesidades como la lechuga nos permitirá evaluar la eficiencia de oxigenación con la inclusión de saltos hidráulicos y las pendientes en los canales de los cultivos y que pueden ser una opción para el aumento de la oxigenación de la SN.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Estudiar los cambios cuantitativos en plantas de lechuga (*Lactuca sativa* L) y jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) como respuesta a la incorporación de oxígeno a la solución nutritiva por dos métodos pasivos de oxigenación: en contenedores con el 2 y 4 % de pendiente bajo un sistema hidropónico recirculante tipo NFT y cero, uno, dos y tres saltos hidráulicos.

#### **1.3.2. Objetivos particulares:**

Evaluar la incorporación de oxígeno en la solución nutritiva en contenedores con pendientes del 2 y 4 % de inclinación en cultivo de tomate y lechuga cultivadas en sistema hidropónico de NFT.

Determinar el efecto de la oxigenación de la solución nutritiva sobre el rendimiento de tomate cultivado en un sistema hidropónico NFT.

Evaluar el efecto de la oxigenación de la solución nutritiva sobre el rendimiento de lechuga cultivada en un sistema hidropónico NFT.

#### **1.4. REVISIÓN DE LITERATURA**

La hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas en donde se prescinde del uso del suelo y se utilizan soluciones minerales para su nutrición (Resh, 2006). Los cultivos sin suelo se pueden clasificar en cultivos en sustratos, que son la mayoría de los cultivos comerciales hidropónicos que generalmente utilizan sustratos sólidos para el sostén de las plantas, estos sustratos pueden ser la perlita, fibra de coco, turba, lana de roca, etc. y cultivos en agua, en estos no se utiliza ningún anclaje sólido en el cual se desarrolla y vive el aparato radicular de la planta (Winsor y Schwartz, 1990), aunque para el término “cultivo en agua” sería más apropiado utilizar el término solución o disolución nutritiva (Urrestarazu, 2004). Estos últimos, son sistemas que utilizan repetidamente la SN haciendo un uso más eficiente de los fertilizantes dando más ventajas al productor porque tienen ahorros de fertilizantes, causan menor impacto ambiental por disminuir la contaminación de suelos y mantos freáticos, y hay disminución de uso del agua con rendimientos de los cultivos similares o mayores a los sistemas de producción a solución perdida. (Dasgan y Ekici, 2005; García *et al.*, 2008).

Los sistemas hidropónicos que se desarrollan en agua, mantienen las raíces del cultivo en contacto con la SN, sin que exista ningún sustrato de sostén en donde recircula la SN en forma continua o intermitente sin existir pérdida o salida de la solución nutritiva por lo que se dice que son sistemas cerrados (Carrasco e Izquierdo, 1996). Los sistemas hidropónicos en SN pueden ser en película nutritiva

recirculante (NFT de *nutrient film technique*), en aeroponía y a raíz flotante (Urrestarazu, 2004).

El principio del sistema de recirculación de película nutritiva NFT consiste en la circulación constante de una lámina fina de 4 a 5 mm de solución nutritiva que pasa a través de las raíces del cultivo, no existiendo pérdida o salida al exterior de la solución nutritiva. El movimiento de la SN se lleva a cabo por canales con una pendiente o desnivel de la superficie de cultivo, y así le permite el flujo de hacia un contenedor que recibe la SN y pueda recircularla (Carrasco e Izquierdo, 1996; Urrestarazu, 2004). Una de las ventajas que ofrece el sistema NFT es que tiene mayor eficiencia en la utilización de elementos minerales para el crecimiento de las plantas, de agua y de oxígeno con respecto a otro cultivo en agua.

Existen varios métodos que permiten una mayor aireación de la SN, forzan la entrada de oxígeno a la solución, el más usado es el burbujeo de aire continuo mediante un compresor (Resh, 2006), otra forma es provocar una caída de la SN en el tanque de retorno del sistema de al menos de 50 cm (Carrasco e Izquierdo, 1996), o se han propuesto aditamentos especiales como colocar válvulas con perforaciones finas en la salida del tubo de retorno de la SN que llega al tanque del receptor de la disolución (Morgan, 2001), placas perforadas para que la SN aumente la superficie de contacto con el aire y también que aumente las turbulencias de la disolución y consecuentemente la oxigenación. Sin embargo, en la práctica la falta de oxígeno es común en los sistemas NFT, en ellas la mayor parte de la raíz está sumergida y es la mayor barrera para el movimiento gaseoso entre las raíces y el aire.

#### **1.4.1. La importancia del oxígeno en la respiración radicular**

Las plantas, en condiciones naturales o experimentales, pueden desarrollarse en ambientes con diferentes niveles de oxígeno, cuando la concentración de este gas es suficiente para que su metabolismo no sea limitante en la fosforilación oxidativa y no tenga efectos negativos se denomina que está en normoxia, cuando hay una deficiencia de oxígeno y limita la producción de ATP y afecta negativamente el desarrollo de la planta se dice que está en hipoxia, mientras que en ausencia total de oxígeno la producción de ATP es insignificante comparada con la que se genera en la glucólisis y fermentación, y afecta rigurosamente su desarrollo se dice que está en anoxia (Ferreira y Sodek, 2002).

Para el crecimiento y funcionamiento apropiado de las plantas, los niveles adecuados de oxígeno en la raíz son necesarios para su buen desarrollo (Chérif *et al.*, 1997), su deficiencia tiene efecto en la absorción de agua y de nutrientes, y el rendimiento de los cultivos son afectados (Drew, 1983; Urrestarazu y Mazuela, 2005). Este fenómeno ha sido descrito en algunos trabajos realizados durante el siglo XX (Bergman, 1959; Clements, 1921), pero no fue hasta el desarrollo de los sistemas hidropónicos cuando se hicieron observaciones detalladas sobre el efecto del oxígeno disuelto en la solución, el cual lo utilizan para abastecerse con los nutrientes y el agua (Drew, 1997; Jackson, 1980; Zheng *et al.*, 2007). El oxígeno en el medio radicular es muy necesario para el desarrollo normal de las plantas, cuando por alguna circunstancia los niveles de dicho elemento disminuyen, la actividad respiratoria y metabólica son inhibidas afectando todos los procesos vitales que determinan su desarrollo y crecimiento (Chérif *et al.*, 1997). Cuando



están bien oxigenadas las raíces son capaces de absorber más selectivamente los iones de la solución debido a que requieren energía metabólica para este proceso y la respiración aeróbica es un proceso esencial que produce la energía requerida para el crecimiento radicular (Jackson, 1980).

El efecto del déficit de oxígeno sobre el crecimiento de las plantas está relacionado directamente con la inhibición del desarrollo radicular, produciendo una influencia negativa en el suministro de agua y nutrimentos, lo cual trae como consecuencia, decremento en la tasa de transpiración (Kramer, 1951), relacionada con la disminución de la permeabilidad de la raíz, dificultando la absorción de agua bajo condiciones de anoxia (Parson *et al*, 1974; Bradford *et al*, 1983). La condición de anaerobiosis hace que la sobrevivencia de los ápices radiculares esté limitada a unas pocas horas (Armstrong, 1983), porque la absorción de oxígeno por los ápices es mayor, hasta 4 veces más que en los tejidos elongados (Atwell *et al*, 1985).

Los ápices radiculares tienen alta demanda de energía para el crecimiento celular y la producción, por lo que tienen altas tasas de respiración y son muy vulnerables a la carencia de oxígeno, si las raíces apicales en crecimiento sufren deficiencias de oxígeno, se produce una escasez de calcio que aparece más rápidamente en los brotes, porque a diferencia de los otros nutrientes únicamente se absorbe por los ápices radiculares no suberizados, además de que por la inmovilidad del Ca no le permite moverse eficientemente desde las partes viejas a las más jóvenes, las regiones más sensibles son los puntos de crecimiento con bajas tasas de transpiración (ápices de hojas y frutos); produciendo desórdenes como la

quemadura de puntas (*tip burn*) y pudrición apical (*blossom-end rot*) que tienen incidencia más severa ante la falta de oxígeno (Armstrong y Kirkby, 1979).

Frecuentemente, el primer signo de una inadecuada oxigenación es el marchitamiento de la planta durante el medio día, cuando los niveles de temperatura y luminosidad son altos (Zheng *et al.*, 2007). Este marchitamiento está acompañado por una disminución en la fotosíntesis y transferencia de carbohidratos, por lo tanto el crecimiento de la planta disminuye y el rendimiento se ve afectado, cuando se superan las condiciones de estrés después del medio día cuando disminuye la luminosidad y temperatura las funciones metabólicas vuelven a funcionar normalmente. Si la falta de oxigenación continua, las deficiencias comenzarán a manifestarse, las raíces morirán y la planta no se desarrollará, incluso habrá disminución en la acumulación de materia seca (Kramer, 1951), se produce etileno el cual se acumula en la raíces y sus células se colapsan, también se eleva la síntesis de etileno en los brotes causándoles epinastia lo que da a la planta una apariencia de marchitez (Bradford y Yang, 1981; Camarena, 2006). Con la persistencia de la falta de oxígeno las plantas sufren de clorosis, abscisión prematura de hojas y flores, esto último como consecuencia de la acumulación de ácido abscísico que es la hormona responsable del envejecimiento prematuro y abscisión de la hoja y que se ha demostrado que está presente en grandes cantidades si la raíz está anegada (Jackson, 1980). Una vez que el deterioro de la raíz ha comenzado causado por las condiciones anaeróbicas, agentes patógenos oportunistas como *Pythium* spp atacan fácilmente y destruyen a la planta (Chérif *et al.*, 1997; Morgan, 2001).

En sistemas hidropónicos, no se le ha dado la importancia suficiente a la oxigenación radicular, debido a que ocasionalmente produce síntomas que son fácilmente identificables en el cultivo, pero que al término de la producción hay una disminución en el crecimiento y rendimiento vegetal (Morgan, 2001), esta dificultad de apreciación es porque en los sistemas NFT la SN no llegan a una anoxia total, sino que se mantiene un perfil de baja concentración de oxígeno disponible respecto a su concentración óptima durante periodos cortos (Morard y Silvestre, 1996). Se ha demostrado que muchos cultivos comerciales sobreviven y producen en una solución con concentraciones de oxígeno más bajas que las del aire que rodea las hojas (Resh, 2006), cuando esto sucede la planta busca otras fuentes de oxígeno, primero este puede ser transportado dentro de la planta de la parte superior hacia las raíces en caso de estrés, segundo, bajo condiciones de un inadecuado suministro de oxígeno externo, las tasas de absorción de nitrato y su reducción del tejido radicular tiende a aumentar, lo que provee una fuente interna de oxígeno atómico el cual puede ser utilizado en procesos metabólicos sustituyendo al oxígeno externo (Gilbert y Shive, 1942). El oxígeno es liberado cuando las plantas reducen los iones nitrato absorbidos y este oxígeno está disponible para ser utilizado por las células vegetales, sin embargo, las fuentes de oxígeno interno por sí solas son a corto plazo y no pueden proveer la suficiente cantidad de oxígeno requerido para sostener un buen crecimiento (Pepkowitz y Shive, 1944). En casos no severos de deficiencia de oxígeno, en plantas de tomate frecuentemente se producen raíces adventicias en la parte inferior del tallo y una hinchazón en la base; la planta trata de sobrevivir en condiciones inferiores a las ideales, si el estancamiento del agua continua, se forman raíces adventicias

en la parte inferior del tallo y alrededor de la parte superior del sistema radicular (sobre la línea de agua o condiciones de inundación), en un intento de regenerar un sistema radicular que está parcialmente muerto. De esta forma, las plantas pueden “recuperarse” del estancamiento de agua y continuar creciendo (Morgan, 2001; Vartapetian y Jackson, 1997).

Las raíces gruesas también son vulnerables a la falta de oxígeno, ellas consumen más oxígeno pero tienen menor área superficial para la absorción de gases. Si la aireación no es adecuada para un sistema radicular, gases tales como el etileno y dióxido de carbono que son productos de desecho producidos por las raíces no pueden difundirse y se acumulan en la zona radicular (Morgan, 2001).

En el reino vegetal pocas son las especies que pueden tolerar condiciones de anoxia, el más notable es el arroz y especies silvestres de ambientes húmedos. El mangle, por ejemplo, puede transportar oxígeno al sistema de raíces inundadas vía raíces que crecen hacia arriba fuera del agua. Sin embargo, la mayoría de los cultivos no caen dentro de esta categoría y se producen efectos severos cuando los niveles de oxígeno son bajos (Drew, 1997). Aprender a reconocer los síntomas producidos por condiciones anaeróbicas en la raíz es importante para cualquiera que esté involucrado en hidroponía, los síntomas producidos por baja oxigenación frecuentemente son atribuidos a otras fuentes (Morgan, 2001).

Una oxigenación inadecuada en la zona radicular disminuye la fotosíntesis y transferencia de carbohidratos cuando la temperatura y luminosidad son altos, por lo tanto el crecimiento de la planta disminuye y el rendimiento se ve afectado,

llegando a morir las raíces si la hipoxia se prolonga (Kramer, 1951), colapsándose las células y elevando la síntesis de hormonas del envejecimiento (Bradford y Yang, 1981; Jackson, 1980), en estas condiciones los nutrientes no pueden ser absorbidos en cantidades suficientes para soportar el crecimiento de la planta particularmente durante las condiciones de estrés.

#### **1.4.2. Factores que afectan el contenido de oxígeno disuelto en NFT**

En el sistema hidropónico de NFT, las raíces de las plantas obtienen oxígeno de la solución nutritiva y del ambiente por medio de la masa de raíces que no están sumergidas en la solución (Resh, 2006). En una situación ideal se tiene una película delgada de solución (3-5 mm de espesor) que fluye a lo largo del canal, esto permite que la mayor parte de raíces se sitúen sobre el líquido, las que quedan expuestas a la humedad del aire también pueden utilizar el oxígeno directamente del ambiente ya que este difunde a la raíz en forma similar como lo hace de la película delgada de agua (Morgan, 2001). La principal fuente de aireación en los canales de cultivo proviene de los orificios por donde el tallo de la planta emerge en el sistema, (Urrestarazu, 2004). Las soluciones nutritivas ofrecen oxígeno y agua a las plantas, si el sistema radicular estuviera rodeado sólo por un flujo de aire, la oxigenación sería plena debido a que la atmósfera contiene excelentes niveles de este gas. Sin embargo, las raíces también requieren agua y ésta es desafortunadamente una barrera efectiva para la difusión de gases como el oxígeno, dióxido de carbono y etileno. Durante algunos periodos del día la oxigenación de la solución es insuficiente y puede producir hipoxia temporal en

algunas condiciones críticas de metabolismo muy activo y temperaturas altas que generalmente se dan a medio día cuando la luminosidad y la temperatura es alta, hay baja incorporación de oxígeno a la SN por el aumento de temperatura y aumento de consumo de oxígeno por aumento de metabolismo de la planta que no les permite una respiración radicular óptima por la disminución de oxígeno en la SN, lo que inhibe absorción eficiente de los elementos nutritivos (Resh, 2006; Urrestarazu, 2004; Zheng, *et al.* 2007).

El problema de la baja incorporación de oxígeno a la SN es que la difusión de oxígeno del ambiente a las soluciones nutritivas es muy lenta (Jenkins *et al.*, 1983), a pesar de su abundancia relativa en el aire que es alrededor del 20.9 % (209 mL de oxígeno / litro de aire), pero por su baja solubilidad difunde escasamente, el oxígeno disuelto en agua es del 0.5 % (5.3 mL / L en volumen o en peso es menor 7.6 mg / L de agua) a 30 °C y a nivel del mar (Harcourt, 1987). En agua pura a 20 °C y a 1,500 metros sobre el nivel del mar contiene hasta 7.7 ppm de oxígeno disuelto, y si aumenta la temperatura su contenido es menor (ASTM, 1996).

El proceso de transferencia de oxígeno del aire hacia el agua ha sido descrito como un fenómeno que ocurre en tres etapas, en la primera las moléculas de gas son transferidas a la superficie del líquido resultando en condiciones de saturación o de equilibrio en la interfase, la velocidad de transferencia es muy rápida y la película de gas-líquido es muy fina, se ha estimado que tiene por lo menos tres moléculas de espesor; en la segunda etapa las moléculas atraviesan esta película por difusión molecular; en la tercera etapa el oxígeno se dispersa en el líquido por

difusión y convección (Eckenfelder y Ford, 1966). En condiciones de reposo o de flujo laminar, la masa de oxígeno transferida es controlada por la velocidad de renovación de la película que permanece constante (segunda etapa), el efecto de la turbulencia en el mecanismo de transferencia es crítico porque se produce una ruptura de la película y la masa de oxígeno transferida es controlada por la velocidad de renovación de la película (Metzger y Dubbin, 1967).

En los sistemas NFT la circulación de la SN es de flujo laminar, en donde la incorporación del oxígeno depende la interfase gas-líquido que es la que limita la difusión del oxígeno en la solución nutritiva (Jenkins *et al.*, 1983), y su incorporación depende de la facilidad de ingreso de este gas, y posteriormente de su velocidad de difusión en la solución acuosa que es extremadamente lenta ( $1.0 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Cole, 1989). Cuando la velocidad del flujo en un punto dado es constante se dice que tiene un régimen estable, en algún otro punto la velocidad puede ser diferente, pero todas las demás partículas que pasen por este segundo punto se comportan en este sitio exactamente como lo hizo la primera partícula cuando paso por ese punto, la trayectoria de flujo constante puede representarse por líneas de corriente (Wilson y Buffa, 2003). En un cambio de comportamiento de flujo de la SN puede haber una variación rápida sufriendo un cambio repentino de flujo; esa variación puede suceder por un cambio abrupto en la sección transversal de los canales, lo que hace que se produzca un salto hidráulico, que genera turbulencia en el régimen de circulación, pasando de un régimen subcrítico a uno supercrítico (Freire *et al.*, 2007; Fenton, 2007) y facilita la incorporación de aire al fluido en esa turbulencia ya que favorece los intercambios entre el aire y el



agua por la ruptura de la película de la interfase gas-líquido y la masa de aire con oxígeno que está en el ambiente la transfiere a la SN, mientras más agitada esté el agua mayor será el contenido de oxígeno disuelto ya que los coeficientes de difusión son altos en esas condiciones (Okubo, 1980). El salto hidráulico es el fenómeno físico que se produce en un canal cuando un flujo pasa de subcrítico a supercrítico, manifestándose una elevación brusca de la superficie del agua. Entre las dos profundidades se visualiza algún grado de turbulencia (salto), lo que indica que cierta cantidad de energía se está disipando (Fenton, 2007).

Otro factor que interviene en la oxigenación de la SN es la presión atmosférica, aunque el oxígeno se encuentra en el aire atmosférico en una proporción constante (Harcourt, 1987), independientemente de la altura sobre la presión a nivel del mar, a medida que desciende la presión atmosférica disminuye la presión parcial de oxígeno (aproximadamente el 21% de la presión total), por lo que la presión que ejerce el oxígeno hacia la solución es menor y por lo tanto disminuye el contenido de oxígeno con la altura. En condiciones de saturación, a nivel del mar a 20 °C de temperatura contiene 9.1 ppm, mientras que a 1500 msnm a esa misma temperatura tiene 7.7 ppm. En la relación de oxigenación de la SN es directamente proporcional a la presión, a mayor presión mayor concentración de oxígeno (ASTM, 1996). También influye en el oxígeno disuelto el contenido de las sales que están presentes en la solución, debido a que la solubilidad de un gas disminuye con el aumento de los sólidos disueltos, que se vuelve más evidente cuando la salinidad aumenta. Las sales disueltas en agua reducen los espacios intermoleculares disponibles para la disolución del oxígeno. El efecto de la

exclusión de oxígeno en función de la concentración de sales disueltas es mínimo excepto en ambientes hipersalinos (Harcout, 1987).

La temperatura es un factor que altera la concentración de oxígeno en agua, es inversamente proporcional con la temperatura debido a que a medida que aumenta la temperatura de la solución, la solubilidad del oxígeno disminuye (Sojka *et al.*, 1975). Se puede generalizar que a cualquier presión atmosférica, las aguas frías saturadas con oxígeno contienen una mayor cantidad de oxígeno disuelto que aguas tibias. Por ejemplo el oxígeno contenido en una solución aireada a 10 °C es de unas 13 ppm, pero a 20 °C la capacidad del líquido para mantener oxígeno disminuye 9-10 ppm, y si la solución alcanza los 30 °C, entonces el contenido de oxígeno es de solo 7 ppm (Luxmoore *et al.*, 1970, Morgan, 2001). No obstante, la relación inversa entre temperatura y la concentración de oxígeno disuelto puede verse alterada por efecto de los procesos de respiración (Morgan, 2001).

En una situación de aumento de temperatura en un cultivo hidropónico se conjuntan varios factores que afectaran a la planta, la respiración de las raíces se duplica por cada 10 °C que aumenta la temperatura hasta los 30 °C. (Luxmoore *et al.*, 1970, Morgan, 2001), si el estado fisiológico está en avanzada madurez de la cosecha, entonces, las necesidades de oxígeno por la planta será del doble, mientras que la capacidad de retener oxígeno por la solución será menor del 25%. Esto repercutirá en que la disminución del oxígeno disminuirá mucho más rápido y las plantas podrían sufrir inanición durante ese periodo de crisis (Morgan, 2001).

Otros factores importantes que afectan el contenido de oxígeno disuelto de las soluciones nutritivas se ha encontrado que son la pendiente del contenedor y el flujo de la solución nutritiva (Jenkins *et al.*, 1983), las turbulencias que se generan en el flujo de la SN favorecen los intercambios entre el aire y el agua, (Freire *et al.*, 2007), mientras más movimiento tenga el agua mayor será el contenido de oxígeno disuelto ya que los coeficientes de difusión se aumentan (Okubo, 1980). Maher (1977) encontró que incrementando el flujo, mejoraban las plantas y la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva. Se han reportado que con pendientes de 1 en 200, 100, 50 y 25, los rendimientos de tomate fueron 109, 117, 119 y 119 toneladas/acre respectivamente (Cooper, 1972). La reducción del rendimiento en los canales con menor pendiente puede deberse al efecto de embalse de la masa radicular, el cual puede conducir a un estancamiento de la solución nutritiva y regiones de bajo oxígeno disuelto. La pendiente de los canales recomendada oscila entre el 2 y 4 %, en esos rangos de inclinación permiten un flujo para que la absorción de agua y nutrientes sea óptima (Urrestarazu, 2004). En cultivos con técnica de flujo profundo aumentaron la tasa de respiración de las raíces, la absorción iones y agua cuando se aumentó la agitación y la velocidad de flujo de la solución, este aumento fue independiente del oxígeno disuelto, el mayor caudal de agua estimuló el crecimiento de las plantas de tomate en esta técnica de producción (Nakano, 2001).

En sistemas NFT es importante considerar el tipo de sección del canal de cultivo a utilizar, los canales con sección cóncava, obtenidos generalmente al cortar en forma longitudinal tubería de PVC, o las de tipo ondulado (laminas de asbesto),

dificultan el logro de una lámina fina circulante en el sistema y también la obtención de un sistema radicular expandido a lo ancho del canal de cultivo (Carrasco e Izquierdo, 1996), además de que al tener una base cóncava la lámina de nutrientes aumenta causando problemas fitosanitarios porque se estanca la SN, algunas raíces comienzan a morir y por la descomposición de la materia orgánica se favorece la presencia de patógenos (Urresterazu, 2004), es por eso que de preferencia, recomiendan emplear canales de sección rectangular que faciliten la obtención de la lámina de solución y la distribución transversal de las raíces y faciliten el intercambio gaseoso (Carrasco e Izquierdo, 1996).

La longitud de los canales de cultivo también juega un papel importante en el oxígeno de la SN, en canales largos se acentúa este fenómeno. La concentración de oxígeno disminuye en el extremo terminal del canal de cultivo, y las plantas localizadas en estas zonas son afectadas en crecimiento y desarrollo (Urresterazu, 2004). Por ejemplo, en un típico canal de NFT con un cultivo maduro de tomate bajo condiciones cálidas se percibe cómo se agotan los niveles de oxígeno. El sistema radicular de la planta de tomate necesita alrededor de 20 ml de oxígeno por hora para funcionar efectivamente, el flujo promedio de la solución es de 1-2 litros por minuto, en este el suministro de oxígeno se agota en 20-40 plantas (Hurd, 1978). Se supone que todas las raíces están sumergidas y que la solución nutritiva no absorbe oxígeno del aire cuando atraviesa el canal, pero en realidad la raíz no está totalmente sumergida y puede absorber oxígeno de la atmósfera por difusión a través de la película de humedad que cubre las raíces. Cuánto del sistema radicular está realmente sumergido, la oxigenación depende de la

pendiente y del ancho del canal. El oxígeno es absorbido conforme la solución atraviesa el canal, aunque la extensión depende del flujo promedio y el grado de turbulencia de la solución (Morgan, 2001).

#### **1.4.3. Demanda diferenciada de oxígeno en los cultivos**

Las especies hortícolas en general demandan en forma diferenciada la concentración de oxígeno disuelto en la SN (Urrestarazu, 2004), como regla general se conoce que la demanda radicular de oxígeno esta en relación con el tamaño y área foliar de la planta, las plantas pequeñas, como la lechuga tienen requerimientos relativamente bajos de oxígeno, mientras que las plantas grandes, que producen fruto como el tomate o el pepino tienen demandas mayores en la zona radicular, (Morgan, 2011) así como hay algunos cultivos que no tienen respuesta a la aireación como el maíz (Grandis *et al.*, 2011).

Existen muchos estudios en hidroponía, que se ha mostrado que el oxígeno deficiente en la SN afecta el crecimiento normal del tomate y pepino, el efecto principal que tiene en la fisiología de la planta es la mala absorción de nutrientes y agua, pero este fenómeno no se ha reportado en la lechuga que tenga el mismo problema en las mismas condiciones (Wees y Steward, 1987). Esto lleva a explicar que el cultivo de lechuga consume menos cantidad de oxígeno que las otras dos especies. El daño por carencia o poca cantidad de oxígeno en la zona radicular tiene muchas formas, éstas difieren en la severidad entre especies (Morgan, 2011). En los siguientes subcapítulos se describirá el comportamiento del

cultivo de jitomate y lechuga, dos especies representativas a la tolerancia y sensibilidad a la hipoxia que se presenta en los cultivos hidropónicos en solución NFT.

## **Tomate**

Se han realizado estudios en NFT que describen el comportamiento del oxígeno a lo largo de los canales en plantas maduras de tomate, se ha encontrado que el oxígeno contenido en la solución se agota conforme la solución pasa por las raíces de las plantas de tomate. El monitoreo periódico de la SN en varios puntos del canal durante el medio día, a una temperatura de 24.5°C (en una hilera de 32 plantas) con pendiente del 0.5 % y un flujo de solución de 2.2 litros/minuto. Las mediciones de oxígeno disuelto al inicio del canal fueron de 6.2 ppm y después de fluir por dieciséis plantas disminuyó a una concentración de 2.9 ppm, esto indicó una alta respiración de la raíz que utilizan el oxígeno de la SN, también se observó que el contenido de solución dentro de los canales siempre fue el más alto cuando el nivel del flujo de la SN era más elevado, eso ocurrió a los lados de las macetas que contenían las plantas. En forma paralela se midió el oxígeno en canales vacíos y el contenido fue mayor conforme mayor era la longitud recorrida por la SN debido a que la solución absorbió oxígeno del aire por tener mayor contacto con el ambiente, estos resultados resaltan la importancia del flujo y el ancho del canal (Gislerød y Kempton, 1983). Pero las plantas en los canales, utilizaron altas cantidades de oxígeno que el flujo de la SN no alcanzó a reintegrar los niveles de oxígeno. Además del alto consumo de oxígeno, las raíces del tomate son

sensibles a las bajas concentraciones de este gas, los efectos de la hipoxia se reflejan en la morfología y bajo crecimiento de las raíces, absorción de agua y nutrientes, aunque las sobresaturaciones de oxígeno también tuvieron efectos, aumentó la absorción de fosfatos y promovieron el tamaño y peso fresco y seco de tallos y hojas, así como aumentó el contenido de la concentración de fósforo en la savia, tallos y frutos (Goki *et al.*, 2001).

En experimentos realizados por Shi *et al.*, (2007) observaron que el efecto de niveles restringidos de oxigenación sobre el crecimiento de la planta y la estructura de la raíz, fueron la inhibición de crecimiento de las raíces y su respiración, esto último fue un proceso metabólico afectado muy importante. A concentraciones menores de 1 ppm (mg/l); el efecto en el crecimiento de la planta y el deterioro de la raíz es severo y extenso, la infección por *Pythium* también pudo observarse debido a que la mayoría de las plantas comenzaron a marchitarse en días soleados (Chérif *et al.*, 1997). Después de algún tiempo con esas concentraciones de oxígeno las plantas trataron de recuperarse produciendo nuevas raíces que crecieron en la parte superior de la masa radicular antigua en la parte aérea. Estas nuevas raíces, probablemente tomaron la función de absorción de oxígeno del aire que se encuentra sobre la solución nutritiva, después de la aparición de esas raíces las plantas dejaron de marchitarse en días soleados. A pesar de esa conformación a bajos niveles de oxígeno en la solución, el crecimiento en la parte aérea (y el rendimiento) no recuperó su crecimiento comparado con los tratamientos controles que tuvieron niveles de oxígeno de 7.6% (Gislerød y Kempton, 1983).

Algunos investigadores que han estudiado el efecto de la concentración de oxígeno y el desarrollo de síntomas de enfermedades han establecido una correlación entre la oxigenación inadecuada y gravedad de los síntomas de la enfermedad (Brown y Kennedy, 1996), a concentraciones del 0.8 al 1.5 % de oxígeno las raíces son altamente susceptibles (Brown y Kennedy, 1966; Chérif *et al.*, 1997), mientras que con más del 4.0 % de oxígeno no se enferma la planta (Brown y Kennedy, 1966), incluso en plantas a las que se ha inoculado *Pythium* las plantas permanecieron sanas durante todo el experimento y mostraron una disminución significativa en la colonización de las raíces por el patógeno cuando la SN contenía de 11 al 14 % de oxígeno (Chérif *et al.*, 1997).

Hay reportes que muestran que niveles de oxígeno menores de 5 ppm afectan severamente el crecimiento de las plantas (Erickson, 1946); sin embargo, en ensayos de Gislerød y Kempton (1983) esos niveles no tenían efectos muy negativos a esa concentración, incluso niveles tan bajos como 1 ppm, las plantas crecieron y produjeron frutos, aunque los rendimientos fueron bajos. Esto enfatiza la capacidad de las plantas a ajustarse a las condiciones del canal y utilizar oxígeno atmosférico, donde las nuevas raíces aéreas cumplían esa función. Las plantas de pepino tienen la habilidad de producir raíces adventicias a través de los lados de los bloques de propagación o macetas y sobre el nivel de la solución poco oxigenada durante largos períodos de escasez de oxígeno similares a las plantas de tomate.

Se han realizado muchos estudios sobre los niveles bajos de oxígeno en la SN nutritiva que afecta negativamente la producción, sin embargo poco se sabe sobre



el efecto de elevadas concentraciones en la zona de la raíz. Zheng *et al.*, (2006) trabajaron con plántulas de tomate que tenían concentraciones de oxígeno disuelto en la SN de 5.3, 20, 30 y 40.0 mg/L por cuatro semanas. No hubo diferencias visibles en hojas y tallos entre los tratamientos en el periodo inicial del experimento, sin embargo la cantidad de clorofila fue mayor en el tratamiento de 40 mg/L. A las dos semanas de iniciado el experimento las plantas tuvieron menor estatura, tallos con mayor engrosamiento y raíces más delgadas comparados con los otros tratamientos. El peso fresco y seco de las raíces, tallos, hojas y área foliar fueron significativamente menores en el de mayor concentración con respecto a los otros. La respiración aumentó linealmente con el aumento de concentración de oxígeno. La mejor respuesta de rendimientos fue el tratamiento con 30 mg/L. Los resultados sugieren que ese es el límite de seguridad para enriquecimiento de oxígeno en la SN para una buena respuesta productiva.

## **Lechuga**

En el cultivo de lechuga el comportamiento del oxígeno disuelto en la SN tiene resultados muy diferentes a los del tomate. Las plántulas trasplantadas a canales de 20 m de longitud con pendientes de 0.5 % que contenían 35 plantas y temperatura de la solución de 20 a 22°C se tuvieron lecturas de oxígeno disuelto en el inicio de los canales, cerca de la primera planta fue alrededor de 4.5-4.6 ppm lo cual representaba sólo el 53% de saturación. A 10 m del canal (punto medio), la lectura fue de a 3.1 ppm. En las últimas plantas de los canales a la salida de los contenedores, las lecturas de oxígeno fueron de 1.8-2.7 ppm. En el canal de

retorno donde ocurre la mayor aireación, los niveles recuperaron oxígeno y alcanzaron 5.2 ppm. Las lecturas registradas en el tanque fueron 7.9 ppm que corresponde al 92% de saturación. Las variaciones del oxígeno en la SN no afectaron la producción ni pusieron en peligro la producción de la lechuga (Gislerød y Kempton, 1983).

En cultivo de plantas maduras de lechuga (var Red Oakleaf) se ha observado que los niveles promedio de oxígeno a la entrada de los canales fue 6.0-6.4 ppm (69-73% de saturación) a una temperatura de la solución de 21.7°C. Al extremo final de los canales de cultivo, la caída de los niveles de oxígeno no fue significativa a pesar que el flujo de la solución tuvo que pasar por un gran número de plantas. No realizaron mediciones en el interior de cada canal. En el punto de salida de la SN de los contenedores donde ocurre la reoxigenación, se obtuvieron lecturas de 8.0 ppm (92% de saturación). Estos resultados le indicaron que en la lechuga madura, los niveles de respiración radicular no aumentaron en gran medida, ya que los niveles de oxígeno son similares que en la entrada, no bajan a niveles que puedan afectar negativamente el crecimiento de la planta, este comportamiento fue similar en días cálidos (Morgan, 2001).

En otros experimentos realizados por Goto *et al.*, (1996) estudiaron el efecto del oxígeno disuelto en el crecimiento de lechugas (var Ostinata), pero en un sistema hidropónico flotante. Se suministraron combinaciones de oxígeno y nitrógeno puros para el control preciso de oxígeno. En este sistema inyectó a la SN la combinación de los gases por medio del burbujeo en el agua por 35 días, durante su etapa de crecimiento teniendo concentraciones de oxígeno subsaturadas (2.1

ppm o 25 % de saturación), saturadas (4.2 ppm o 50 % de saturación) y sobresaturadas (16.8 ppm o 200 % de saturación). En los rendimientos no hubo diferencias significativas en el peso fresco, brotes y las raíces, así como tampoco hubo diferencias significativas en el peso seco. El crecimiento de las plantas en condiciones subsaturadas tampoco se observaron daño de raíces, ni retraso de crecimiento de brotes, aunque esta concentración de oxígeno está considerada por algunos autores como concentración crítica para causar daño en el desarrollo de la planta. Los datos anteriores les indicaron que las concentraciones de oxígeno no son limitantes para la producción comercial de las lechugas.

Sin embargo Yoshida (1997) suministró por 7 días oxígeno (concentraciones de 0.01, 0.10 y 0.20 mmoles) a plantas de lechuga en cultivo hidropónico y tuvo resultados con diferencias mínimas entre las dos últimas concentraciones, pero en los de concentración más baja los rendimientos estuvieron significativamente por debajo de los tratamientos con 0.1 y 0.2 mmoles de oxígeno, teniendo la menor producción en la concentración más baja de oxígeno, que en esta concentración hubo menor contenido de agua en las hojas por lo que los resultados les sugieren que la pérdida de turgencia fue causada por la disminución de absorción de agua por la raíz.

La concentración de sales influye en el crecimiento de lechugas en un sistema flotante. En cultivos de Lechuga (var Justine), se agregaron diferentes concentraciones de NaCl (0, 10, 20 y 30 mmol por litro) a la SN estándar, en tratamientos con inyección de oxígeno y sin oxígeno. El peso fresco y seco de la cabeza y la raíz, la longitud de la raíz, diámetro de la cabeza y el contenido de

nitratos de la hoja y clorofila fueron diferentes por la concentración de sales y por la aireación de la solución. Cuando la solución no se aireó la producción tuvo efecto negativo más drástico a diferencia de las que estuvieron aireadas, esto dos factores de salinidad y oxigenación mostraron interacciones (Tesi *et al.*, 2003) por lo que no se pudo saber que factor fue el responsable de mejor producción, aunque estos resultados podrían también analizarse desde un punto de vista de sensibilidad a la salinidad de las raíces que a la oxigenación de la SN.

## CAPÍTULO 2

### OXIGENACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LECHUGA EN SISTEMA HIDROPONICO RECIRCULANTE POR EFECTO DE LA PENDIENTE Y SALTOS HIDRAULICOS

#### 2.1 Resumen

La baja concentración de oxígeno disuelto (OD) en la solución nutritiva (SN) puede llegar a producir hipoxia y ser una limitante en la producción de cultivos hidropónicos, ya que afecta la absorción de agua y nutrientes de la planta. La oxigenación de la SN puede servir como fuente de oxígeno para las raíces y mejorar la respiración radicular. Para evaluar la incorporación de oxígeno en la SN se utilizaron contenedores de 24 m de longitud con pendientes del 2 y 4 %; con cero, uno, dos y tres saltos hidráulicos distribuidos uniformemente a lo largo del canal. El efecto de la oxigenación se midió en el peso fresco de la planta, hojas, tallo y raíces y peso seco de hojas y raíz en cultivo de lechuga. El modelo experimental utilizado fue completamente aleatorizado con arreglo factorial 4 x 2, con 4 repeticiones. La saturación de la SN a las 9:00 estuvo arriba del 95 %, a las 13:00 fue la concentración más baja (49-84 %) y en la tarde entre 82 y 91 %. No hubo diferencias de saturación ( $P>0.05$ ) para los canales con 2 y 4 % ( $82.2\pm 1.2$  y  $82.1\pm 1.2$  respectivamente). Hubo diferencias ( $P<0.05$ ) de OD en el número de saltos hidráulicos para las dos pendientes con diferencias más marcadas a las 13:00. El peso fresco de hojas y tallos fueron mayores ( $P<0.05$ ) en los canales con

el 4 % de pendiente y 3 saltos hidráulicos con respecto a los demás tratamientos que no tuvieron diferencias, en el peso seco esas mismas plantas tuvieron diferencias ( $P < 0.05$ ) en la raíz con respecto a los demás tratamientos. Los resultados sugieren que las plantas de lechuga no sufren anaerobiosis en nuestras condiciones que impidan su ganancia de peso seco, y que el mayor peso es por retención de agua.

Palabras clave: Lechuga, oxigenación radicular, pendiente, salto hidráulico, hipoxia

## **2.2. Abstract**

Low concentration of dissolved oxygen (DO) in the nutrient solution (NS) can produce hypoxia and be a limiting factor in the yield of hydroponic crops, affecting the absorption of water and nutrients by plants. The oxygenation of the NS can use as a source of oxygen to roots and improve roots respiration. To evaluate the incorporation of oxygen in the NS we used containers 24 m long with slopes of 2 and 4% with zero, one, two and three hydraulic jumps uniformly distributed along the channel. The effect of oxygenation was measured in fresh weight of plants, leaves, stem and root dry weight of leaves and root in lettuce crop. The experimental model used was completely randomized with 4 x 2 factorial arrangement with 4 replications. The saturation of the NS at 9:00 was up 95%, at 13:00 was the lowest concentration (49-84%) and in the afternoon between 82 and 91%. Saturation did not differ ( $P > 0.05$ ) for channels with 2 and 4% of slope ( $82.2 \pm 1.2$  and  $82.1 \pm 1.2$  respectively). There were differences ( $P < 0.05$ ) DO in the

number of hydraulic jumps for the two most striking differences outstanding at 13:00. Fresh weight yields of leaves and stems were higher ( $P < 0.05$ ) in channels with 4% slope and 3 hydraulic jumps over other treatments did not differ in the same plant dry weight differed ( $P < 0.05$ ) in the root compared to other treatments. The results suggest that the lettuce plants do not suffer anaerobiosis in our conditions to inhibit their dry weight gain, and that the greatest weight is because of water retention.

Key words: Lettuce, root oxygenation, slope, hydraulic jump, hypoxia

### **2.3. Introducción**

Para el desarrollo saludable de las plantas, es necesario que el oxígeno esté en concentraciones adecuadas en el medio radicular (Zheng *et al.*, 2007), cuando los niveles de dicho elemento disminuyen, la actividad respiratoria y metabólica son inhibidas afectando procesos vitales que determinan su desarrollo y crecimiento (Chérif *et al.*, 1997). El déficit de oxígeno está relacionado con la disminución de la productividad de las plantas (Zheng *et al.* 2007), porque influye negativamente en el desarrollo radicular disminuyendo el suministro de agua porque dificulta su absorción y de los nutrimentos bajo condiciones de anoxia (Parson *et al.*, 1974; Bradford *et al.*, 1983, Chérif *et al.*, 1997).

En un sistema hidropónico de película nutritiva recirculante (Nutrient Film Technique, NFT), uno de los problemas que se presentan a menudo es la aireación insuficiente de la solución (Urrestarazu, 2004; Resh, 2006; Zheng *et al.*,

2007), en estos sistemas las raíces de las plantas obtienen oxígeno de la solución nutritiva y del aire con las raíces que no están sumergidas en la solución (Resh, 2006). En una situación ideal de NFT la película de solución (1-2 mm de espesor) que fluye a lo largo del canal, permite que la raíz se sitúe sobre el líquido y absorban el oxígeno de la solución nutritiva, mientras que las raíces expuestas a la humedad del aire utilicen el oxígeno directamente del aire, en forma similar como lo hace de la película de agua (Morgan, 2000). Sin embargo, estas condiciones se dan solamente en un periodo corto del cultivo, conforme crece la masa radicular, el flujo de nutrientes se vuelve más lento y el nivel del líquido aumenta, particularmente en contenedores largos, (Gilbert y Shive, 1942). En algunos casos el estrés por oxígeno depende de la especie porque en especies de bajo consumo como la lechuga no se presenta este fenómeno (Morgan, 2000).

Se ha reportado que la pendiente del contenedor influye en la producción, y que el aumento de inclinación aumenta el rendimiento (Cooper, 1972), en tomate se ha documentado un aumento en la producción del fruto en contenedores con el 4 % de pendiente comparado con contenedores con el 2 % de inclinación (López-Pozos *et al.*, 2011). La velocidad del flujo de la solución nutritiva es un factor en la oxigenación de la solución (Jenkins *et al.*, 1983). Maher (1977) encontró que incrementando la velocidad del flujo aumentaba la concentración de oxígeno disuelto en la solución y el desarrollo de las plantas. Los saltos hidráulicos que son interrupciones en la estratigrafía de los flujos (Freire *et al.*, 2007) también favorecen la difusión del aire hacia el agua, (Okubo, 1980) por las turbulencias que se generan en el líquido (Freire *et al.*, 2007).



Por lo anterior, este trabajo de investigación tuvo como objetivo conocer el efecto que tiene la pendiente y los saltos hidráulicos en la oxigenación de la solución nutritiva y la producción de lechuga en sistema hidropónico recirculante.

#### **2.4. Materiales Y Métodos**

El cultivo se desarrolló entre el 15 de agosto y 15 de diciembre del 2008, en un invernadero tipo túnel con cubierta plástica blanca al 25 % de sombra y ventilación cenital, en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, ubicado en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Se localizó a los 17° 01' 31.45" de latitud norte y 96° 43' 12.07" de longitud oeste, a una altitud de 1526 msnm (INEGI, 1997). La temperatura dentro del invernadero durante el periodo del cultivo se mantuvo entre 9 °C y 42 °C.

Se sembraron las semillas de lechuga (*L sativa* L.) c.v. Satine en cubos de *foamy* de 3 x 3 x 9 cm. Se regó el semillero con agua los primeros 5 días y posteriormente con solución nutritiva hasta que tuvieron 7 cm de longitud y de 3 a 4 hojas cada planta. El trasplante se realizó en los contenedores a los 35 días de edad a una densidad de 15 plantas m<sup>-2</sup> con separación entre plantas de 20 cm. Se utilizó un sistema hidropónico con técnica de cultivo de flujo laminar de nutrientes (NFT) recirculante. Como contenedores se utilizaron tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 24 metros de longitud. Los tratamientos fueron: número de discontinuidades en el nivel del contenedor (saltos hidráulicos) con 0, 1, 2 y 3 interrupciones a lo largo de los contenedores. Cada interrupción del flujo fue el

cambio de nivel de 5 cm del contenedor para formar un salto hidráulico. El otro factor de estudio fue la pendiente de los contenedores con el 2 y 4 % (1 y 2 metros en 50 respectivamente). El modelo experimental utilizado fue completamente aleatorizado con arreglo factorial 4 saltos hidráulicos x 2 pendientes, con 4 repeticiones.

La solución nutritiva utilizada fue la propuesta por Steiner (1961) y modificada por Urrestarazu, (2004), el pH y la conductividad eléctrica (CE) fueron monitoreados diariamente y se mantuvieron entre 6.5 y 7.0 para pH y 1.4 - 2.5  $\text{dSm}^{-1}$  y 1.4  $\text{dSm}^{-1}$  para conductividad, cuando esta última disminuyó a 0.8  $\text{dSm}^{-1}$  se reemplazó por solución nutritiva nueva.

La solución se recuperó al final de los contenedores para la recirculación en el sistema. El flujo de la solución en cada contenedor fue de 3  $\text{L min}^{-1}$  (Urrestarazu, 2004). Los riegos fueron intermitentes cada 10 minutos de riego por 10 minutos sin riego.

El oxígeno disuelto y la temperatura se midieron con un oxímetro marca Hanna, Mod. HI 9146. Las mediciones se hicieron en las entradas y en la rizósfera de la planta (Unidad experimental). Las lecturas se realizaron a la 9:00, 13:00 y 18:00 horas. Para el pH se utilizó un pH-metro Marca Hanna, Mod. HI 9811-5. Las mediciones se hicieron en las caídas de SN en los contenedores.

La toma de datos de los parámetros productivos se efectuó cuando se realizó la cosecha. Se tomó el peso fresco de la planta, hojas y tallo; peso seco de hojas y raíces y volumen de raíces. El peso fresco se obtuvo al sacar la planta completa

del contenedor, se pesó en una balanza Ohaus de  $2,610 \pm 0.1$  g de capacidad, posteriormente se deshojó completamente cada planta y se pesó el total de hojas por planta, el tallo se separó de la raíz y se pesó cada uno por separado. Para el volumen de la raíz se introdujo en un vaso de precipitados de un litro de capacidad, que previamente fue llenado con 500 ml de agua y el desplazamiento del agua fue el volumen de las raíces. El peso seco de hojas, tallos y raíces se determinó al secarlos en un horno de convección a  $75^{\circ}\text{C}$  por 72 horas o hasta que alcanzaron un peso constante (AOAC, 1975).

## **2.5. Resultados y Discusión**

El contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva varió a través del día como puede observarse en la Cuadro 1, la saturación más alta fue durante la mañana en todos los contenedores con valores muy cercanos al 100 %, mientras que a las 13:00 horas fue el periodo en que la SN tuvo entre 49 y 79 % la concentración de oxígeno disuelto. Estos resultados son similares a los encontrados por Urrestarazu *et al.*, (2005) y López-Pozos *et al.*, (2011), en donde la mínima concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva fue después de medio día, o durante la mayor intensidad luminosa del día (Gislerød y Adams, 1983). En la tarde al disminuir la temperatura, el oxígeno disuelto en la SN vuelve a aumentar alrededor del 90 %.

La comparación de la concentración de oxígeno disuelto en la SN por el efecto de la pendiente del 2 y 4 % no mostraron diferencias, ( $P > 0.05$ ) con una media de

saturación de oxígeno en la SN para los canales con 2 % de pendiente de  $82.2 \% \pm 1.2$  y para los canales con el 4 % de pendiente  $82.1 \% \pm 1.2$  de saturación. En el comparativo de oxígeno en la SN por el efecto del número de saltos hidráulicos que tenía cada contenedor encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) los contenedores con el 4 % de pendiente, mientras mayor fue el número de saltos hidráulicos la concentración de oxígeno fue mayor, este efecto fue más evidente a las 13:00 horas, cuando la temperatura de la solución fue más alta y tuvo su concentración más baja de oxígeno disuelto. Los saltos hidráulicos influyeron directamente en la oxigenación de la SN, con cero y un salto hidráulicos la SN tuvo el 65.3 y 49.8 % de oxígeno disuelto respectivamente, mientras los que tuvieron dos y tres saltos hidráulicos la saturación de la SN aumentó al 84.5 y 78.3 % respectivamente. La disminución del oxígeno por el aumento de temperatura en las soluciones acuosas es un fenómeno ya estudiado y caracterizado (ASTM, 1996; Sojka *et al.*, 1975; Yoshida *et al.*, 1997), y hay una alta correlación entre el déficit del oxígeno y el aumento de la temperatura (Gislerød y Adams, 1983), además de que también incide el aumento de la actividad metabólica en el aumento del consumo de oxígeno por la raíz y su disminución en la concentración de oxígeno disuelto en la SN (Morgan, 2000).

El Cuadro 1 muestra que a las 9:00 horas la temperatura de la SN disminuyó conforme el número de saltos hidráulicos fue mayor, mientras que a las 13:00 y 18:00 aumentó paulatinamente la temperatura. Este comportamiento responde al equilibrio de la temperatura de la SN y el ambiente (Chanson, 2004; Moncrieff, 1981), durante la mañana cuando la temperatura del aire es más fría, con las

caídas y la formación de turbulencias baja la temperatura de la solución nutritiva, a las 13 y 18 horas la temperatura ambiental es más alta que en la SN y hace que aumente (datos no mostrados).

Los datos registrados de peso fresco de la planta, peso fresco de las hojas, peso fresco de tallos y peso fresco de raíces pueden observarse en el Cuadro 2. No hubo diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) al comparar el peso de las plantas de los contenedores con el 2 y 4 % de pendiente, este comportamiento fue contrario a lo observado por Maher (1977) en jitomate, cuando aumentó el flujo de la SN mejoró la producción. En la comparación de estos parámetros pero de acuerdo al número de saltos hidráulicos en cada contenedor el rendimiento fue diferente ( $P < 0.05$ ) únicamente para las plantas del contenedor con pendiente del 4 % y con tres saltos hidráulicos con respecto a los demás tratamientos. El peso de las plantas, hojas y tallos fue mayor del 60 % en las plantas del contenedor con el 4 % de pendiente y tres saltos hidráulicos con respecto a los otros tratamientos, Yoshida *et al* (1997) reportó que el crecimiento de la planta es menor cuando la concentración de oxígeno disuelto es menor, sin embargo Goto *et al* (1997) no encontraron diferencias en peso fresco de las hojas, brotes y raíces en diferentes concentraciones de oxígeno disuelto cuando fue mayor a  $2.1 \text{ mg L}^{-1}$ , y en nuestras condiciones al 50 % de saturación la concentración de oxígeno fue de  $3.1 \text{ mg L}^{-1}$ . En nuestro estudio tampoco se encontraron diferencias en peso seco excepto para la raíz (Cuadro 3) que nos muestra que la planta no cambia el patrón de crecimiento por las variaciones del oxígeno disuelto en la SN por consecuencia de estrés por anaerobiosis, además de que la lechuga está catalogada como una

especie de bajos requerimientos de oxigenación radicular por el bajo metabolismo que presentan estas plantas durante el crecimiento vegetativo (Resh, 2006; Morgan, 2000). Es importante considerar los contenedores con el 4 % de pendiente y con tres saltos hidráulicos el peso de las plantas fue mayor, pero el aumento fue por el mayor contenido de agua en las hojas y tallos, estos órganos son de importancia desde el punto de vista económico ya que es la forma en que se consume y de esta manera podría justificarse el uso del contenedor y pendiente para la producción de lechuga.

El estado general de la planta fue sano en todos los tratamientos, sin observarse ningún tipo de ataque por *Pythium* spp, este patógeno causa deterioro de la raíz cuando hay condiciones anaeróbicas pueden atacar fácilmente y destruir a la planta (Morgan, 2000), por lo que se puede tomar como un indicador de estrés de la planta por condiciones anaeróbicas, (Chérif *et al.*,1997)

## **2.6. Conclusiones**

La pendiente del 2 y 4 % de los contenedores no influyó en la oxigenación de la solución nutritiva como tampoco en el rendimiento representado por el peso fresco de la lechuga.

El número de saltos hidráulicos que tuvo cada contenedor influyó parcialmente en la oxigenación de la solución nutritiva, en la mañana y en la tarde no hubo efecto, pero en el periodo más caluroso del día hubo menos oxígeno disuelto en donde hubo menos saltos hidráulicos.

La oxigenación de la solución nutritiva no afectó el rendimiento en el peso seco de la lechuga y en el peso fresco de la parte aérea fue mayor con tres saltos hidráulicos y 4 % de pendiente.

## **2.7. Literatura Citada**

ASTM D888-92. 1996. Método Estándar para la Determinación de Oxígeno Disuelto en Agua. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org).

Bradford, K. 1983. Effects of sell flooding on leaf gas exchange of tomato plants. *Plant Physiol.* 73:475-479.

Chanson, H. 2004. Enviromental hydraulics of open channel flows. Elsevier Butterworth-Heine nann. Oxford. U. K.pp 430

Chérif, M., Tirilly, Y., Bélanger, R.R. 1997. Effect of oxygen concentration on plant growth, lipidperoxidation, and receptivity of tomato roots to pythium under hydroponic conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 103, 255–264.

Cooper, A. J. 1972. The influence of container volume, solution concentration, pH and aeration on dry matter partition by tomato plants in water culture. *J. Hort. Sci.* 47: 341-347

Freire, D., Varela, J., Cabeza, C., Mart, A. C., Sarasa, L. G., Bove, I., Usera, G., Montagne, R.and M. Araujo. 2007. Dinámica de Flujos estratificados sobre

obstáculos pronunciados. X Reunión de la Sociedad Uruguaya de Física.  
Carmelo, Uruguay. p. 12

Gilbert, S. G., Shive, J. W. 1942. The significance of oxygen in nutrient substrates for plants: The oxygen requirement. *Soil Science*. 59: 143-152.

Gislerød, H.R., and P. Adams. 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Hort*. 21, 311-321.

Goto, E., Both, A.J., Albright, L.D., Langhans, R.W., Leed, A.R. 1996. Effect of Dissolved Oxygen Concentration on Lettuce Growth in Floating Hydroponics. *Acta Hort*. (ISHS) 440:205-210

INEGI. (1997). Fisiografía de Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística, geografía e Informática. México. Página web:  
<http://www.inegi.gob.mx/territorio/espanol/estados/oas/fisio.html>.

Jenkins, D., Snoeyink, V. L., Ferguson, J. F., Leckie, J. 1983. Química del agua. Manual del laboratorio. Ed. Limusa. México. pp. 178.

López-Pozos, R., Martínez-Gutiérrez G. A.; Pérez-Pacheco, R., Urrestarazu, M. 2011. The effects of slope and channel nutrient Solution Gap number on the yield of tomato crops by an NFT system under a Warm Climate. *HortScience*. Vol. 46. (5) 727-729



- Maher, M. J. 1977. The use of hydroponics for the production of glasshouse tomatoes in Ireland. Proc. 4th. Int. Soilless Culture. I.W.O.S.C. Las Palmas. pp. 161-169.
- Morgan, L. 2000. Are your plants suffocating? Practical Hydroponics & Greenhouses. 52: 64
- Moncrieff, M. 1981. A theory of organized steady convection and its transport properties. Quart, J. R. Met. Soc. 107: 29-50
- Okubo, A. 1980. Diffusion and ecological problems: Mathematical Models. Springer. New York. USA.
- Parson, L., Kramer, P. 1974. Diurnal cycling in root resistance to water movement. Physiol. Plant. 30: 19-23.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. 5<sup>a</sup> ed. España. pp. 558.
- Sojka, R., Stolzy, L., Kaufmann, M. 1975. Wheat growth related to rhizosphere temperature and oxygen levels. Agron. J. 67:591595.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing solutions of certain desired composition. Plant Soil. 15: 134-154.
- Urrestarazu, M., P.C. Mazuela, A. Boukhalfa, A. Arán, and M.C. Salas. 2005. Oxygen Content and its Diurnal Variation in a New Recirculating Water Soilless Culture for Horticultural Crops, HortScience 40:1729-1730.

Urrestarazu, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa, Almería. España.  
pp. 914.

Yoshida, S., Kitano, M., Eguchi, H. 1997. Growth of Lettuce Plants (*Lactuca Sativa* L.) Under Control Of Dissolved O<sub>2</sub> Concentration in Hydroponics. *Biotronics* 26, 39-45.

Zheng, Y., Wang, L., Dixon, M. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae* 113: 162–165

Cuadro 2.1. Temperatura de la solución nutritiva y oxígeno disuelto en el canal de NFT vs el tratamiento a diferentes horas del día.

Pendiente	Salto	Temperatura °C			Oxígeno Disuelto %		
		9:00	13:00	18:00	9:00	13:00	18:00
4	Hidráulic 0	23.6 c	26.0 b	26.3a	102.7ab	65.3 b	84.2ab
	1	23.0 c	24.5a	26.4a	100.0ab	49.8a	82.3a
	2	20.4 b	27.6 c	28.0 b	104.0 b	84.5 c	91.6 b
	3	17.6a	27.1 bc	28.0 b	97.2a	78.3 c	89.3ab
2	0	23.5 c	25.5a	26.5a	104.6a	61.1a	88.3a
	1	23.9 c	25.1a	26.8a	98.8a	56.5a	86.8a
	2	21.3 b	27.1 b	27.3ab	96.2a	79.1 b	89.9a
	3	18.9a	27.1 b	28.2 b	98.8a	79.1 b	90.1a
Significancia		**	**	**	*	*	*

\*\* Significancia a  $P < 0.01$ . La letra indica una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre la pendiente y los saltos hidráulicos determinados por ANOVA multifactorial usando la prueba de Tukey. Todos los datos son el promedio de 4 repeticiones a la mitad de ciclo del cultivo.

Cuadro 2.2. Rendimientos de la lechuga en peso fresco según la pendiente y el número de saltos hidráulicos

Pendiente	Saltos hidráulicos	Planta		Hoja		Tallo		Raíz	
		(g)	EE	(g)	EE	(g)	EE	(g)	EE
4 %	0	85.5 a	12.2	78.1 a	11.1	5.3 a	1.8	36.9 a	3.3
	1	85.2 a	12.2	81.1 a	11.1	5.1 a	1.8	36.9 a	3.3
	2	83.7 a	14.1	73.0 a	12.8	6.9 a	2.1	36.0 a	3.8
	3	153.8 b	14.1	131.8 b	12.8	21.2 b	2.1	47.0 a	3.8
2 %	0	111.4 a	11.1	100.7 a	10.3	13.2 a	1.9	39.1 a	2.7
	1	117.1 a	11.1	110.1 a	10.3	7.9 a	1.9	37.9 a	2.7
	2	100.5 a	12.9	88.9 a	11.9	8.1 a	2.2	34.9 a	3.2
	3	91.3 a	11.1	80.9 a	10.3	10.4 a	2.9	30.5 a	2.7
		*		*		**		*	

\*\* Significancia a  $P < 0.01$ . La letra indica una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre la pendiente y los saltos hidráulicos determinados por ANOVA multifactorial usando la prueba de Tukey. Todos los datos son el promedio de 4 repeticiones a la mitad de ciclo del cultivo.

Cuadro 2.3. Rendimientos de la lechuga en peso seco según la pendiente y el número de saltos hidráulicos

Pendiente	Tratamiento	Peso Seco Hoja		Peso Seco Raíz	
		Prom. (g)	EE	Prom. (g)	EE
4 %	0	4.7 a	0.5	0.9 a	0.1
	1	4.7 a	0.5	1.4 ab	0.1
	2	4.7 a	0.6	1.0 a	0.2
	3	6.6 a	0.6	1.8 b	0.2
2 %	0	6.2 a	0.7	1.1 a	0.1
	1	6.9 a	0.8	1.3 a	0.1
	2	4.6 a	0.8	1.2 a	0.2
	3	4.9 a	0.7	1.1 a	0.1

\*

\*\*

\*\* Significancia a  $P < 0.01$ . La letra indica una diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre la pendiente y los saltos hidráulicos determinados por ANOVA multifactorial usando la prueba de Tukey. Todos los datos son el promedio de 4 repeticiones a la mitad de ciclo del cultivo.

## CAPÍTULO 3

### **The Effects of Slope and Channel Nutrient Solution Gap Number on the Yield of Tomato Crops by an NFT System under a Warm Climate.**

Los efectos de la pendiente y número de saltos hidráulicos en los canales de solución nutritiva en el rendimiento de los cultivos de tomate en un sistema NFT en un clima cálido.

#### **3.1. Abstract.**

Inadequate oxygenation of the nutrient solution (NS) in recirculating hydroponic systems leads to root hypoxia in several plants due to low oxygen solubility, and this is most notable in warm climates. Hypoxia affects crop nutrient and water absorption and results in reduced crop yield. However, increased air supply to the NS serves as a source of oxygen for the roots. To evaluate the incorporation of oxygen into the system, we varied the slope of 24-m long containers from 2 to 4%, and applied zero, one, two or three gaps of NS. The channel width measured 10 cm and were equidistant from the endpoints. The effect of the dissolved oxygen in the NS was measured by the production of a tomato cultivar. The oxygen dissolved in the NS was 5% greater in the channels with a 4% slope compared to those with a 2% slope. The channels that included the gaps incorporated a higher quantity of dissolved oxygen during cultivation. In the middle of the day, the available oxygen was the limiting factor for the yield. The best results were

**obtained with a steeper slope, and gaps also improved the tomato yield. More rapid changes in NS were associated with a higher quantity of dissolved oxygen.**

*Additional index words.* Tomato, NFT, root oxygenation, slope, hypoxia

### 3.2. Introduction

A plant's roots must find oxygen in their immediate environment (Drew, 1983; 1992; 1997). Early studies of oxygen content in nutrient solutions in water systems demonstrate that inadequate aeration may cause hypoxia in plant roots, and this phenomenon is especially relevant when the oxygen concentration is the limiting factor for growth and forced aeration is expensive (Zeroni et al., 1983). In addition, water logging of the pore space in a substrate leads to a reduction or interruption in gas exchange between the atmosphere and the rhizosphere. In this case, the oxygen concentration required for the respiration of the root system becomes a limiting factor (Morard and Silvestre, 1996; Urrestarazu and Mazuela, 2005). Oxygen is critical in obtaining the energy required for growth and root survival due to its role as the final electron acceptor in the respiratory chain (Morard and Silvestre, 1996).

Temperature affects oxygen solubility; increases in the NS temperature are accompanied by a decrease in its solubility and a linear increase in the plant's physiological requirements of oxygen (Carrasco and Izquierdo, 1996; Bartholomeus et al., 2008). Root respiration doubles for every 10°C increase in

temperature up to 30°C. In warm climates, where the NS can easily reach temperatures up to 25°C, the NFT (Nutrient Film Technique) is negatively impacted.

Researchers have tested NFT channel slopes of 0.5, 1.0, 2.0 and 4% and observed the best growth for the 2% slope (Cooper, 1996). Schwarz (1995) suggests the use of a 1.33% slope (1 in 75) to improve the aeration in the flowing solution by NFT. However, the slope should never be < 1% (1 in 100) or > 2% (1 in 50). Consequently, many users of NFT systems in temperate regions worldwide use a 2% slope (e.g., Molyneux, 1988; and Windsor and Schwarz, 1990; Schwarz, 1995 in the northern hemisphere and Romer, 1993; and Carrasco and Izquierdo, 1996 in the southern hemisphere). Further, the inclusion of gaps in the NS in the gutter itself is an important method of increasing the dissolved oxygen available to the roots.

The aim of this study was to evaluate the effect of different slopes (2 and 4%) and number of gaps (0, 1, 2 and 3) in the NFT gutter on dissolved oxygen in the NS and on the production from a tomato cultivar in a warm climate.

### **3.3. Materials and Methods**

The research was performed in the greenhouse on the campus of the Interdisciplinary Research Center for Integrated Regional Development in Xoxocotlan, Oaxaca (Mexico) (17° 01' 31.45" N, 17° 01' 00" W; altitude: 1526 masl)



between June 15 and December 14, 2009. The climate is characterized by a hot summer.

The vegetal material used in this study was the tomato plant (*Lycopersicon esculentum* L.) c.v. Pony Express. Tomato seeds were sown in a mixed substrate of peat:vermiculite (3:1, vol:vol). After 30 days, the seedlings were placed in a 24-m long NFT channel with a width of 10 cm, similar to that described by Carrasco and Izquierdo (1996). The plants were sown at a density of 2.2 plants·m<sup>-2</sup>, and the Sonneveld and Straver (1994) NS was used in the experiment. The pH and EC (Electric conductivity) in the NS storage tank were monitored 5 days/week and were maintained between 5.8 and 6.2 (pH) and between 1.4 and 2.2 dS·m<sup>-1</sup> (EC). The NS was completely replaced when necessary. Application of the NS was intermittent, with 10 min of watering (3 L min<sup>-1</sup>) followed by 10 min without irrigation. Disinfection of the NS was performed according to the green chemistry criteria (Carrasco and Urrestarazu, 2010).

The treatments were administered using slopes of 2% (1 in 50) and 4 % (1 in 25), each with 0, 1, 2 and 3 gaps that were free of the NS. Each gap was formed by a 5-cm water break. In agreement with Urrestarazu et al. (2005), an NS sample was collected at the end of each NFT channel. A Hanna Mod. HI 9146 Dissolved Oxygen Meter was used to measure the oxygen content in the NS.

Fruits were harvested at maturity, and only commercial fruit was counted. Each plot (experimental unit) contained four NFT channels (four replications). Student's t-test was used to differentiate between the means of the different

treatments at a 5% significance level. The statistical significance of the differences was determined by one-way ANOVA using Tukey's test.

The experimental designs and data analyses were based on the procedure described by Petersen (1994). The Statgraphics Plus 5 statistical package (Statistical Graphics Corp., 2010) was used for statistical analyses.

### **3.4. Results and Discussion**

The temperature in the greenhouse during the cultivation was maintained between 14 and 45°C (data not shown). The oxygen content of the NS varied throughout the day (Table 1). In agreement with Gislerød and Adams (1983), Gislerød and Kempton (1983), and Urrestarazu et al. (2005), the minimal quantities of dissolved oxygen were obtained in 5 of 8 cases at approximately noon. The 4%-sloped NFT channel contained up to 5% more oxygen than the 2%-sloped channel. During the first two periods (9 and 12 hours) of the day, the quantity of dissolved oxygen in the solution increased proportionally with the number of gaps in the NFT.

The dissolved oxygen values in the NS were < 65% in the 2%-sloped NFT channels. This limit was reported by Zeroni et al. (1983) as the minimum allowable value, below which the growth of tomato is adversely affected.

The 4%-sloped NFT channels displayed up to 15% improved yield over the 2%-sloped channels (Table 2). Further, for both slopes examined, the harvest

productivity and the total yield increased with increases in the number of gaps in the channel. A correlation was observed between the number of gaps and the production for the 2%-sloped channel, indicating that the limiting factor in this case was oxygen. The breaks in the solutions application caused a greater increase in dissolved oxygen concentration than the 4% slope in the other NFT channel (Figure 1).

Figure 2 shows the lack of a clear correlation between the production with each treatment and the average dissolved oxygen in the NS throughout the day. However, when the same relationship was investigated after noon (i.e., when the minimum level of oxygen available for the roots was reached), a close correlation ( $R^2 > 0.8$ ) was observed. This indicates that in the presence of a temporal limitation on the availability of oxygen, the oxygen becomes the limiting factor for growth and causes a decline in potential production. Similar arguments are reported by Rivière et al. (1993) and Urrestarazu y Mazuela (2005).

### **3.5. Conclusions**

The slope of the container influenced the oxygenation of the NS, with 4% slopes resulting in higher dissolved oxygen compared to the 2% slope. These results suggest that in warmer climates, the use of a steeper slope and the incorporation of gaps in the NFT channel can significantly improve crop productivity.

### 3.6. Literature Cited

- Bartholomeus, R.P., J.P.M. White, and P.M. Bodegom. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant root: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360:147-165.
- Carrasco, G., and J. Izquierdo. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante ("NFT"). Univ. de Talca (Chile). FAO. 105 pp.
- Carrasco G., and M. Urrestarazu. 2010. Green Chemistry in Protected Horticulture: The Use of Peroxyacetic Acid as a Sustainable Strategy. *International Journal of Molecular Sciences* 11(5):1999-2009.
- Gislerød, H.R., and P. Adams. 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Hort.* 21, 311-321.
- Gislerød, 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.
- Cooper, A. 1996. *The ABC of NFT*. 2<sup>o</sup> ed. Grower Books. London. 171 pp.
- Drew, M.C. 1992. Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Science* 154: 259-268.

- Drew, M.C. 1983. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A Review. *Plant and Soil* 75:179-199.
- Drew, M.C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Molecular Biology* 48:223-250.
- Molyneux, C.J. 1988. A practical guide to N.F.T. Nutriculture Ltd. Mawdesley, Ormskirk, Lancashire. U.K., 153 pp.
- Morard, P., and J. Silvestre. 1996. Plant injury to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. *Plant and Soil* 184:243-254.
- Petersen, R.G. 1994. *Agricultural Field Experiments*. Marcel Dekker Inc., New York, USA, 409 pp.
- Romer, J. 1993. *Hydroponic Crop Production*. Kangaroo Press Pty Ltd. Australia, 142 pp.
- Rivière L M, S Charpentier, B Jeannin, and B. Kafka. 1993. Oxygen concentration of nutrient solution in mineral wools. *Acta Horticulturae* 342:93-101.
- Schwarz, M. 1995. *Soilless Culture Management*. Advanced Series in Agricultural Sciences 24. Springer-Verlag. Berlin, Germany, 197.
- Sonneveld, C., and N. Straver. 1994. *Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates*. 10 ed. Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk. n° 8. Serie: Voedingsplossingen glastuinbouw, 45 pp.

Statistical Graphics Corp. (2010) STATGRAPHICS plus for Windows 5.0.

Statistical Graphics. Corp., Rockville, MD.

Urrestarazu, M., P.C. Mazuela, A. Boukhalfa, A. Arán, and M.C. Salas. 2005.

Oxygen Content and its Diurnal Variation in a New Recirculating Water  
Soilless Culture for Horticultural Crops, *HortScience* 40:1729-1730.

Urrestarazu, M., and P.C. Mazuela. 2005. Effect of slow-release oxygen supply by

fertigation on horticultural crops under soilless culture. *Scientia Horticulturae*  
106:484-490.

Winsor, G.W., and M. Schwarz. 1990. Soilless culture for horticultural crop

production. *FAO Technical Paper*. Num. 101. Rome, Italy, 188.

Zeroni, M., J. Gale, and J. Ben-Asher. 1983. Root aeration in a deep hydroponic

system and its effect on growth and yield of tomato. *Scientia Horticulturae*  
19:213-220.

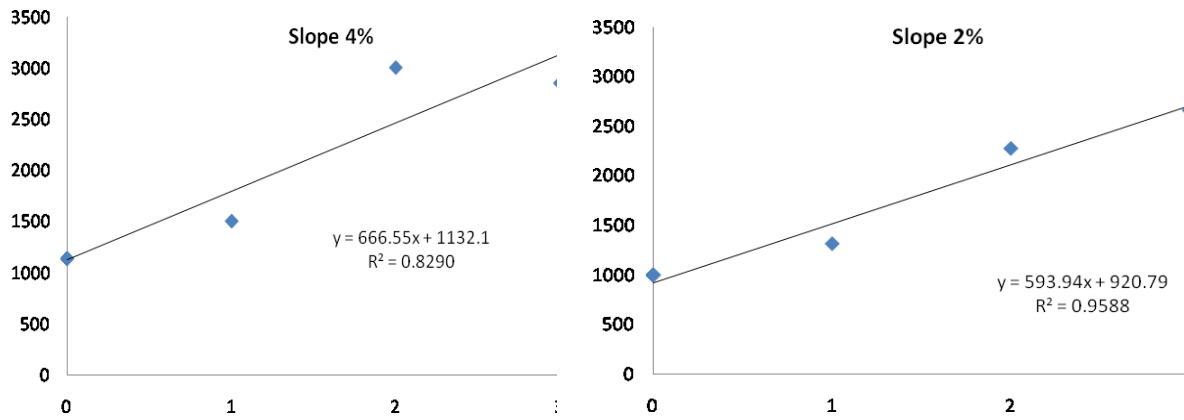


Fig. 3.1. Linear correlation between gap numbers in the channel (abscissa) and the yield (ordinate,  $\text{g plant}^{-1}$ ) of a tomato crop by NFT modified for warm climates.

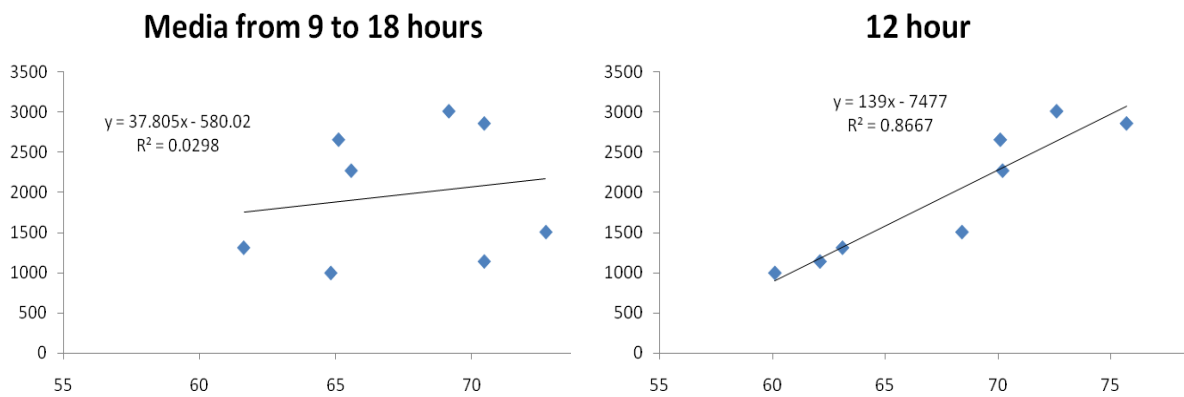


Fig. 3.2. Linear correlation between dissolved oxygen in the channel (abscissa, %) and the yield (ordinate,  $\text{g plant}^{-1}$ ) of a tomato crop by NFT modified for warm climates.

Table 3.1. Nutrient solution temperature (°C) and average dissolved oxygen in the NFT channel vs. the treatment, at different solar hours.

Slope %	Gap number	Temperature °C			Dissolved oxygen %		
		9:00	12:00	18:00	9:00	12:00	18:00
4	0	30.3 b	31.2 b	24.9 b	71.1 a	62.1 a	72.4 b
	1	29.6 b	30.4 a	23.3 a	76.8 b	68.4 b	72.8 b
	2	27.8 a	31.0 b	25.1 b	75.2 b	72.6 c	66.8 a
	3	26.7 a	30.4 a	27.4 c	77.1 b	75.7 c	67.5 a
2	0	30.0 c	30.4 a	24.4 a	69.7 a	60.1 a	64.8 b
	1	29.4 bc	30.9 ab	25.6 b	69.9 a	63.1 a	59.2 a
	2	28.5 b	30.9 ab	28.3 d	66.5 a	70.2 b	64.2 b
	3	27.2 a	31.3 b	27.0 c	71.4 b	70.1 b	62.3 ab
Significance		**	**	**	**	**	**

\*\* Significance at  $P < 0.01$ . The letters indicate a significant difference ( $P < 0.05$ ) between different slop and gap numbers determined by one-way ANOVA using Tukey's test. All data are an average of four replicates in the middle of the growing cycle.



Table 3.2. Tomato yield (g plant<sup>-1</sup>) vs. slope and gap number.

Slope	Fall	Harvests			Total
		1st	2nd	3rd	
%	number				
4	0	395.0 b	348.1 a	399.3 a	1,142.4 a
	1	269.3 ab	695.0 ab	544.4 a	1,508.7 ab
	2	700.5 c	1,123.4 b	1,190.4 b	3,014.2 c
	3	699.4 c	1,224.3 b	938.7 ab	2,862.4 c
2	0	329.5 ab	220.1 a	449.9 a	999.5 a
	1	505.0 b	390.9 ab	418.2 a	1,314.0 ab
	2	544.3 bc	746.3 bc	983.4 b	2,274.0 bc
	3	608.5 c	1,025.0 c	1,025.8 b	2,659.3 c
Significance		*	**	*	**

\*, \*\*: Significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively. The letters indicate a significant difference ( $P < 0.05$ ) between different fall numbers determined by one-way ANOVA using Tukey's test. All data are the average of four replicates in the middle of the growing cycle.

## CAPÍTULO 4.

### DOS MÉTODOS DE OXIGENACIÓN PASIVA EN LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE Y LECHUGA EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO RECIRCULANTE.

#### 4.1. Resumen

La oxigenación inadecuada de la solución nutritiva (SN) puede producir hipoxia radicular en las plantas, este fenómeno afecta la absorción de nutrientes y agua y su producción es menor. La SN puede funcionar como fuente de oxígeno para las raíces si está bien oxigenada. Con el objetivo de evaluar la incorporación de oxígeno por dos métodos pasivos, se estudió el efecto de la pendiente al 2 y 4 % en contenedores de 24 m de longitud y el efecto de la inclusión de flujos de variación rápida de la SN con; con cero, una, dos y tres caídas de SN. Se midió el oxígeno disuelto y las variables de rendimiento del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. c.v. Pony express) y lechuga (*Lactuca sativa* L.c.v. Satine). El oxígeno disuelto en la SN siempre es mayor en el cultivo de lechuga en comparación con el de jitomate. Los contenedores del 4 % de pendiente tienen alrededor del 5 % más oxígeno disuelto que los del 2 % en el tomate, en la lechuga son iguales. El número de variaciones rápidas de la SN influye en el oxígeno disuelto, aumenta conforme se tienen más variaciones rápidas de SN con las dos pendientes y con los dos cultivos. El peso fresco de la planta del tomate y la lechuga tuvieron los valores máximos con pendiente de los contenedores del 4 % y tres variaciones del flujo de la SN, también la producción del fruto de tomate es mayor con esas variables.

Palabras clave: Hipoxia, lechuga, oxigenación radicular, oxígeno disuelto, tomate.

## **4.2. SUMMARY**

Inadequate oxygenation of the nutrient solution (NS) root hypoxia may occur in plants, this phenomenon affects the absorption of nutrients and water and the production is lower. The NS can function as a source of oxygen for the roots if they are well oxygenated. In order to evaluate the incorporation of oxygen by two passive methods, we studied the effect of the slope of 2 and 4% in containers of 24 m of length and the effect of the inclusion of rapidly varying flows of the NS with, with zero, one, two and three drops of SN. Dissolved oxygen was measured and variables and crop yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill cv Pony Express) and lettuce (*Lactuca sativa* cv Satine). Dissolved oxygen in the NS is always higher in lettuce compared with tomato. Containers of 4% slope are about 5% more dissolved oxygen than 2% in tomato, lettuce are equal. The number of rapid changes of flow in the NS affects dissolved oxygen, increases as it has more rapid changes in NS, this happens with the two slopes and the two crops. The plant fresh weight of tomato and lettuce had the highest values with a slope of

containers of 4% and three variations of the flow of NS, also tomato fruit production is higher with these variables.

Key words: Hypoxia, lettuce, root oxygenation, dissolved oxygen Tomato.

### **4.3. Introducción**

Las plantas necesitan oxígeno en la zona radicular para su crecimiento y funcionamiento, los niveles adecuados de este elemento son necesarios para su buen desarrollo (Chérif *et al.*, 1997), su deficiencia afecta la absorción de agua y de nutrientes, y el rendimiento de la planta puede afectarse en diferentes cultivos sin suelo (Urrestarazu y Mazuela, 2005). El oxígeno es necesario para obtener la energía necesaria para el crecimiento y supervivencia de la raíz (Morard y Silvestre, 1996), además de que existen segmentos de raíz con altas tasas de crecimiento o de división celular y con requerimientos elevados de energía (Huck, 1970).

La aireación inadecuada de la SN produce hipoxia en las raíces de muchas plantas, se considera así cuando la concentración de oxígeno es un factor limitante en el crecimiento de los vegetales (Zeroni *et al.*, 1983) y no necesariamente cuando esté ausente el oxígeno de la SN (Drew, 1997). En los sistemas hidropónicos de película nutritiva recirculante conocidos como *Nutrient Film Technique*, (NFT), las plantas obtienen el oxígeno de la película de SN que

fluye a lo largo del canal, la parte de la raíz sumergida en el líquido utiliza el oxígeno de la SN y la otra que está expuesta a la humedad del aire lo toma directamente del ambiente (Jackson, 1980; Morgan, 2001). La falta de oxígeno puede ocurrir en el sistema NFT conforme la masa radicular aumenta de tamaño, longitud y densidad, especialmente en canales largos que no permiten una oxigenación adecuada para la absorción eficiente de los elementos nutritivos (Carrasco e Izquierdo, 1996; Resh, 2006), incluso la solución permanece como una barrera al intercambio gaseoso por la baja solubilidad del oxígeno (Drew, 1992), pero si la solución se mezcla con aire durante su paso en el sistema, funciona como fuente de oxígeno para las raíces que no reciben la oxigenación adecuada (Chérif *et al.*, 1997; Jackson, 1980; Morgan, 2001). Para que la SN fluya adecuadamente por gravedad en los canales de cultivo se recomienda que la pendiente longitudinal varíe entre un 2 y 4%, así la absorción de agua y nutrientes es utilizada eficientemente por las raíces del cultivo (Carrasco e Izquierdo, 1996), para que la oxigenación mejore se deben aumentar la velocidad de la SN incrementando la pendiente (Maher, 1977). También es importante considerar la extensión de los canales de cultivo para mantener los niveles adecuados de oxígeno en la SN, el máximo recomendado son 14 m (Carrasco e Izquierdo, 1996; Resh, 2006).

Un cambio en la sección transversal de los canales produce lo que se conoce como salto hidráulico o flujo de variación rápida, generan turbulencia en el régimen de circulación, y facilitan la aireación de la solución (Freire *et al.*, 2007), favorece los intercambios entre el aire y el agua, mientras más agitada esté el agua mayor

será el contenido de oxígeno disuelto (Okubo, 1980). Introducir estas modificaciones en los canales permitirán mejores oxigenaciones de la SN.

El objetivo del presente trabajo será evaluar la incorporación pasiva de oxígeno en la SN, mediante cambios de flujo rápido en los contenedores de cultivo y evaluar la pendiente longitudinal de los contenedores y el efecto sobre algunos parámetros productivos del cultivo de tomate y lechuga en un sistema hidropónico recirculante.

#### **4.4. Materiales Y Métodos**

La investigación se desarrolló en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, se localiza a los 17° 01' 31.45" de latitud norte y 96° 43' 12.07" de longitud oeste, a una altitud de 1526 msnm (INEGI, 1997). El experimento se realizó de junio a diciembre del 2008 con el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.c.v. Satine) y de julio a diciembre del 2009 para el cultivo de jitomate (*L. esculentum* Mill. c.v. Pony express), ambos cultivos se desarrollaron en un invernadero de baja tecnología tipo túnel con cubierta de polipropileno blanco al 25 % de sombra, con ventilación cenital y malla antiáfidos en las laterales y cenitales. Las semillas de lechuga fueron germinadas en tacos de *foamy* de 3 x 3 x 9 cm. Se regó el semillero inicialmente con agua y posteriormente con solución nutritiva hasta que tuvieron 7 cm de longitud y de 3 a 4 hojas. El trasplante se realizó a los 35 días y se sembraron a una distancia de 20 cm entre plantas. Las semillas de tomate fueron germinadas en contenedores de unicel de 200 cavidades, utilizando como sustrato la mezcla de 75 % de turba

*Sphagnum* + 25 % de vermiculita. Se utilizó una variedad de ciclo determinado. A los 30 días fueron trasplantadas, previamente el sistema radicular fue envuelto con esponja de poliuretano de 6 x 15 x 1 cm como medio de soporte, la distancia entre plantas fue de 60 cm. Se utilizó la técnica de solución nutritiva recirculante (NFT) de Cooper (1978). Los contenedores utilizados fueron tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 24 m de longitud. Los tratamientos evaluados fueron: la pendiente (2 y 4 %) y saltos hidráulicos (Cero, 1, 2 y 3 caídas de SN = T0, T1, T2, T3); el número de caídas de SN corresponden al número de desniveles en los contenedores, cada desnivel fue de 5 cm (Figura 1). El modelo experimental utilizado fue completamente aleatorizado con arreglo factorial 2 x 4 con 4 repeticiones.

La SN utilizada fue la propuesta por Steiner (1961) modificada por Urrestarazu (2004), el pH se mantuvo entre 6.5 y 7.0. La conductividad eléctrica (CE) estuvo entre en 1.4 dSm<sup>-1</sup> y 2.5 dSm<sup>-1</sup>. Cuando disminuyó a menos de 0.8 dSm<sup>-1</sup> se reemplazó por solución nutritiva nueva. La aplicación de la SN fue intermitente, 10 minutos de riego por 10 minutos sin riego con un gasto de 3 L min<sup>-1</sup> en cada contenedor.

Las variables medidas en el entorno del sistema radicular fueron: oxígeno disuelto (%) y temperatura de la SN (°C), se utilizó un oxímetro marca Hanna, Mod. HI 9146, las mediciones se realizaron junto a la planta y a la entrada y salida del contenedor, también se midió el pH y se utilizó un pH-metro Marca Hanna, Mod. HI 9811-5. Las mediciones se hicieron únicamente en el tanque recolector de la SN.

Los datos se tomaron por cada tratamiento, repetición y cultivo. Las variables productivas fueron: peso fresco de la planta, peso fresco de raíz; peso seco de raíz y volumen de raíces. El peso fresco se obtuvo al sacar la planta del contenedor y pesarla en una balanza Ohaus de 2,610 +/- g 0.1 g de capacidad, posteriormente se separó de la raíz y se pesaron. Para el volumen de la raíz se introdujo en un vaso de precipitados de un litro de capacidad, que previamente fue llenada con 500 ml de agua y el desplazamiento del agua fue el volumen de las raíces (Harrington *et al.*, 1994). El peso seco de raíces fue determinado al secarlos en un horno de convección a 70°C por 72 horas que fue hasta que alcanzaron un peso constante (Araujo *et al.*, 1997). Los datos de las variables se obtuvieron después de la cosecha de la lechuga y para el caso del tomate fue después de la tercera colecta de los frutos. Para el tomate se realizaron tres cortes de frutos. El análisis estadístico de las variables fue realizado mediante el programa Statgraphics Plus 4 (Statistical Graphics Corp., 1999).

#### **4.5. Resultados Y Discusión**

El contenido de oxígeno disuelto en la SN tuvo diferentes comportamientos, la pendiente del contenedor, el número de caídas de la SN producidas por los saltos hidráulicos y el cultivo afectaron el oxígeno contenido en la solución. Los tratamientos que tuvieron la menor concentración de oxígeno fueron los que tenían el 2 % de pendiente en comparación con los del 4 % de pendiente, esto puede observarse por cada cultivo (Cuadro 1). En el tomate, el tratamiento T0 (sin saltos hidráulicos) tiene el 64.0 % de oxígeno disuelto con el 2 % de pendiente



mientras que tiene 66.3 % de oxígeno para el 4 % de pendiente. Los tratamientos con un salto hidráulico en los 12 m (T1) para el mismo cultivo aumento el oxígeno en la solución. El contenido de oxígeno disuelto en la SN comparado por la pendiente de los contenedores los que tienen el 4 % de pendiente tuvieron más oxígeno que los del 2 %. Los tratamientos T2 y T3 aumentaron el contenido de oxígeno con 68.3 y 69.8 % respectivamente en los contenedores con el 2 % de pendiente, pero el aumento es mayor en los contenedores con el 4 % de pendiente con 73.0 y 75.5 % respectivamente. Al comparar el contenido de oxígeno disuelto en los tratamientos por el número de cambios de flujo rápido en los contenedores con el 2 % de pendiente, son diferentes ( $P \leq 0.01$ ) T0 y T3. Los contenedores con el 4 % de pendiente tienen el mismo comportamiento, aumenta la cantidad de oxígeno conforme aumenta el número cambios de flujo rápido, siendo diferentes ( $P \leq 0.01$ ) T0 de T1, T2 y T3.

El oxígeno disuelto en los contenedores con la lechuga tuvieron el mismo comportamiento, el aumento del contenido de oxígeno en la solución por el aumento de cambios de flujo rápido, sin embargo el contenido de oxígeno es mayor en todos los casos por más de 10 puntos porcentuales con respecto a los tratamientos con tomate, se ha observado que la especie cultivada es un factor que interviene en contenido de oxígeno de la SN, porque las especies hortícolas demandan en forma diferenciada la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva, hay cultivos como el pepino en donde la concentración de oxígeno disminuye en mayor proporción que el jitomate y la lechuga (Urrestarazu, 2004), y más aún la lechuga considerada como cultivo de bajo perfil es mas

recomendada para este sistema que el tomate porque en el periodo de fructificación necesitan más oxígeno (Resh, 2006).

El oxígeno disuelto en los contenedores con pendientes del 4 % tienen más oxígeno ( $P \leq 0.01$ ) que los contenedores con el 2 % (datos no mostrados), diversos autores como Carrasco e Izquierdo (1996) y Maher (1977), mencionan que el aumento de la pendiente aumenta la velocidad de flujo de la SN y como consecuencia aumenta el oxígeno disuelto en la solución. En nuestro caso puede observarse que el oxígeno disuelto aumenta con la pendiente del 4 % como se ha documentado previamente (Cooper, 1972).

El número de cambios de flujo de variación rápida en los contenedores, se pueden contar como el número de caídas de SN que es el otro factor estudiado, como mecanismo de incorporación de oxígeno por la turbulencia que se genera y facilita la aireación de la solución (Freire *et al*, 2007) puede observarse el aumento del oxígeno en la solución conforme aumentan las variaciones de flujo de SN (Cuadro 1), aunque existen diferencias significativas ( $P \leq 0.01$ ) en el contenido de oxígeno en los contenedores del cultivo de tomate con el 2 % de pendiente entre el tratamiento T0 y T3, los aumentos son sostenidos entre T0, T1, T2 y T3; lo mismo sucede para la pendiente con el 4 %, T0 es diferente ( $P \leq 0.01$ ) de T1, T2 y T3, pero el aumento se observa en forma creciente conforme al número de caídas de la SN.

En la Figura 2 puede observarse como disminuye el oxígeno disuelto de la entrada del contenedor a la salida, la diferencia entre la entrada y salida de los

contenedores en los que están las lechugas son alrededor de 11 a 15 puntos porcentuales, mientras que en el cultivo de tomate las diferencias son menores, alrededor de 4 puntos porcentuales. Puede observarse que en el cultivo de lechuga, los cambios de oxígeno son mayores porque hay más oxígeno disponible, mientras que en el jitomate aunque necesita más oxígeno, hay menos oxígeno por utilizar, la diferencia entre la entrada y la salida son solo 5 unidades porcentuales para los contenedores que tienen el 4 % de pendiente, pero es aún menor (3-4 %) para los contenedores que tienen menos oxígeno. La longitud del contenedor es importante porque influye en la oxigenación de las raíces, conforme más largo sea el contenedor, el oxígeno disuelto es menor y las raíces sufrirán más restricciones de oxígeno (Urrestarazu, 2004), debido a que las plantas tienen más oxígeno disponible al inicio del canal y conforme haya más plantas, estas consumirán el oxígeno disponible y al final de los contenedores habrá menos oxígeno disponible (Morgan, 2001).

En el Cuadro 2 se muestran los valores relativos de los rendimientos de los parámetros fisiotécnicos obtenidos de los cultivos de tomate y lechuga, se tomó como el 100 0 % de la producción a los tratamientos con pendiente del 4 % y T3 que es en donde se observa la mayor concentración de oxígeno disuelto en la SN. Con base en ellos se compararon las variables que indican el crecimiento vegetativo del peso fresco de planta, peso fresco de raíz, peso seco de raíz y volumen. Los datos productivos en tomate únicamente tuvieron diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) en el peso seco de la raíz en los tratamientos con el 2 % de pendiente, en los demás parámetros no existen diferencias ni tendencias que

nos indiquen un comportamiento de crecimiento. Sin embargo, en la lechuga existen diferencias significativas en el peso fresco (datos no mostrados) únicamente en los contenedores con pendiente del 4 % y con tres cambios de flujo de variación rápida (T3) en donde el peso fresco es mayor alrededor del 17 %, es importante considerar este parámetro porque la importancia comercial de este cultivo es el peso fresco. Aunque en los contenedores con el 2 % de pendiente parece ser mayor en T0 y T1, las diferencias no son significativas por la desviación estándar (9.8 g) que tienen. Sin embargo algunos autores han reportado que la aireación de la SN no mejora la producción de la lechuga en un sistema hidropónico flotante (Goto *et al.*, 1996)

Para el caso de tomate se consideró la producción de fruto (Cuadro 3) en forma separada, en él se observan las diferencias en los tratamientos tanto de las pendientes, como de los cambios de flujo de variación rápida. Los datos de producción tuvieron diferencias altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ) por el número de caídas de SN, puede observarse que la producción relativa con los otros tratamientos son menores, a excepción de T2 con la pendiente también del 4 % que es mayor el rendimiento en un 5 %. Si se comparan las dos pendientes, también tienen diferencias ( $P \leq 0.01$ ), siendo mayor la producción para la pendiente del 4 % altamente. Esta diferencia de fructificación especialmente se tiene porque el número de ramilletes en la planta que se tienen desde 3 en T0 hasta 7.5 en T3 en la pendiente del 4 %, y 3 en T0 hasta 4.5 en T3 en los contenedores con 2 % de pendiente (datos no mostrados), estos resultados concuerdan con los de Fu *et al.* (2002) en los que la floración aumenta

significativamente con el aumento de la respiración para soya y sorgo, aunque hay algunas especies que no responden de la misma forma y se ve reflejado en la producción de fruto que se tiene. Zeroni *et al.*, (1983) ha estimado que la limitante para la producción de tomate está entre 3 - 4 mg L<sup>-1</sup> que corresponde al 58.8 % de saturación de oxígeno en la SN en nuestras condiciones, mientras que Zheng *et al.*, (2007) no observó síntomas de deficiencia en las hojas o tallos a concentraciones de 5.3 mg L<sup>-1</sup> que corresponde al 69 % de saturación en nuestras condiciones. La repercusión de la restricción del oxígeno en la rizósfera de las plantas es la hipoxia, que ocurre cuando la respiración radicular es afectada por la deficiencia de oxígeno y no cuando el oxígeno está ausente (Drew, 1997; Zheng *et al.*, 2007; Fu 2002). Durante el desarrollo del experimento no se observaron indicadores de estrés por hipoxia, que se manifiesta por síntomas de marchitamiento de las hojas, o por el ataque de hongos fitopatógenos a la raíz, o por deficiencias nutricionales del fruto por absorción de nutrientes como Ca<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> o K<sup>+</sup>, (Adams, 1994), además de que se ha observado que este sistema hidropónico es efectivo para los cultivos de lechuga y tomate (Nichols *et al*, 2002), sin embargo si pueden observarse las diferencias de productivas de la lechuga o del tomate.

#### **4.6. Conclusiones**

La pendiente de los contenedores influyó en la oxigenación de la solución nutritiva, con el 4 % de se obtuvo 5 % más de oxígeno disuelto que los contenedores con el

2 % de pendiente para el tomate, esta diferencia de oxígeno no tiene efecto en los parámetros productivos ni de rendimiento de frutos. El número de cambios de flujo rápido producido por las caídas de la solución nutritiva tiene efecto en el contenido de oxígeno disuelto y este en el rendimiento de frutos con mayores rendimientos en los que tienen mayor número de caídas de solución nutritiva.

Para el cultivo de la lechuga la pendiente de los contenedores no influyó en la oxigenación de la solución nutritiva. El número de cambios de flujo rápido producido por las caídas de la solución nutritiva tiene efecto en el contenido de oxígeno disuelto y este en el peso fresco de la planta, con mayores rendimientos en los que tienen mayor número de caídas de solución nutritiva.

#### **4.7. Bibliografía**

**Adams P (1994)** Some effects of the environment on the nutrition of greenhouse tomatoes. *Acta Horticulturae* 366:405-416.

**Araujo F, S Quintero, J Salas, J Villalobos, A Casanova (1997)** Crecimiento y acumulación de nutrientes del fruto de Guayaba (*Psidium guajava* L.) del tipo "Criolla Roja" en la planicie de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ) Universidad de Zulia* 14:315-328

**Carrasco G, J Izquierdo (1996)** La técnica de la solución nutritiva recirculante “NFT”. Universidad de Talca, Chile. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 161 p.

**Chérif M, Y Tirilly, R R Bélanger (1997)** Effect of oxygen concentration on plant growth, lipid peroxidation, and receptivity of tomato roots to pythium under hydroponic conditions. *European Journal of Plant Pathology* 103:255–264.

**Cooper A (1978)** Commercial Applications of NFT. Grower Books. London. 96 págs.

**Drew M C (1992)** Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Science* 154: 259-268.

**Drew M C (1997)** Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant Molecular Biology* 48: 223-250.

**Freire D, J Varela, C Cabeza, A C Mart, L G Sarasa, I Bove, G Usera, R**

**Montagne, M Araujo (2007)** Dinámica de Flujos estratificados sobre obstáculos pronunciados. X Reunión de la Sociedad Uruguaya de Física. Carmelo, Uruguay. p. 12

**Fu S, W Cheng, R Susfalk (2002)** Rhizosphere respiration varies with plant species and phenology: A greenhouse pot experiment. *Plant and Soil* 239:133-140.

**Goto E, A J Both, L D Albright, R W Langhans, A R Leed (1996)** Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. Acta Horticulturae. 440: 205-210

**Harrington J J Mexal, J Fisher (1994)** Volume displacement provides a quick and accurate way to quantify new root production. Tree Planters Notes 3:121-124.

**Huck M G (1970)** Variations in taproot elongation rate as influenced by composition of the soil air. Agronomy Journal 62:815-818.

**INEGI (1997)**. Fisiografía de Oaxaca. Instituto Nacional de Estadística, geografía e Informática. México. Página web:  
<http://www.inegi.gob.mx/territorio/espanol/estados/oas/fisio.html>.

**Jackson M B (1980)** Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. Acta Horticulturae 98: 61-78.

**Maher M J (1977)** The use of hydroponics for the production of glasshouse tomatoes in Ireland. Proc. 4<sup>th</sup>. Int. Soilless Culture. I.W.O.S.C. Las Palmas. pp. 161-169.

**Morard P, J Silvestre (1996)** Plant injury to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. Plant and Soil 184:243-254.



- Morgan L (2001)** ¿Se están sofocando sus plantas? In. Boletín informativo. abril/junio. Centro de Investigación de Hidroponia y Nutrición Mineral. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú. 11:2-8.
- Nichols M A, D J Woolley, C B Christie (2002)** Effect of oxygen and carbon dioxide concentration in the root zone on the growth of vegetables. Acta Horticulturae 578: 119-122.
- Okubo A (1980)** Diffusion and ecological problems: Mathematical Models. Springer. New York. USA.
- Resh H M (2006)** Cultivos hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. 5ª ed. España. pp. 558.
- Statistical Graphics Corp. (1999)** STATGRAPHICS plus for Windows 4.1. Statistical Graphics. Corp., Rockville, MD.
- Steiner A A (1961)** A universal method for preparing solutions of certain desired composition. Plant and Soil. 15: 134-154.
- Urrestarazu M (2004)** Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa, Almería. España. pp. 914.
- Urrestarazu M, P C Mazuela (2005)** Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture. Scientia Horticulturae 106:484-490.

**Zeroni M, J Gale, J Ben-Asher (1983)** Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. *Scientia Horticulturae* 19:213-220.

**Zheng Y, L Wang, M Dixon (2007)** An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae* 113: 162–165

**Cuadro 4.1. Contenido promedio de oxígeno disuelto en la solución nutritiva de acuerdo a la pendiente del contenedor, número de saltos hidráulicos y cultivo durante el desarrollo de la plantación. (T0, T1, T2 y T3 corresponden a contenedores con cero, uno, dos y tres saltos hidráulicos; OD oxígeno disuelto en la solución nutritiva).**

Tratamiento	Tomate						Lechuga					
	Pendiente 2 %			Pendiente 4 %			Pendiente 2 %		Pendiente 4 %			
	OD %	EE		OD %	EE		OD %	EE	OD %	EE		
T0	64.0	a	0.95	66.3	a	0.95	75.0	a	3.05	78.1	b	3.05
T1	65.2	ab	0.95	71.8	b	0.95	75.9	a	2.49	67.1	a	2.49
T2	68.3	bc	1.00	73.0	b	1.00	88.0	b	2.15	95.0	c	2.15
T3	69.8	c	0.95	75.5	b	0.95	90.2	b	1.93	88.6	c	1.93
Significancia	**			**			**		**			

\*\* : Significancia a los niveles de probabilidad 0.01; n.s.; No significativo, <sup>1</sup>; Medias con letras iguales entre columnas no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

**Cuadro 4.2. Parámetros Productivos de los cultivos tomate y lechuga según la pendiente y el número saltos hidráulicos en los contenedores en relación a la producción de los contenedores con pendiente del 4 % de pendiente y T3. (T0, T1, T2 y T3 corresponden a contenedores con cero, uno, dos y tres saltos hidráulicos)**

Pendiente del Contenedor	Caídas SN	Peso Fresco Planta %	Peso Fresco Raíz %	Peso Seco Raíz %	Volumen Raíz (cm <sup>3</sup> ) %	Peso Fresco %	Peso Fresco Raíz %	Peso Seco Raíz %	Volumen Raíz (cm <sup>3</sup> ) %
		Tomate				Lechuga			
4 %	0	86.3	88.6	148.9	108.4	80.8	83.0	52.9	90.5
	1	87.9	94.7	71.6	96.7	80.5	83.7	82.4	88.3
	2	125.6	119.5	140.3	101.2	79.3	81.4	64.7	92.7
	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2 %	0	74.6	97.2	130.4	85.4	105.3	88.5	64.7	100.7
	1	107.0	100.9	145.0	120.9	110.7	85.7	76.5	105.1
	2	94.2	92.5	73.2	93.1	95.0	79.0	70.6	91.7
	3	84.8	87.1	62.9	95.1	86.4	69.0	64.7	82.0
				*		*		*	

\* Datos productivos que fueron estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) antes de comparar la producción de cada tratamiento con T3 y 4 % de pendiente del contenedor.



**Cuadro 4.3. Rendimiento relativo de tomate de tres cortes del fruto de acuerdo a la pendiente y número de caídas en los contenedores (T0, T1, T2 y T3 corresponden a contenedores con cero, uno, dos y tres saltos hidráulicos; OD oxígeno disuelto en la solución nutritiva)**

Pendiente	Tratamiento	Rendimiento
	Contenedor	por planta
		%
	T0	39.9
	T1	52.7
4 %	T2	105.3
	T3	100.0
	T0	34.9
	T1	45.9
2 %	T2	79.4
	T3	92.9
		*

\* Datos productivos que fueron estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05) antes de comparar la producción de cada tratamiento con T3 y 4 % de pendiente del contenedor.

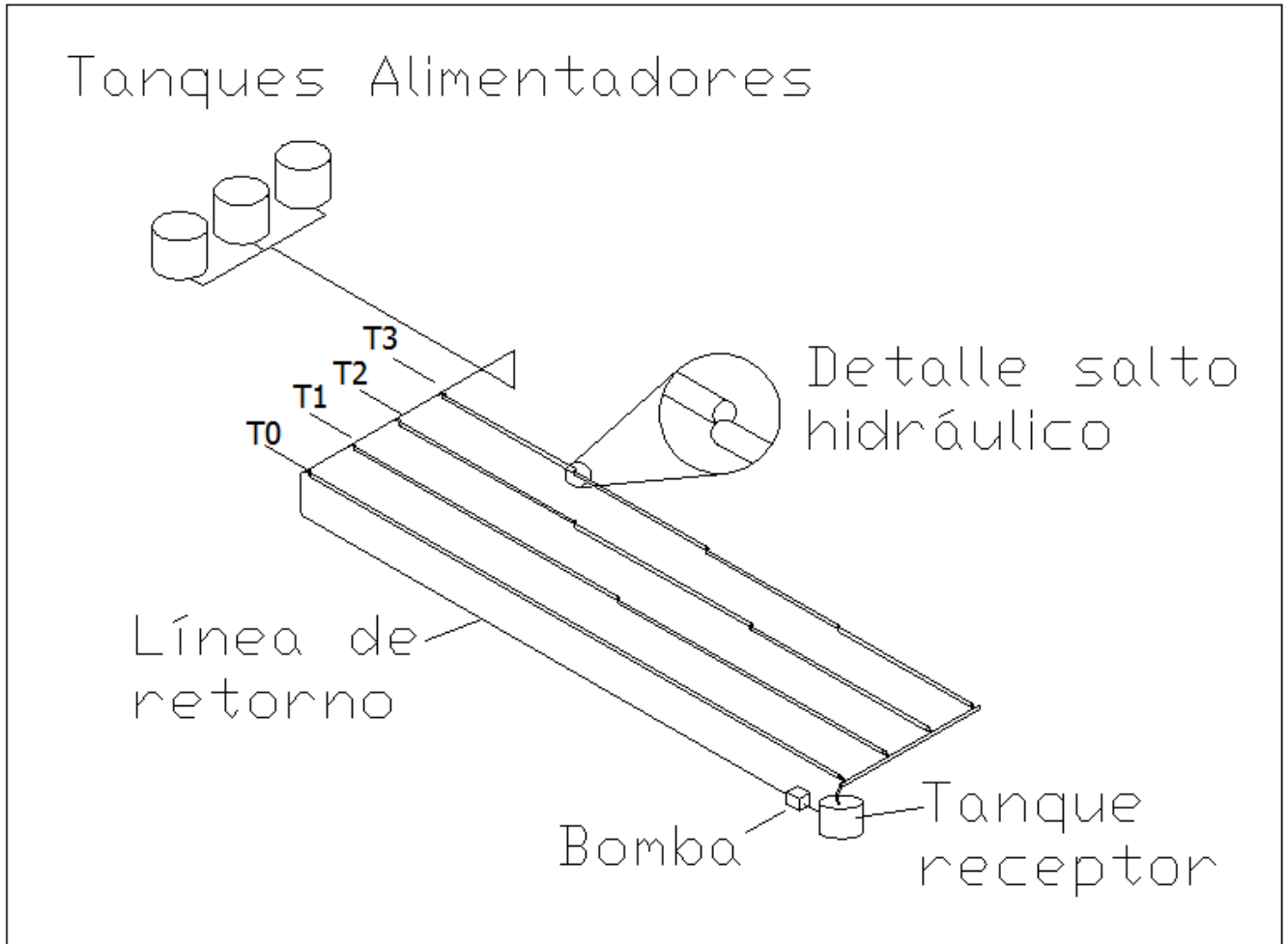


Figura 4.1. Diagrama de la instalación de los contenedores para lechuga y tomate. El tanque receptor para la recirculación de la SN y el número de caídas de la SN de acuerdo al tratamiento. La distribución y arreglo de los contenedores son similares para los tratamientos de la pendiente del 2 y 4 %.

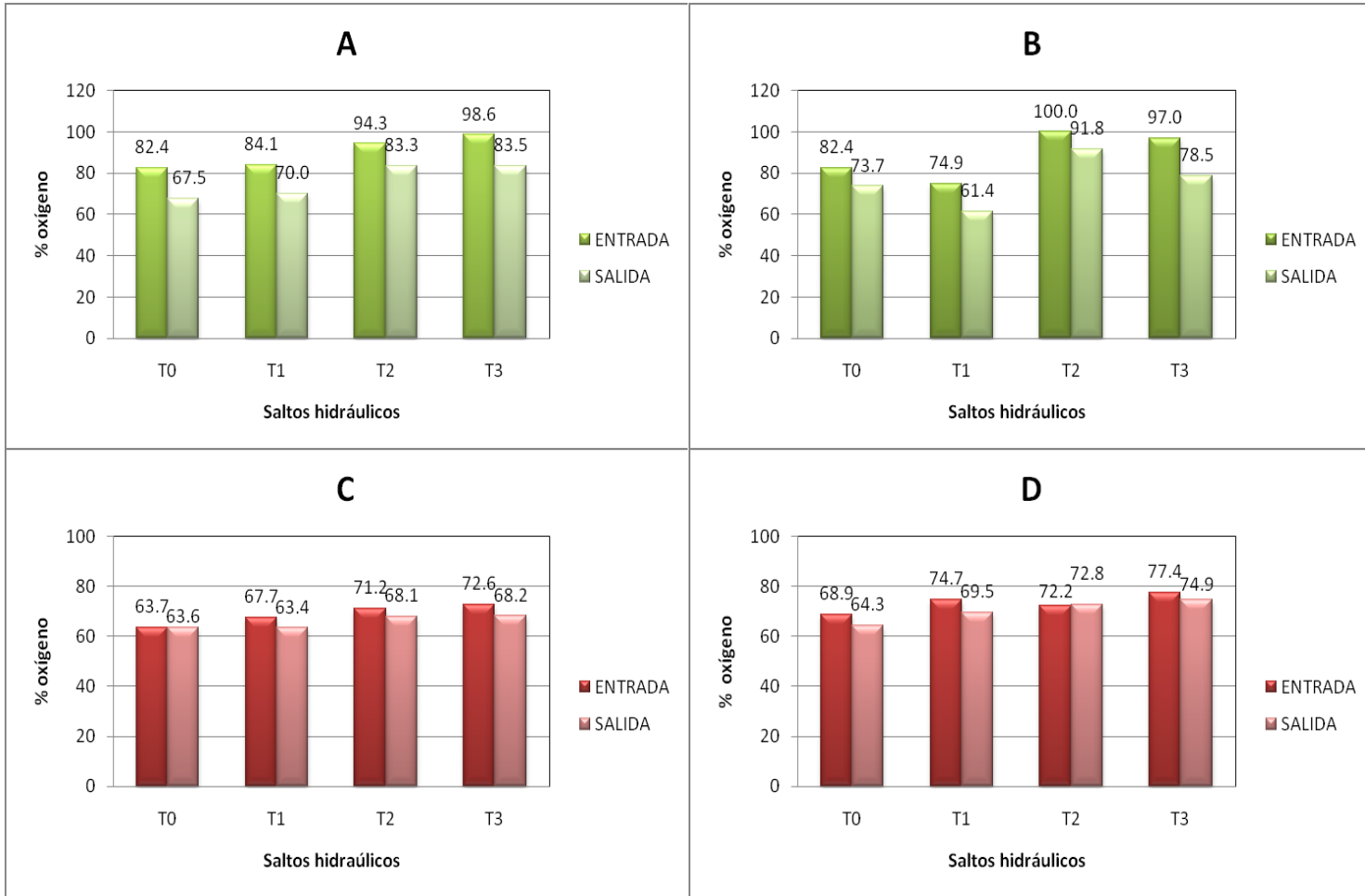


Figura 4.2. Contenido de oxígeno disuelto en la solución nutritiva a la entrada y salida de los contenedores. A. Contenedor con 2 % de pendiente y con siembra de lechuga. B. Contenedor con 4 % de pendiente y con siembra de lechuga. C. Contenedor con 2 % de pendiente y con siembra de jitomate. B. Contenedor con 4 % de pendiente y con siembra de jitomate.



## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES Y LITERATURA CITADA**

### 5.1. Conclusiones Generales

Para la lechuga.

La oxigenación de la SN en los canales del cultivo con lechuga, no tuvo efecto la pendiente del 2 y 4 %, es similar la concentración de oxígeno en los dos tratamientos.

El efecto de la oxigenación en la SN fue proporcional número de saltos hidráulicos que tuvo cada contenedor durante el periodo más caluroso del día, en la mañana y en la tarde no hubo efecto.

El rendimiento fue mayor en las plantas de lechuga que crecieron en los contenedores con el 4 % de pendiente y con tres saltos hidráulicos en el peso fresco de la parte aérea, tuvo mayor contenido de humedad, pero el peso seco fue igual que en los demás tratamientos. En este tratamiento fue mayor el peso seco de la raíz. Estos resultados nos sugieren que la planta no influye en mayor absorción de nutrientes ni mas fotosíntesis porque no aumenta el peso seco, únicamente tiene mayor absorción de agua.

Para el tomate.

La pendiente del contenedor influyó en la oxigenación de la SN, con la pendiente del 4 % resultó mayor comparada con el 2 % de pendiente. Los resultados sugieren que la incorporación de los saltos hidráulicos y la mayor inclinación de los canales de NFT mejoran significativamente la producción de tomate.

## 6.2. Literatura Citada

- AOAC. 1975. Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. 12 th Edition. Published by the Association of Official Agricultural Chemists. Washington, D. C.
- Armstrong, M. J., Kirkby, E. A. 1979. The influence of humidity on the mineral composition of tomato plants with special reference to calcium distribution. *Plant and Soil* 52, 427- 435
- Armstrong, W. 1983. Agriculture Group Symposium. Plant Growth under physical stress conditions. Oxygen Stress in the root. *J. Sci. Food Agric.* 34:943-950.
- ASTM D888-92. 1996. Método Estándar para la Determinación de Oxígeno Disuelto en Agua. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Atwell, B.J., Thomson, C.J., Greenway, H., Wand, G., Waters I. 1985. A study of the impaired growth of roots of *Zea mays* seedlings at low Oxygen concentrations. *Plant. cell and Environment.* 8:179-188.
- Bergman, H. F.1959. Oxygen deficiency as a cause of disease in plants. *Botanical Review.* 25 (3): 417-485
- Bradford, K. 1983. Effects of sell flooding on leaf gas exchange of tomato plants. *Plant Physiol.* 73:475-479.
- Bradford, K., Yang, F. S. 1981. Physiological responses of plants. *HortScience.* 16(1): 25-29.
- Brown, E., Kennedy, B W. 1966. Effect of oxygen concentration on Pythium seed rot of soybean. *Phytopathology* 56: 407–411

- Camarena, G. 2006. Muerte Celular Programada como respuesta al estrés ambiental. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Chapingo, Mex. 12(2): 93-99.
- Carrasco, G., Izquierdo, J. 1996. Manual Técnico La Empresa Hidroponica de Mediana Escala: La Técnica De La Solución Nutritiva Recirculante ("Nft"). Universidad de Talca, Chile. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- Chérif, M., Tirilly, Y., Bélanger, R.R. 1997. Effect of oxygen concentration on plant growth, lipidperoxidation, and receptivity of tomato roots to pythium under hydroponic conditions. *Eur. J. Plant Pathol.* 103, 255–264.
- Clements, F. E., 1921. Role of oxygen in root activity. *Carnegie Inst. Pub* 315 p.
- Cole, G. 1989. *Manual de Limnología*. Ed. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. Pp. 405.
- Cooper, A. J. 1972. The influence of container volume, solution concentration, pH and aeration on dry matter partition by tomato plants in water culture. *J. Hort. Sci.* 47: 341
- Dasgan, H.Y., Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of tomato plants. *Acta Hort.* 697:399-408.
- Dean, B. E. 1933 Effect of Soil Type and Aeration upon Root Systems of Certain Aquatic Plants. *Plant Physiology.* 8(2): 203-222
- Drew, M.C. 1983. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A Review. *Plant and Soil* 75:179-199.
- Drew, M. C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and Acclimation under Hypoxia and Anoxia. *Annual Review of Plant Biology.* 48: 223-250.

- Eckenfelder, W. W., Ford, D. 1966. New Concepts of Oxygen Transfer and Aeration. Advances of Water Quality Improvement. Water Resources Symposium No. 1. University of Texas Press, Austin, Texas.
- Erickson L C (1946) Growth of tomato roots as influenced by oxygen in the nutrient solution. American Journal of Botany.33:551-561.
- Fenton, J. 2007. Open-channel hydraulics. Mc. Graw Hill. New York.
- Ferreira, S. C. A., Sodek, L. 2002. The metabolic response of plants to oxygen deficiency. Braz. J. Plant Physiol., 14(2):83-94.
- Freire, D., Varela, J., Cabeza, C., Mart, A. C., Sarasa, L. G., Bove, I., Usera, G., Montagne, R. and M. Araujo. 2007. Dinámica de Flujos estratificados sobre obstáculos pronunciados. X Reunión de la Sociedad Uruguaya de Física. Carmelo, Uruguay. p. 12
- García, G. E., Leal, P. M., González, J. E. 2008. Evaluación de dos sistemas hidropónicos (abierto y cerrado) con relación al uso de solución hidropónica reciclada y producción de jitomate de exportación. CICATA-Querétaro-IPN. Tecnólogo@ Vol. 1, No. 2, 54-66.
- Gilbert, S. G., Shive, J. W. 1942. The significance of oxygen in nutrient substrates for plants: The oxygen requirement. Soil Science. 59: 143-152.
- Gislerød, H.R., Kempton R.J.1983.The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. Scientia Horticulturae. 20(1): 23-33.
- Goto, E., Both, A. J., Albright, L. D., Langhans, R. W., Leed, A. R. 1996. Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. Acta Hort 440:205-210.

- Goki, T., Yohei, Y., Kazushigue, N. 2001. Effect of Supersaturation of Dissolved Oxygen on the Growth of Tomato Plants and Nutrient Uptake in Hydroponic Culture. *Journal of Society of High Technology in Agriculture*. 13: 21-28.
- Grandis, A., Godoi, S., Silveira, E. M. 2010. Respostas fisiológicas de plantas amazônicas de regiões alagadas às mudanças climáticas globais. Artigo de revisão. *Revista Brasil. Bot.* 33(1):1-12.
- Jackson, M. B. 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. *Acta Horticulturae* 98: 61-78.
- Harcourt, P. 1987. *Química del Agua*. Instituto Nigeriano para la Oceanografía y la investigación marina. Nigeria. FAO. Consultado el 18 de noviembre del 2011. <http://www.fao.org/docrep/field/003/AC183E/AC183E04.htm>.
- Hurd, R. G., 1978. The root and its environment in the nutrient film technique of water culture. *Acta Hort.* Vol 82: 87 – 95.
- 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.
- Jenkins, D., Snoeyink, V. L., Ferguson, J. F., Leckie, J. 1983. *Química del agua*. Manual del laboratorio. Ed. Limusa. México. pp. 178.
- Kramer, P. 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. *Plant Physiol.* 26:722-736.

Luxmoore, R., Stolzy, L., Letey, J. 1970. Oxygen diffusion in the soil plant system.  
2. Respiration rate, permeability and porosity of consecutive excised segments  
of maize and rice roots. Agron. J. 62:317-321.

Maher, M. J. 1977. The use of hydroponics for the production of glasshouse  
tomatoes in Ireland. Proc. 4th. Int. Soilless Culture. I.W.O.S.C. Las Palmas. pp.  
161-169.

Morard, P., Silvestre, J. 1996. Plant injury to oxygen deficiency in the root  
environment of soilless culture: A review. Plant and Soil 184:243-254.

Metzger I., Dobbin, W. E. 1967. Role of fluids properties in gas Transfer.  
Environmental Science & Technology. 1.1. pp 57

Morgan. L. 2001. ¿Se están sofocando sus plantas? In. Boletín informativo. Abril /  
junio. Centro de Investigación de Hidroponia y Nutrición Mineral. Universidad  
Nacional Agraria La Molina. Perú. 11:2-8.  
<http://www.lamolina.edu.pe/FACULTAD/ciencias/hidroponia/boletin11.htm>.

Consultado el 11 de noviembre del 2011.

Morgan, L. 2011. Oxygenate, respirate o suffocate. Maximun Yield Magazzine.  
Archive article June 2011.  
[http://www.maximumyield.com/article\\_sh\\_db.php?articleID=704&submit=Go](http://www.maximumyield.com/article_sh_db.php?articleID=704&submit=Go).

Consultado el 23 de noviembre del 2011.

Nakano, Y. 2007. Review. Response Of Tomato Root Systems To Environmental.  
Stress Under Soilless Culture JARQ 41 (1):7 – 15 (2007)  
<Http://Www.Jircas.Affrc.Go.Jp>

- Nakano, Y., Watanabe, S., Okano, K., Tatsumi, J. 2001. Effects of flow rate of hydroponic nutrient solution on growth and ion uptake by tomato seedlings. *Environment Control in Biology*. 39(3): 199-204.
- Okubo, A. 1980. *Diffusion and ecological problems: Mathematical Models*. Springer. New York. USA.
- Parson, L., Kramer, P. 1974. Diurnal cycling in root resistance to water movement. *Physiol. Plant*. 30: 19-23.
- Pepkowitz, L. P., Shive, J. W. 1944. The importance of oxygen in the nutrient substrate for plants – ion absorption. *Soil Science* 57: 143 -154
- Resh, H. M. 2006. *Cultivos hidropónicos*. Ediciones Mundi-Prensa. 5ª ed. España. pp. 558.
- Shi, K.; Wen-Hai, H.; De-Kung, D.; Yang-Hong, Z.; Jing-Quan, Y. 2007. Low O<sub>2</sub> supply is involved in the poor growth in root-restricted plants of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Environ. Experim. Bot.* 61:181-189
- Sojka, R., Stolzy, L., Kaufmann, M. 1975. Wheat growth related to rhizosphere temperature and oxygen levels. *Agron. J.* 67:591-595.
- Tesi, R., Lenzi, A., Lombardi, P. 2003. Effect of salinity and oxygen level on lettuce grown in a floating system. *Acta Hort.* 609:383-387.
- Urrestarazu, M. 2004. *Tratado de cultivo sin suelo*. Mundi-Prensa, Almería. España. pp. 914.
- Urrestarazu, M., Mazuela, P. C. 2005. Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture. *Scientia Horticulturae* 106:484-490.
- Vartapetian, B. B., Jackson, M, B. 1997. Plant adaptations to anaerobic stress. *Ann Bot.*79(1):3-20.

- Wees, D., Steward, K. 1987. The influence of bicarbonate enrichment on dissolved carbon dioxide and oxygen used for lettuce production. *Soilless culture* 3(1):51-62.
- Wilson, J. D., Buffa, A. J. 2003. Sólidos y fluidos. En *Física*. Prentice Hall. Pp. 305-344.
- Winsor, G., Schwarz, M. 1990. Soilless culture for horticultural crop production. *FAO Plant Production and Protection*. Paper 101. FAO (ed). Roma. 188 pp
- Yoshida, S., Kitano, M., Eguchi, H. 1997. Growth of Lettuce Plants (*Lactuca Sativa* L.) Under Control Of Dissolved O<sub>2</sub> Concentration in Hydroponics. *Biotronics* 26, 39-45.
- Zeroni, M., Gale, J., Asher J. B. 1983. Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. *Sci Hortic* 19, 213-220.
- Zheng, Y., Wang, L., Dixon, M. 2007. An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae* 113: 162–165.



## **ANEXO**

# The Effects of Slope and Channel Nutrient Solution Gap Number on the Yield of Tomato Crops by a Nutrient Film Technique System under a Warm Climate

Roberto López-Pozos, Gabino Alberto Martínez-Gutiérrez, and Rafael Pérez-Pacheco

*Centro Interdisciplinario de Investigación Para el Desarrollo Integral Regional, Unida Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional, Xoxocotlan, Oaxaca, Mexico*

Miguel Urrestarazu<sup>1</sup>

*Departamento de Producción Vegetal, Universidad de Almería, Spain*

*Additional index words.* tomato, NFT, root oxygenation, slope, hypoxia

**Abstract.** Inadequate oxygenation of the nutrient solution (NS) in recirculating hydroponic systems leads to root hypoxia in several plants as a result of low oxygen solubility, and this is most notable in warm climates. Hypoxia affects crop nutrient and water absorption and results in reduced crop yield. However, increased air supply to the NS serves as a source of oxygen for the roots. To evaluate the incorporation of oxygen into the system, we varied the slope of 14-m long containers from 2% to 4% and applied zero, one, two, or three gaps of NS. The channel width measured 10 cm and was equidistant from the end points. The effect of the dissolved oxygen in the NS was measured by the production of a tomato cultivar. The oxygen dissolved in the NS was 5% greater in the channels with a 4% slope compared with those with a 2% slope. The channels that included the gaps incorporated a higher quantity of dissolved oxygen during cultivation. In the middle of the day, the available oxygen was the limiting factor for the yield. The best results were obtained with a steeper slope, and gaps also improved the tomato yield. More rapid changes in NS were associated with a higher quantity of dissolved oxygen.

A plant's roots must find oxygen in their immediate environment (Drew, 1983, 1992, 1997). Early studies of oxygen content in nutrient solutions in water systems demonstrate that inadequate aeration may cause hypoxia in plant roots, and this phenomenon is especially relevant when the oxygen concentration is the limiting factor for growth and forced aeration is expensive (Zeroni et al., 1983). In addition, water logging of the pore space in a substrate leads to a reduction or interruption in gas exchange between the atmosphere and the rhizosphere. In this case, the oxygen concentration required for the respiration of the root system becomes a limiting factor (Morard and Silvestre, 1996; Urrestarazu and Mazuela, 2005). Oxygen is critical in obtaining the energy required for growth and root survival as a result of its role as the final electron acceptor in the respiratory chain (Morard and Silvestre, 1996).

Temperature affects oxygen solubility; increases in the NS temperature are accompanied by a decrease in its solubility and a linear increase in the plant's physiological requirements of oxygen (Bartholomeus et al., 2008; Carrasco and Izquierdo, 1996). Root respiration doubles for every 10 °C increase in temperature up to 30 °C. In warm climates, where the NS can easily reach temperatures up to 25 °C, the nutrient film technique (NFT) is negatively impacted.

Researchers have tested NFT channel slopes of 0.5%, 1.0%, 2.0%, and 4% and observed the best growth for the 2% slope (Cooper, 1996). Schwarz (1995) suggests the use of a 1.33% slope (one in 75) to improve the aeration in the flowing solution by NFT. However, the slope should never be less than 1% (one in 100) or greater than 2% (one in 50). Consequently, many users of NFT systems in temperate regions worldwide use a 2% slope (e.g., Molyneux, 1988; Schwarz, 1995; Winsor and Schwarz, 1990, in the northern hemisphere and Carrasco and Izquierdo, 1996; Romer, 1993, in the southern hemisphere). Furthermore, the inclusion of gaps in the NS in the gutter itself is an important method of increasing the dissolved oxygen available to the roots.

The aim of this study was to evaluate the effect of different slopes (2% and 4%) and

number of gaps (zero, one, two, and three) in the NFT gutter on dissolved oxygen in the NS and on the production from a tomato cultivar in a warm climate.

## Materials and Methods

The research was performed in the greenhouse on the campus of the Interdisciplinary Research Center for Integrated Regional Development in Xoxocotlan, Oaxaca (Mexico) (lat. 17°01'31.45" N, long. 17°01'00" W; altitude: 1526 masl) between 15 June and 14 Dec. 2009. The climate is characterized by a hot summer.

The vegetal material used in this study was the tomato plant (*Lycopersicon esculentum* L.) cv. Pony Express. Tomato seeds were sown in a mixed substrate of peat:vermiculite (3:1, vol:vol). After 30 d, the seedlings were placed in a 14-m long NFT channel with a width of 10 cm, similar to that described by Carrasco and Izquierdo (1996). The plants were sown at a density of 2.2 plants/m<sup>2</sup>, and the Sonneveld and Straver (1994) NS was used in the experiment. The pH and electrical conductivity (EC) in the NS storage tank were monitored 5 d/week and were maintained between 5.8 and 6.2 (pH) and between 1.4 and 2.2 dS·m<sup>-1</sup> (EC). The NS was completely replaced when necessary. Application of the NS was intermittent with 10 min of watering (3 L·min<sup>-1</sup>) followed by 10 min without irrigation. Disinfection of the NS was performed according to the green chemistry criteria (Carrasco and Urrestarazu, 2010).

The treatments were administered using slopes of 2% (one in 50) and 4% (one in 25), each with zero, one, two, and three gaps that were free of the NS. Each gap was formed by a 5-cm water break. In agreement with Urrestarazu et al. (2005), an NS sample was collected at the end of each NFT channel. A Hanna Model HI 9146 Dissolved Oxygen Meter (Woonsocket, RI) was used to measure the oxygen content in the NS.

Fruit were harvested at maturity, and only commercial fruit were counted. Each plot (experimental unit) contained four NFT channels (four replications). Student's *t* test was used to differentiate between the means of the different treatments at a 5% significance level. The statistical significance of the differences was determined by one-way analysis of variance using Tukey's test.

The experimental designs and data analyses were based on the procedure described by Petersen (1994). The Stargraphics Plus 5 statistical package (Statistical Graphics Corp., 2010) was used for statistical analyses.

## Results and Discussion

The temperature in the greenhouse during the cultivation was maintained between 14 and 45 °C (data not shown). The oxygen content of the NS varied throughout the day (Table 1). In agreement with Gislerød and Adams (1983), Gislerød and Kempton (1983), and Urrestarazu et al. (2005), the minimal

Received for publication 10 Mar. 2011. Accepted for publication 1 Apr. 2011.

This work has been supported by *Fundación Produce Oaxaca A.C.*, project SIP-IPN 20082787 and FEDER AGL2010-18391.

<sup>1</sup>To whom reprint requests should be addressed; e-mail mgavilan@ual.es.

Table 1. Nutrient solution temperature (°C) and average dissolved oxygen in the nutrient film technique channel versus the treatment at different solar hours.

Slope (%)	Fall number	Temperature (°C)			Dissolved oxygen (%)		
		9:00	12:00	18:00	9:00	12:00	18:00
4	0	30.3 b	31.2 b	24.9 b	71.1 a	62.1 a	72.4 b
	1	29.6 b	30.4 a	23.3 a	76.8 b	68.4 b	72.8 b
	2	27.8 a	31.0 b	25.1 b	75.2 b	72.6 c	66.8 a
	3	26.7 a	30.4 a	27.4 c	77.1 b	75.7 c	67.5 a
2	0	30.0 c	30.4 a	24.4 a	69.7 a	60.1 a	64.8 b
	1	29.4 bc	30.9 ab	25.6 b	69.9 a	63.1 a	59.2 a
	2	28.5 b	30.9 ab	28.3 d	66.5 a	70.2 b	64.2 b
	3	27.2 a	31.3 b	27.0 c	71.4 b	70.1 b	62.3 ab

Significance

\*\* \*\*

\*\*Significance at  $P < 0.01$ . The letters indicate a significant difference ( $P < 0.05$ ) between different slope and gap numbers determined by one-way analysis of variance using Tukey's test. All data are an average of four replicates in the middle of the growing cycle.

Table 2. Tomato yield (g/plant) versus slope and gap number.

Slope (%)	Fall number	Harvests			Total
		First	Second	Third	
4	0	395.0 b	348.1 a	399.3 a	1142.4 a
	1	269.3 ab	695.0 ab	544.4 a	1508.7 ab
	2	700.5 c	1123.4 b	1190.4 b	3014.2 c
	3	699.4 c	1224.3 b	938.7 ab	2862.4 c
2	0	329.5 ab	220.1 a	449.9 a	999.5 a
	1	505.0 b	390.9 ab	418.2 a	1314.0 ab
	2	544.3 bc	746.3 bc	983.4 b	2274.0 bc
	3	608.5 c	1025.0 c	1025.8 b	2659.3 c

Significance

\* \*\*

\*, \*\*Significance at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively. The letters indicate a significant difference ( $P < 0.05$ ) between different fall numbers determined by one-way analysis of variance using Tukey's test. All data are the average of four replicates in the middle of the growing cycle.

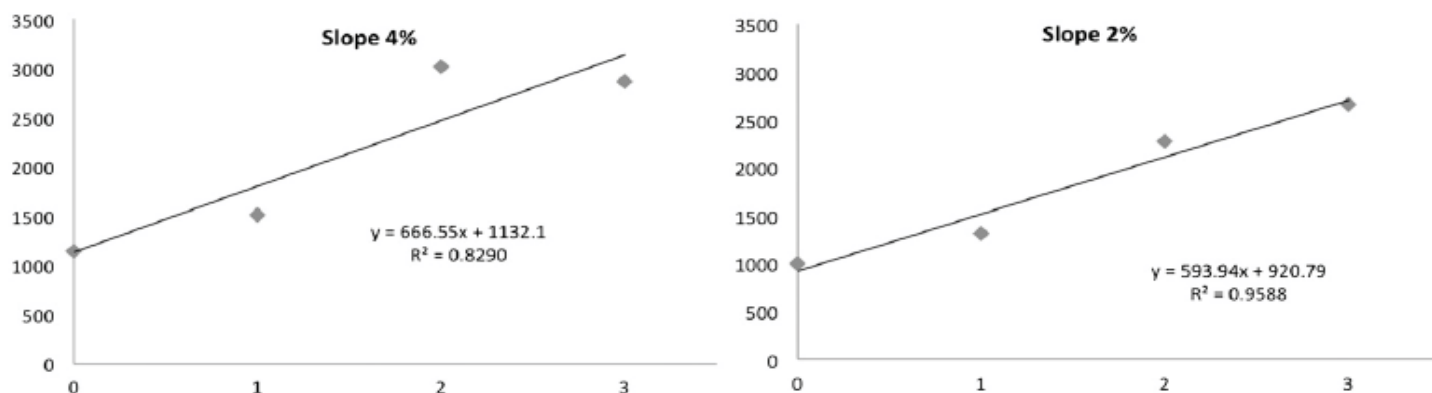


Fig. 1. Linear correlation between gap numbers in the channel (abscissa) and the yield (ordinate, g/plant) of a tomato crop by nutrient film technique modified for warm climates.

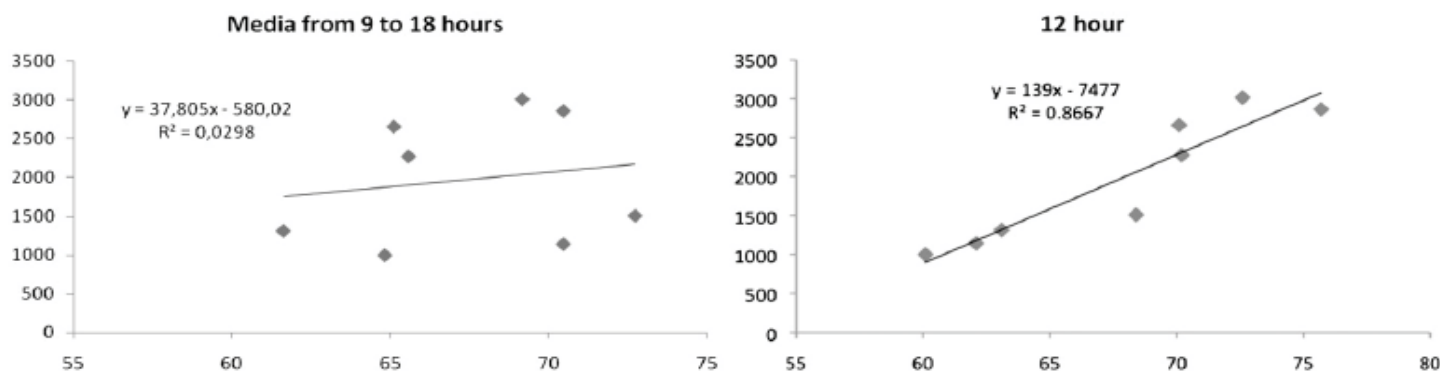


Fig. 2. Linear correlation between dissolved oxygen in the channel (abscissa, %) and the yield (ordinate, g/plant) of a tomato crop by nutrient film technique modified for warm climates.

quantities of dissolved oxygen were obtained in five of eight cases at  $\approx 1200$  HR. The 4% sloped NFT channel contained up to 5% more oxygen than the 2% sloped channel. During the first two periods (9 and 12 h) of the day, the quantity of dissolved oxygen in the solution increased proportionally with the number of gaps in the NFT.

The dissolved oxygen values in the NS were less than 65% in the 2% sloped NFT channels. This limit was reported by Zeroni et al. (1983) as the minimum allowable value, below which the growth of tomato is adversely affected.

The 4% sloped NFT channels displayed up to 15% improved yield over the 2% sloped channels (Table 2). Furthermore, for both slopes examined, the harvest productivity and the total yield increased with increases in the number of gaps in the channel. A correlation was observed between the number of gaps and the production for the 2% sloped channel, indicating that the limiting factor in this case was oxygen. The breaks in the solution application caused a greater increase in dissolved oxygen concentration than the 4% slope in the other NFT channel (Fig. 1).

Figure 2 shows the lack of a clear correlation between the production with each treatment and the average dissolved oxygen in the NS throughout the day. However, when the same relationship was investigated after 1200 HR (i.e., when the minimum level of oxygen available for the roots was reached), a close



correlation ( $R^2 > 0.8$ ) was observed. This indicates that in the presence of a temporal limitation on the availability of oxygen, the oxygen becomes the limiting factor for growth and causes a decline in potential production. Similar arguments are reported by Rivière et al. (1993) and Urrestarazu and Mazuela (2005).

### Conclusions

The slope of the container influenced the oxygenation of the NS with 4% slopes resulting in higher dissolved oxygen compared with the 2% slope. These results suggest that in warmer climates, the use of a steeper slope and the incorporation of gaps in the NFT channel can significantly improve crop productivity.

### Literature Cited

- Bartholomeus, R.P., J.P.M. White, and P.M. Bodegom. 2008. Critical soil conditions for oxygen stress to plant root: Substituting the Feddes-function by a process-based model. *Journal of Hydrology* 360:147–165.
- Carrasco, G. and J. Izquierdo. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante ('NFT'). Univ. de Talca (Chile). FAO.
- Carrasco, G. and M. Urrestarazu. 2010. Green chemistry in protected horticulture: The use of peroxyacetic acid as a sustainable strategy. *Intl. J. Mol. Sci.* 11:1999–2009.
- Cooper, A. 1996. *The ABC of NFT*. 2<sup>o</sup> ed. Grower Books, London, UK.
- Drew, M.C. 1983. Plant injury and adaptation to oxygen deficiency in the root environment: A review. *Plant Soil* 75:179–199.
- Drew, M.C. 1992. Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Sci.* 154:259–268.
- Drew, M.C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48:223–250.
- Gislerød, H.R. and P. Adams. 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Sci. Hort.* 21:311–321.
- Gislerød, H.R. and R.J. Kempton. 1983. The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. *Sci. Hort.* 20:23–33.
- Molyneux, C.J. 1988. *A practical guide to NFT*. Nutriculture Ltd, Mawdesley, Ormskirk, Lancashire, UK.
- Morad, P. and J. Silvestre. 1996. Plant injury to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. *Plant Soil* 184:243–254.
- Petersen, R.G. 1994. *Agricultural field experiments*. Marcel Dekker Inc., New York, NY.
- Rivière, L.M., S. Charpentier, B. Jeannin, and B. Kafka. 1993. Oxygen concentration of nutrient solution in mineral wools. *Acta Hort.* 342:93–101.
- Romer, J. 1993. *Hydroponic crop production*. Kangaroo Press Pty Ltd., Australia.
- Schwarz, M. 1995. *Soilless culture management*. Advanced Series in Agricultural Sciences 24. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Sonneveld, C. and N. Straver. 1994. *Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates*. 10 ed. Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk. n<sup>o</sup> 8. Serie: Voedingsplossingen glastuinbouw, The Netherlands.
- Statistical Graphics Corp. (2010) *STATGRAPHICS plus for Windows 5.0*. Statistical Graphics. Corp., Rockville, MD.
- Urrestarazu, M. and P.C. Mazuela. 2005. Effect of slow-release oxygen supply by fertigation on horticultural crops under soilless culture. *Sci. Hort.* 106:484–490.
- Urrestarazu, M., P.C. Mazuela, A. Boukhalfa, A. Arán, and M.C. Salas. 2005. Oxygen content and its diurnal variation in a new recirculating water soilless culture for horticultural crops. *HortScience* 40:1729–1730.
- Winsor, G.W. and M. Schwarz. 1990. *Soilless culture for horticultural crop production*. FAO Technical Paper No. 101. Rome, Italy, 188.
- Zeroni, M., J. Gale, and J. Ben-Asher. 1983. Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. *Sci. Hort.* 19:213–220.