

Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling

Producción de lechuga en invernadero con y sin recirculación de la solución nutritiva

Esaú del C. Moreno-Pérez¹; Felipe Sánchez-Del Castillo¹;
Jorge Gutiérrez-Tlaque¹; Lucila González-Molina^{2*}; Joel Pineda-Pineda³

¹Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5. Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Campo Experimental Valle de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Coatlinchán. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5. Estado de México, C. P. 56250, MÉXICO. Correo-e: lucilaag@colpos.mx tel.: 595 92 412805 ext. 162 (*Autor para correspondencia).

³Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5. Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

Abstract

Hydroponic systems with nutrient solution recycling provide more efficient water and fertilizer use, but over time it becomes difficult to sustain the nutritional balance and control diseases that attack plant roots, which eventually results in lower yield compared to systems where nutrient solution is not recycled. The aim of this study was to evaluate the yield and earliness of butter lettuce (Cortesana M1 variety) grown with different hydroponic systems and their efficiency in terms of water and nutrient use. A randomized block experimental design with four replicates and three treatments (T) was used: T1: tezontle substrate beds without recycling the drained nutrient solution; T2: tezontle substrate beds with recycling the drained nutrient solution; and T3: floating root system. Yield and earliness variables were measured and also the savings and efficiency in water and fertilizer use were estimated. Data were subjected to analysis of variance and Tukey's multiple comparisons of means test ($P = 0.05$). The best yield, earliness and efficiency in water and nutrient use occurred with the floating root system. There were no differences in yield or earliness between the substrate systems with or without nutrient solution recycling.

Keywords: *Lactuca sativa* L., soilless culture, hydroponics, substrate.

Resumen

Los sistemas hidropónicos con recirculación de la solución nutritiva, hacen un uso más eficiente de agua y fertilizantes, pero con el tiempo se hace difícil mantener el balance nutricional y controlar las enfermedades que atacan a la raíz de las plantas, lo que eventualmente repercute en menor rendimiento respecto a sistemas en donde dicha solución no se recircula. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento y precocidad de lechuga tipo mantequilla variedad Cortesana M1 cultivada con diferentes sistemas hidropónicos y la eficiencia de éstos en el uso de agua y nutrimentos. Se usó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro repeticiones y tres tratamientos (T): T1: camas con sustrato de tezontle sin recirculación de la solución nutritiva drenada; T2: camas con sustrato de tezontle con recirculación de la solución nutritiva drenada; y T3: sistema de raíz flotante. Se midieron variables de rendimiento y precocidad, asimismo se estimó el ahorro y eficiencia en el uso del agua y fertilizantes. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y comparaciones de medias de Tukey ($P = 0.05$). El mejor rendimiento, precocidad y eficiencia en el uso de agua y nutrimentos se tuvo con el sistema de raíz flotante. Entre los sistemas con sustrato con o sin recirculación de la solución nutritiva no hubo diferencias en rendimiento ni en precocidad.

Palabras clave: *Lactuca sativa* L., cultivo sin suelo, hidroponía, sustrato.

The citation of this article in APA6 style is: Moreno-Pérez, E. C., Sánchez-Del Castillo, F., Gutiérrez-Tlaque, J., González-Molina, L., & Pineda-Pineda, J. (2015). Production of greenhouse lettuce with and without recirculating nutrient solution. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 21(1), 43-55. doi: 10.5154/r.chsh. 2013.12.047



Introduction

In Mexico the area planted for vegetable production under protected agriculture conditions has increased in recent years (Global Agricultural Information Network [GAIN], 2010; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2010), reaching about 20,000 ha in 2013 (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C. [AMHPAC], 2013). The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the most widely grown vegetable in this system; however, intensive production of this vegetable already faces the problem of market saturation, which results in a lower price for this product and therefore fewer economic benefits to the producer, making it necessary to diversify the species grown under this system. One alternative is the production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a greenhouse using hydroponics (production system in which plants grow in a nutrient solution with or without a substrate as a means of support), as soil often facilitates the establishment of pathogens after several crop cycles (Takahashi, 1984). Added to this, intensive soil management also results in salt accumulation that affects yield due to changes in the soil's chemical and physical properties (Zhang, Jiang, & Liang, 2006). For lettuce plants to grow without nutritional limitations, the nutrient solution should have a pH of 5.5 to 6.5, electrical conductivity (EC) of 1.5 to 2.5 dS·m⁻¹ and the mineral nutrients must be dissociated into ionic form and in proportions and concentrations that avoid precipitates and antagonisms (Adams, 2004).

A hydroponic system is known as open when the drained nutrient solution is not reused and infiltration is allowed on the site or is conducted outside the greenhouse, and is called closed if the nutrient solution is collected for reuse in the culture, after sterilization and adjustment of pH, EC and nutrients.

Technological production packages that are being used in Mexico for protected agriculture consist of open systems, which have the disadvantage of high water and fertilizer consumption. It should be stressed that water is an increasingly scarce natural resource; also, fertilizers, which represent a significant percentage of the overall production cost in hydroponic systems, are expensive (Huang, 2009), making it necessary to look for crop production systems that are more efficient in terms of water and fertilizer use. In this sense, closed hydroponic systems have significant advantages in water and fertilizer savings compared to open systems (Dhakal, Salokhe, Tantau & Max, 2005; Sánchez del Castillo, González, Moreno, Pineda, & Reyes, 2014), as well as less environmental impact by avoiding infiltration of mineral salts that pollute rivers and seas (Massa, Incrocci, Maggini, Carmassi, Campiotti, & Pardossi, 2010; Pardossi, Incrocci, Massa, Carmassi, & Maggini, 2009). However, these systems

Introducción

En México la superficie de producción con hortalizas en condiciones de agricultura protegida ha aumentado en años recientes (Global Agricultural Information Network [GAIN], 2010; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2010), de tal manera que en 2013 se reportaron alrededor de 20,000 ha en dicho sistema (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C. [AMHPAC], 2013). El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada con este sistema; sin embargo, la producción intensiva de esta hortaliza actualmente ya enfrenta el problema de saturación del mercado, lo que trae como consecuencia disminución del precio del producto y por lo tanto, menores beneficios económicos para el productor, por lo que es necesario diversificar las especies que se cultivan bajo este sistema. Una alternativa es la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en invernadero e hidroponía (sistema de producción en el cual las plantas crecen en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte), ya que en suelo con frecuencia se facilita el establecimiento de patógenos después de varios ciclos de cultivo (Takahashi, 1984). Aunado a esto, con el manejo intensivo del suelo también se da la acumulación de sales que afecta el rendimiento, por los cambios en las propiedades químicas y físicas de éste (Zhang, Jiang, & Liang, 2006). Para que las plantas de lechuga crezcan sin limitaciones nutricionales, la solución nutritiva debe tener un pH de 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) de 1.5 a 2.5 dS·m⁻¹ y los nutrimentos minerales deben estar disociados en forma iónica y en proporciones y concentraciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004).

Al sistema hidropónico se le conoce como abierto cuando la solución nutritiva drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero, y se le llama cerrado si la solución nutritiva se recoge para ser utilizada nuevamente en el cultivo, previa esterilización y ajuste del pH, CE y nutrimentos.

Los paquetes tecnológicos de producción que se están utilizando en México para agricultura protegida, consisten en sistemas abiertos, los cuales tienen el inconveniente de un alto consumo de agua y de fertilizantes. Cabe resaltar que el agua es un recurso natural cada vez más limitado; asimismo, los fertilizantes que representan un importante porcentaje del costo de producción en los sistemas hidropónicos son caros (Huang, 2009), por lo que es necesario buscar sistemas de producción de cultivos más eficientes en el uso de agua y fertilizantes. En este sentido, los sistemas hidropónicos cerrados presentan ventajas importantes en el ahorro de agua y de fertilizantes respecto a los sistemas abiertos (Dhakal, Salokhe, Tantau, & Max, 2005; Sánchez del Castillo, González, Moreno, Pineda, & Reyes, 2014), así como en un menor impacto

have the disadvantage of resulting in a gradual increase in the electrical conductivity of the nutrient solution over time, an imbalance in the nutrient solution and an increased risk of spreading diseases that attack the root (Tüzel, Tunali, Tüzel, & Öztekin, 2009; Massa et al., 2010).

The problem of high EC (five or more for a crop like lettuce) can be minimized by renewing the nutrient solution whenever it reaches a conductivity threshold value (Dasgan & Ekici, 2005), and by replenishing the transpired water with plain water and adding all nutrients based on estimated daily consumption (Nakano, Sasaki, Nakano, Suzuki, & Takaichi, 2010).

The imbalance in the nutrient solution is generated by excesses of the ions least consumed by the plant (normally SO_4^- , Ca^{2+} and Mg^{2+}), which disrupts the balance of the nutrients and often increases the EC to levels that affect growth and yield, often forcing growers to discard the nutrient solution (Savvas, Sigrimis, Chatzieustratiou, & Paschalidis, 2009).

In the case of lettuce, although much is grown in soil and open field conditions, a management option that has been practiced in various parts of the world is the reuse of the nutrient solution, recirculating and collecting it for its reincorporation (closed system), after sterilization and adjustment of nutrients, pH and EC, using a substrate as a support. However, lettuce production can also be done by use of a floating root system in which substrate is omitted and the plants grow directly in a nutrient solution.

Based on the above, the aim of this study was to compare the components of yield and earliness achieved with different open and closed hydroponic lettuce production systems, as well as the expenditure and efficiency in the use of water and nutrients, under the hypothesis that with production systems with nutrient solution recycling and in particular with the floating root system, it is possible to obtain at least the same yield and earliness as in an open system with the advantage that it makes more efficient use of water and fertilizers.

Materials and methods

The experiment was conducted in a greenhouse at the Universidad Autónoma Chapingo, located in the county of Texcoco, State of Mexico, at 19° 31' north latitude and 98° 51' west longitude, and at an elevation of 2,240 m. Two independent experiments, one in the spring and the other in the summer of 2012, were established.

Butter lettuce (Cortesana M1 variety) obtained from the Hydro Environment company was used as plant material.

ambiental al evitar la infiltración de sales minerales que contaminan ríos y mares (Massa, Incrocci, Maggini, Carmassi, Campiotti, & Pardossi, 2010; Pardossi, Incrocci, Massa, Carmassi, & Maggini, 2009). No obstante, dichos sistemas tienen el inconveniente de que se da un incremento gradual en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva con el paso del tiempo, hay un desbalance de la solución nutritiva y se tiene mayor riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz (Tüzel, Tunali, Tüzel, & Öztekin, 2009; Massa et al., 2010).

El problema de alta CE (cinco o más para un cultivo como la lechuga) se puede minimizar al renovar la solución nutritiva cada vez que alcance un valor máximo de tolerancia en la conductividad (Dasgan & Ekici, 2005), además de reponer el agua transpirada con agua sola y adicionar todos los nutrimentos con base en un consumo diario estimado (Nakano, Sasaki, Nakano, Suzuki, & Takaichi, 2010).

El desbalance de la solución nutritiva se genera por excesos de los iones menos consumidos por la planta (normalmente SO_4^- , Ca^{2+} y Mg^{2+}), lo que rompe el equilibrio de los nutrimentos y muchas veces se aumenta la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento, obligando con frecuencia a desechar la solución nutritiva (Savvas, Sigrimis, Chatzieustratiou, & Paschalidis, 2009).

En el caso de la producción de lechuga, aunque gran parte se cultiva en suelo y a cielo abierto, una opción de manejo que se ha practicado en varias partes del mundo, es la reutilización de la solución nutritiva, recirculándola y colectándola para su nueva incorporación (sistema cerrado) previa esterilización y ajuste de nutrientes, pH y CE, utilizando un sustrato como soporte. Sin embargo, la producción de lechuga también se puede hacer mediante el uso de un sistema de cultivo en solución (raíz flotante), en el cual se prescinde de un sustrato y las plantas crecen directamente en la solución nutritiva.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio fue comparar los componentes del rendimiento y la precocidad que se logra con diferentes sistemas hidropónicos abiertos y cerrados en lechuga manejada en hidroponía, así como el gasto y eficiencia en el uso de agua y nutrientes, bajo la hipótesis de que con los sistemas de producción con recirculación de la solución nutritiva y en particular con el sistema de raíz flotante, es posible obtener al menos el mismo rendimiento y precocidad que en un sistema abierto con la ventaja de que se hace un uso más eficiente de agua y fertilizantes.

Materiales y métodos

El experimento se llevó a cabo en un invernadero del Posgrado en Horticultura del Departamento de Fitotecnia, en la Universidad Autónoma Chapingo,

The treatments (systems) evaluated were:

Treatment 1: Growing bed with tezontle substrate without recycling drained nutrient solution. This treatment was used as the control.

Treatment 2: Growing bed with tezontle substrate with recycling drained nutrient solution.

Treatment 3: Floating root.

To form the first two treatments, wooden crates (growing beds) of 1.9 m long, 0.9 m wide and 0.30 m deep were used as containers and placed with a slope of 5 %; this was done in order to more easily capture the drainage of the nutrient solution. The wooden crates were lined inside with 1,000-gauge black plastic. They were subsequently filled with gravel and tezontle sand; first a 7-cm layer of gravel (particles of 2 - 2.5 cm in diameter) and then a second, 18-cm layer of sand (particles of 3 - 5 mm in diameter) were placed.

To capture the drainage in both systems with and without nutrient solution recycling, 2-mm holes were made at the base of the plastic every 25 cm. With the same black plastic, a chute leading the drained water to an 18-L plastic bucket covered by a mosquito net was made.

The irrigation system that fed the plants in the first two treatments consisted of three, 450-L water tanks as reservoirs; two of them provided normal nutrient solution and the other a recycled solution previously sterilized with 25-Watt UV lamps. To apply irrigation in the substrate beds, irrigation lines were placed across the width of the beds. Three 16-mm drip tapes, with emitters every 15 cm, were then placed on top of the lines.

To form the floating root treatment (T3), wooden containers with the same dimensions as those used in the other systems (450 liters) were used. At a height of 25 cm, a hole of 5 cm in diameter was made to regulate the level of the nutrient solution. In this case, instead of substrate, only nutrient solution was used and the plants were held in place with styrofoam plates. To provide oxygen to the root (trying to keep between 5 and 8 mg·liter⁻¹ of dissolved oxygen), AC-9602 model aquarium pumps and polyethylene tubing with a diameter of 5 mm were used.

A randomized complete block experimental design with five replicates was used. The experimental unit was 55 plants, which were established in a real planting arrangement with a distance between rows and between plants of 16 cm (a population density of 32 useful plants·m⁻²).

The variables evaluated were: fresh weight per plant, dry weight per plant, leaf length and width, number of

localizado en el municipio de Texcoco, Estado de México a 19° 31' de latitud norte y 98° 51' de longitud oeste, y a una altura de 2,240 m. Se establecieron dos experimentos independientes, uno durante la primavera y otro en el verano de 2012.

Como material vegetal se utilizó lechuga tipo mantequilla variedad Cortesana M1 de la casa comercial Hydroenvironment.

Los tratamientos (sistemas) evaluados fueron:

Tratamiento 1: Cama de cultivo con sustrato de tezontle sin recirculación de la solución nutritiva drenada. Este tratamiento se utilizó como testigo.

Tratamiento 2: Cama de cultivo con sustrato de tezontle con recirculación de la solución nutritiva drenada.

Tratamiento 3: Raíz flotante.

Para conformar los dos primeros tratamientos se utilizaron contenedores que consistieron en cajones de madera (camas de cultivo) de 1.9 m largo, 0.9 m de ancho y 0.30 m de profundidad, colocados con una pendiente del 5 %; esto con el propósito de captar más fácilmente el drenaje de la solución nutritiva. Los cajones de madera fueron forrados al interior con un plástico negro de 1,000 galgas; posteriormente fueron rellenas con grava y arena de tezontle; primero se colocó una capa de 7 cm de grava (partículas de 2 - 2.5 cm de diámetro) y luego una segunda capa de 18 cm de arena (partículas de 3 - 5 mm de diámetro).

Para la captación del drenaje en ambos sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva, en la base del plástico se le hicieron perforaciones de 2 mm a cada 25 cm. Con el mismo plástico negro se hizo una canaleta que condujo el agua drenada a una cubeta de plástico de 18 litros cubierta por medio de una malla mosquitera.

El sistema de riego que alimentó a las plantas en los dos primeros tratamientos consistió de tres tinacos como depósitos, cada uno de 450 litros; dos de ellos suministraron la solución nutritiva normal y el otro una solución reciclada previamente esterilizada con lámparas UV de 25 Watts. Para aplicar el riego en las camas con sustrato, se colocaron líneas regantes a lo ancho de las camas y sobre estas tres cintas de goteo de 16 mm, con emisores a cada 15 cm.

Para la conformación del tratamiento de raíz flotante (T3), se utilizaron contenedores de madera con las mismas dimensiones de las usadas en los otros sistemas (450 litros de capacidad). A una altura de 25 cm, se le hizo un agujero de 5 cm de diámetro que sirvió para regular el nivel de la solución nutritiva. En este caso, en vez de sustrato, se utilizó solamente solución

leaves longer than 1 cm and days to harvest. In addition, an estimate of the savings in water and fertilizers (N, P, K and Ca) was made.

The seedlings were obtained in 200-cavity polystyrene trays. As substrate, a mixture of peat moss and perlite at a volumetric ratio of 1:1 was used. The transplant was done 30 days after sowing (das).

In the growing beds with substrate, the volume of irrigation with nutrient solution applied depended on weather conditions (light intensity, temperature and relative humidity) and the crop's phenological stage, but we sought to give an over-irrigation of 20 % above the required water volume. The nutrient solution used in all treatments contained the following nutrients (in mg·liter⁻¹): Nitrogen, 140; Phosphorus, 40; Potassium, 175; Calcium, 140; Magnesium 40; Sulfur, 140; Iron, 1.5; Manganese, 0.5; Boron, 0.5; Copper, 0.1 and Zinc, 0.1. The fertilizer sources were: calcium nitrate, potassium sulfate, 85 % phosphoric acid, magnesium sulfate, iron chelate, manganese sulfate, sodium tetraborate, copper sulfate and zinc sulfate.

Results and discussion

Yield and morphological variables

First cycle (Spring, 2012)

The floating root system had significantly more fresh weight and dry weight per plant compared to the treatments with and without nutrient solution recycling in beds with substrate on all evaluated dates; between these last two treatments, no statistical differences were found (Table 1).

The increased fresh weight and dry weight and greater earliness achieved in lettuce plants managed under the floating root system can be attributed to the fact that in this system the water and the nutrient concentration for the root are kept more stable in the rhizosphere area throughout the crop cycle, whereas in other systems both water and nutrients vary considerably between one watering and another, which discourages absorption (Silber & Bar-tal, 2008).

In measuring the length, width and number of leaves per plant, differences were only found for the first variable between the floating root systems and the system without nutrient solution recycling (Table 1).

At 32 dat, both dry and fresh weights in the floating root system were about double that of the other two systems. In addition, butter lettuce plants established in the floating root system in this spring cycle reached their commercial size and weight (at least 180 g) a month after being transplanted, while an additional

nutritiva y las plantas fueron sostenidas con placas de uncel. Para proporcionar oxígeno a la raíz (tratando de mantener entre 5 y 8 mg·litro⁻¹ de oxígeno disuelto), se utilizaron bombas de acuario modelo AC-9602 y manguera de polietileno con un diámetro de 5 mm.

Se usó un diseño experimental en bloques completos al azar con cinco repeticiones. La unidad experimental fue de 55 plantas, mismas que fueron establecidas en un marco real de plantación con una distancia entre hileras y entre plantas de 16 cm (una densidad de población de 32 plantas·m⁻² útil).

Las variables evaluadas fueron: peso fresco por planta, peso seco por planta, ancho y largo de hoja, número de hojas mayores a 1 cm y días a cosecha. Además se hizo una estimación del ahorro de agua y fertilizantes (N, P, K y Ca).

Las plántulas fueron obtenidas en charolas de poliestireno de 200 cavidades. Como sustrato de siembra se utilizó una mezcla de peat moss y perlita en proporción volumétrica de 1:1. El trasplante se hizo 30 días después de la siembra (dds).

En las camas de cultivo con sustrato, el volumen de riego con solución nutritiva aplicado dependió de las condiciones climáticas (intensidad de luz, temperatura y humedad relativa) y etapa fenológica del cultivo, pero se buscó dar un sobre riego de 20 % adicional al volumen de agua requerida. La solución nutritiva que se usó en todos los tratamientos contenía lo siguiente nutrimentos (en mg·litro⁻¹): Nitrógeno, 140; Fósforo, 40; Potasio, 175; Calcio, 140; Magnesio, 40; Azufre, 140; Fierro, 1.5; Manganese, 0.5; Boro, 0.5; Cobre, 0.1 y Zinc, 0.1. Las fuentes fertilizantes fueron: nitrato de calcio, sulfato de potasio, ácido fosfórico a 85 %, sulfato de magnesio, quelato de fierro, sulfato de manganeso, tetraborato de sodio, sulfato de cobre y sulfato de zinc.

Resultados y discusión

Variables del rendimiento y morfológicas

Primer ciclo (Primavera, 2012)

El sistema de raíz flotante presentó significativamente mayor peso fresco y peso seco por planta respecto a los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva en camas con sustrato en todas las fechas evaluadas; entre estos dos últimos tratamientos, no se encontraron diferencia estadística (Cuadro 1).

El aumento en peso fresco y peso seco y la mayor precocidad lograda en las plantas de lechuga manejadas bajo el sistema de raíz flotante, se puede atribuir a que en este sistema el agua y la concentración de nutrimentos para la raíz se mantienen más estables

Table 1. Comparison of means between treatments of different variables on butter lettuce crop type. Cycle spring 2012.**Cuadro 1. Comparación de medias entre tratamientos de diferentes variables en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo primavera, 2012.**

Variable	Treatment/Tratamiento	Days after transplanting/Días después del trasplante			
		16	23	32	39
Fresh weight per plant (g)/ Peso fresco por planta (g)	T1	2.9 b	15.7 b	82.1 b	173.5 a
	T2	3.9 b	14.5 b	85.2 b	186.3 a
	T3	13.2 a	17.5 a	197.2 a	-
	DMS	4.7	0.2	34.2	35.5
Dry weight per plant (g)/ Peso seco por planta (g)	T1	0.3 b	1.34 b	4.57 b	7.52 a
	T2	0.4 b	1.26 b	4.52 b	8.36 a
	T3	1.1 a	3.63 a	8.74 a	-
	DMS	0.3	0.45	1.60	1.21
Number of leaves per plant/ Número de hojas por planta	T1	-	-	17.6 a	-
	T2	-	-	17.6 a	-
	T3	-	-	18.7 a	-
	DMS			1.91	
Blade length (cm)/ Longitud de hoja (cm)	T1	-	-	18.90 b	-
	T2	-	-	19.25 ab	-
	T3	-	-	20.20 a	-
	DMS			1.21	
Blade width (cm)/ Ancho de hoja (cm)	T1	-	-	14.89 a	-
	T2	-	-	14.80 a	-
	T3	-	-	14.75 a	-
	DMS			1.00	

Values with the same letter within each column are statistically different according to Tukey's test at $P = 0.05$; DMS = least significant difference; T1 = bed with substrate without recirculation; T2 = bed with recirculating substrate; T3 = floating root.

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P = 0.05$; DMS = diferencia mínima significativa; T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante.

nine days were required under the other two systems.

The difference in dry weight and fresh weight in favor of the floating root system was observed from 16 dat and was maintained throughout the crop cycle, suggesting that the plants established in beds with substrate, either with or without nutrient solution recycling, had a delay in their growth due to some transplant stress such as uneven moisture, lower nutrient availability or changes in the EC, a situation that did not occur with the floating root system.

This effect can also be explained by the fact that with the floating root system the pH and EC of the nutrient solution were more stable throughout the crop cycle, because although the three treatments started with a solution with pH 5.6 and EC 1.8 dS·m⁻¹, in the drained solution in the recycling and non-recycling systems, the pH and EC gradually increased to values of 9.0 and 3.7, respectively, at the end of the crop cycle due to the influence of accumulated salts in the substrate (Castellanos & Borbón, 2009; Pineda

en el área de la rizosfera a lo largo del ciclo de cultivo, en cambio en los otros sistemas tanto el agua como los nutrientes varían de manera considerable entre un riego y otro, lo que desfavorece la absorción (Silber & Bar-tal, 2008).

Al medirse la longitud, ancho y número de hojas por planta, solamente hubo diferencias para la primera variable entre los sistemas de raíz flotante y el sistema sin recirculación de la solución nutritiva (Cuadro 1).

A los 32 ddt, ambos pesos seco y fresco en el sistema de raíz flotante fueron aproximadamente el doble que en los otros dos sistemas. Además, las plantas de lechuga mantequilla establecidas en raíz flotante en este ciclo de primavera alcanzaron su tamaño y peso comercial (al menos 180 g) al mes de ser trasplantadas, mientras que bajo los otros dos sistemas se requirieron nueve días más.

La diferencia en peso seco y peso fresco a favor del sistema de raíz flotante, se observó desde los 16 ddt y se

et al., 2011); by contrast, in the floating root system, both parameters remained close to their initial values (pH 6.0 and EC 2.2), since the water lost through evapotranspiration, which could eventually lead to salinization by consuming more water than salts, was replenished daily and only occasionally (when the EC decreased to levels of 1.2) were nutrients added to the water and the corresponding pH adjustment made.

Second cycle (Summer, 2012)

For this cycle, the behavior of the treatments was similar to that of the first cycle, in that the floating root system produced lettuce with higher fresh weight than the bed systems with substrate, although in dry weight, this difference occurred only with respect to the bed treatment with substrate but without recycling at 10 and 17 dat (Table 2).

Between the growing systems in substrate beds with or without nutrient solution recycling, there was no difference for any variable. Similar results were reported by Sánchez et al. (2014) in American cucumber cultivated in growing beds filled with tezontle as substrate without nutrient solution recycling.

In this second cycle, due to environmental conditions, especially the temperature in which the plants grew in the greenhouse (in spring the average temperature during plant development ranged from 17 to 24 °C and in summer from 23 to 29 °C, with maximum temperatures from 36 to 44 °C and 32 to 45 °C and minimums from 3 to 13 °C and 10 to 16 °C, respectively), the time to harvest was shorter than in the spring period as also indicated by Fallovo, Youssef, Rea, and Battistelli (2009); specifically, with the floating root system, the harvest was made at 24 dat, while with the crop in substrate beds, either with or without nutrient solution recycling, the harvest was at 29 dat. This again shows the greater earliness with which lettuce is obtained in the floating root system compared to the other two systems evaluated, as well as a more favorable environment for the root (uniform temperature, constant moisture and nutrient availability without drastic changes in electrical conductivity).

In the first cycle the temperature of the root environment, for systems with and without nutrient solution recycling, ranged from 14 to 28 °C with an average of 20 °C, while with the floating root it ranged from 18 to 24 °C with an average of 21 °C. According to Jaques and Hernández (2005), the optimal temperature for growing lettuce is from 18 to 23 °C, a condition given by the floating root system.

The same occurred in the second assessment cycle, only in this case the recorded temperatures were slightly higher compared to those of the first cycle. It is noteworthy that the temperature of the root in the

mantuvo a lo largo del ciclo de cultivo, lo que sugiere que la plantas establecidas en camas con sustrato ya sea con o sin recirculación de la solución nutritiva tuvieron un retraso en su crecimiento por algún estrés de trasplante como humedad desuniforme, menor disponibilidad de nutrimentos o variaciones en la CE, situación que no ocurrió con el sistema de raíz flotante.

Este efecto puede explicarse también porque con el sistema de raíz flotante el pH y la CE de la solución nutritiva fueron más estables a lo largo del ciclo de cultivo, pues aunque en los tres tratamientos se partió de una solución con pH de 5.6 y CE de 1.8 dS·m⁻¹, en la solución drenada en los sistemas con recirculación y sin recirculación, el pH y la CE aumentó paulatinamente hasta un valor de 9.0 y 3.7, respectivamente al final del ciclo de cultivo por el arrastre de sales acumuladas en el sustrato (Castellanos & Borbón, 2009; Pineda et al., 2011), mientras que en el sistema de raíz flotante, ambos parámetros se mantuvieron cercanos a sus valores iniciales (pH de 6.0 y CE de 2.2), ya que el agua que se perdía por evapotranspiración, lo que eventualmente podría ocasionar salinización al consumirse más agua que sales, se reponía diariamente y sólo ocasionalmente (cuando la CE disminuía a niveles de 1.2), se agregaron nutrientes en el agua, y se hizo el ajuste de pH correspondiente.

Segundo ciclo (Verano, 2012)

Para este ciclo, el comportamiento de los tratamientos fue similar al primero, por lo que con el sistema de raíz flotante se obtuvieron lechugas de mayor peso fresco que con los sistemas de camas con sustrato, aunque en peso seco, esta diferencia ocurrió sólo con respecto al tratamiento de camas con sustrato sin recirculación a los 10 y 17 ddt (Cuadro 2).

Entre los sistemas de cultivo en camas con sustratos con o sin recirculación de la solución nutritiva no hubo diferencia para ninguna variable. Resultados similares fueron reportados por Sánchez et al. (2014) en pepino americano cultivado en camas de cultivo rellenas de tezontle como sustrato con y sin recirculación de la solución nutritiva.

En este segundo ciclo, debido a las condiciones ambientales sobre todo de temperatura en que crecieron las plantas en el invernadero (en primavera la temperatura media durante el desarrollo de las plantas osciló entre 17 y 24 °C, y en el verano de 23 a 29 °C, con máximas de 36 a 44 °C y 32 a 45 °C y mínimas de 3 a 13 °C y de 10 a 16 °C, respectivamente), la cosecha de la lechuga fue en menor tiempo que en el periodo de primavera como también lo señalan Fallovo, Youssef, Rea, y Battistelli (2009), de tal forma que con raíz flotante, la cosecha se hizo a los 24 ddt, mientras que con el cultivo en camas con sustrato ya

Table 2. Comparison of means among treatments of different variables in the cultivation of butter lettuce. Summer cycle, 2012.

Cuadro 2. Comparación de medias entre tratamientos de diferentes variables en el cultivo de lechuga tipo mantequilla. Ciclo verano, 2012.

Variable	Treatment / Tratamiento	Days after transplanting / Días después del trasplante			
		10 ddt	17 ddt	24 ddt	29 ddt
Fresh weight per plant (g) / Peso fresco por planta (g)	T1	7.5 b	38.6 b	186.6 b	219.6 a
	T2	18.4 ab	35.2 b	168.6 b	219.4 a
	T3	24.6 a	101.5 a	228.5 a	-
	DMS	15.4	9.9	28.5	14.8
Dry weight per plant (g) / Peso seco por planta (g)	T1	0.6 ab	2.2 b	7.3 b	8.2 a
	T2	1.2 a	2.0 b	6.6 b	8.0 a
	T3	1.5 a	4.9 a	8.8 a	-
	DMS	0.74	0.45	1.06	0.48
Number of leaves per plant / Número de hojas por planta	T1	-	-	17.9 a	-
	T2	-	-	18.5 a	-
	T3	-	-	19.1 a	-
	DMS	-	-	1.87	-
Blade length (cm) / Longitud de hoja (cm)	T1			19.3 a	
	T2			19.5 a	
	T3			19.7 a	
	DMS			1.44	
Blade width (cm) / Ancho de hoja (cm)	T1	-	-	14.80 a	-
	T2	-	-	14.35 a	-
	T3	-	-	15.22 a	-
	DMS	-	-	1.28	-

Values with the same letter within each column are statistically different according to Tukey's test at $P = 0.05$; LSD = least significant difference; T1 = bed with substrate without recycling; T2 = bed with substrate with recycling; T3 = floating root.

Valores con la misma letra dentro de cada columna son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P = 0.05$; DMS = diferencia mínima significativa; T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante.

floating root system was very uniform and favorable (daytime average of 20 °C) over both crop cycles.

Lettuce grown in the spring reached, at the end of the cycle, an average fresh weight of 187.3 g for the three systems evaluated, while the average summer weight was 222.5 g. The first weight was lower than that reported by Stepowska and Kowalczyk (2001) in butter lettuce grown in the spring under rockwool (236 g), but when the lettuces were established in the autumn the fresh weight was lower (136 g). According to Valverde, Chang, and Rodriguez (2009), this behavior is because the amount of incident light changes from cycle to cycle which affects the activity of enzymes such as nitrate reductase.

The differences in lettuce weight obtained in the two crop cycles also coincides with the findings of Fallovo et al. (2009), who established that plants growing in the spring season have less growth and yield compared to summer plants, but higher leaf quality

sea con o sin recirculación de la solución nutritiva la cosecha fue a los 29 ddt. Esto nuevamente muestra la mayor precocidad con que se obtiene la lechuga en el sistema de raíz flotante respecto a los otros dos sistemas evaluados, además de un ambiente más favorable para la raíz (temperatura uniforme, humedad constante y disponibilidad de nutrimentos sin cambios drásticos en la conductividad eléctrica).

En el primer ciclo la temperatura del ambiente de la raíz, para los sistemas con y sin recirculación de la solución nutritiva varió de 14 a 28 °C con una media de 20 °C, mientras que con raíz flotante varió de 18 a 24 °C, con una media de 21 °C. De acuerdo con Jaques y Hernández (2005), la temperatura óptima para el cultivo de lechuga es de 18 a 23 °C, condición que se dio con el cultivo en raíz flotante.

Lo mismo ocurrió en el segundo ciclo de evaluación, solamente que en este caso, las temperaturas registradas fueron ligeramente mayores respecto a las del primer

is achieved; Cracker and Seibert (1983) grew lettuce under controlled conditions and found that the time required to obtain commercial-sized plants decreases with increasing incident solar radiation.

With the fresh weight per plant achieved in this second cycle (219 g per plant in the T1 and T2 treatments and 228 g per plant in the T3 treatment), and given the population density established ($32 \text{ plants}\cdot\text{m}^{-2}$), a yield equivalent to $7.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ is obtained in treatments with and without nutrient solution recycling over a 29-day period from transplanting to harvest end, compared to $7.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ with the floating root system over a 24-day period. With the latter system, the harvest is achieved in less time, allowing more cycles per year and therefore greater annual productivity. Based on the observed changes in EC in the different treatments, it was expected that growth in the bed treatments with substrate would be affected (Savvas et al., 2009), but the final yield results show that this did not happen because the lettuce was harvested within 40 dat, which contributed to the EC of the nutrient solution not increasing to levels affecting growth.

Water and fertilizer expenditure and savings

With the nutrient solution recycling and floating root systems, there were significant savings in nutrient solution, which implies savings in water and fertilizers (Table 3).

In the crop established in the spring, the floating root treatment allowed a 40.7 % water savings and the substrate bed system had a 24.7 % savings, compared to the substrate bed system without recycling in which no savings were obtained (Table 3). Similar results were obtained by Dhakal et al. (2005) and Sánchez et al. (2014) in evaluating open and closed hydroponic systems.

In the summer, although water savings were lower, it was also the floating root system where a saving of 33.6 % was achieved as shown in Table 4.

In both crop cycles, the floating root system also had lower water consumption per plant and increased efficiency in terms of liters of water required per kilogram of fresh lettuce obtained.

The results of the use of nutrients show that the substrate bed system without recycling had an expenditure of 17.5, 14.0, 14.0 and $4.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ of potassium, calcium, nitrogen and phosphorus, respectively. With the recycling and floating root systems, the expenditure was lower compared to the non-recycling system, but the floating root system achieved the greatest savings and efficiency gains in terms of grams of nutrient required per kilogram of lettuce grown (Tables 5 and 6).

ciclo. Es de resaltar que la temperatura de la raíz, en el sistema de raíz flotante fue muy uniforme y favorable (promedio de 20°C diaria) a lo largo de ambos ciclos de cultivo.

Las lechugas cultivadas en primavera, al final del ciclo alcanzaron un peso fresco de 187.3 g en promedio, de los tres sistemas evaluados, mientras que las de verano el peso promedio fue de 222.5 g. El peso de las primeras fue menor a lo reportado por Stepowska y Kowalczyk (2001) en lechuga mantequilla cultivada en primavera bajo lana de roca (236 g), pero cuando las lechugas fueron establecidas en otoño el peso fresco fue menor (136 g). De acuerdo con Valverde, Chang, y Rodríguez (2009) este comportamiento se debe a que la cantidad de luz incidente cambia de un ciclo a otro lo que afecta la actividad de enzimas como la nitrato reductasa.

Las diferencias en peso de lechuga que se obtuvieron en ambos ciclos de cultivo también coinciden con Fallovo et al. (2009) quienes establecieron que las plantas que crecen en la temporada de primavera, disminuyen su crecimiento y rendimiento respecto al verano, pero se logra mayor calidad de hoja; Cracker y Seibert (1983) al cultivar lechugas bajo condiciones controladas, encontraron que el tiempo requerido para obtener plantas de tamaño comercial disminuye a medida que aumenta la radiación solar incidente.

Con el peso fresco por planta logrado en este segundo ciclo (219 g por planta en los tratamientos T1 y T2 y de 228 g por planta en el tratamiento T3), y dada la densidad de población establecida ($32 \text{ plantas}\cdot\text{m}^{-2}$), se tiene un rendimiento equivalente a $7.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ en los tratamientos con y sin recirculación de la solución nutritiva en un periodo de 29 días de trasplante a final de cosecha y $7.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ con el sistema de raíz flotante en un periodo de 24 días. Con este último sistema, la cosecha se logra en menos tiempo, lo que permite obtener más ciclos por año y por lo tanto una mayor productividad anual. Con base en los cambios observados en la CE en los diferentes tratamientos, era de esperarse que en los tratamientos de cama con sustrato se afectara el crecimiento (Savvas et al., 2009), pero los resultados del rendimiento final muestran que esto no sucedió así debido a que la lechuga se cosechó en menos de 40 ddt, lo que contribuyó a que la CE de la solución nutritiva no aumentara a niveles que afectara el crecimiento.

Gasto y ahorro de agua y fertilizantes

Con el sistema de recirculación de la solución nutritiva y el de raíz flotante, se tuvieron ahorros importantes de solución nutritiva, lo que implica ahorro de agua y fertilizantes (Cuadro 3).

En el cultivo establecido en primavera, el tratamiento de raíz flotante permitió un ahorro de agua del 40.7 % y el

Table 3. Patterns of water use in butter lettuce with different treatments. Spring cycle, 2012.**Cuadro 3. Patrones de uso del agua en lechuga tipo mantequilla con diferentes tratamientos. Ciclo primavera, 2012.**

Treatment / Tratamiento	Expense (liter·m ⁻²) / Gasto (litro·m ⁻²)	Saving (%) / Ahorro (%)	Consumption (liter·plant ⁻¹) / Consumo (litro·planta ⁻¹)	Efficiency (liter·kg ⁻¹) / Eficiencia (litro·kg ⁻¹)	Yield (kg·m ⁻²) / Rendimiento (kg·m ⁻²)
T1	100.0	-	3.1	18.0	5.55
T2	75.3	24.7	2.3	12.6	5.96
T3	59.3	40.7	1.8	9.4	6.31

T1 = bed with substrate without recycling; T2 = bed with substrate with recycling; T3 = floating root.

T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante.

According to Gonella, Seiio, Conversa, and Santamarina (2003), systems based on the use of solid substrates lose water more rapidly than salts and as a result the pH increases, which promotes NO₃⁻ uptake. Fallovo et al. (2009) indicate that the consumption of nutrients by butter lettuce in a nutrient recycling system per day per plant throughout the year averages from 8 to 16 mg of NO₃⁻, from 2 to 5.5 mg of P₂O₅ and from 11.5 to 23 mg of K₂O⁺, results that partially match those of the present experiment.

The present results are important both economically and ecologically, especially considering that in intensive commercial lettuce production it is possible to obtain up to 10 production cycles per year, due to the crop's short cycle. Thus, in the substrate bed systems without nutrient solution recycling, about 10,000 m³·ha⁻¹·year⁻¹ of water is required, while in the floating root system only 6,000 m³ would be needed, which is a significant difference, especially in conditions where water is limited.

On the other hand, in the system without nutrient solution recycling, based on averaging the two cycles evaluated and only to provide potassium, approximately 3,725 kg per hectare of potassium sulphate per year is

de recirculación 24.7 %, respecto al sistema de camas con sustrato sin recirculación en el que no se tuvo ningún ahorro (Cuadro 3). Resultados similares fueron obtenidos por Dhakal et al., (2005) y Sánchez et al. (2014) al evaluar sistemas hidropónicos abiertos y cerrados.

En el verano, aunque el ahorro de agua resultó menor, fue también con raíz flotante donde se logró un ahorro del 33.6 % como se observa en la Cuadro 4.

En ambos ciclos de cultivo, con el sistema de raíz flotante también se tuvo menor consumo de agua por planta y mayor eficiencia en términos de litros de agua requeridos por kilogramo de lechuga fresca obtenido.

Los resultados del uso de nutrimentos muestran que con el sistema de camas con sustrato sin recirculación se tuvo un gasto de 17.5, 14.0, 14.0 y 4.2 g·m⁻² de potasio, calcio, nitrógeno y fósforo, respectivamente. Con los sistemas de recirculación y con raíz flotante el gasto fue menor respecto al sistema sin recirculación, pero fue con el sistema de raíz flotante donde se logró el mayor ahorro y la mayor eficiencia en términos de gramos de nutrimento requeridos por kilogramo de lechuga producida (Cuadros 5 y 6). De acuerdo con Gonella, Seiio, Conversa, y Santamarina

Table 4. Patterns of water use in butter lettuce with different treatments. Summer cycle, 2012.**Cuadro 4. Patrones de uso del agua en lechuga tipo mantequilla con diferentes tratamientos. Ciclo verano, 2012.**

Culture system / Sistema de cultivo	Expense (liter·m ⁻²) / Gasto (litro·m ⁻²)	Saving (%) / Ahorro (%)	Consumption (liter·plant ⁻¹) / Consumo (litro·planta ⁻¹)	Efficiency (liter·kg ⁻¹) / Eficiencia (litro·kg ⁻¹)	Yield (kg·m ⁻²) / Rendimiento (kg·m ⁻²)
T1	89.1	-	2.8	12.6	7.03
T2	76.0	14.3	2.3	10.8	7.02
T3	65.8	33.6	2.0	9.0	7.31

T1 = bed with substrate without recirculation; T2 = bed with recirculating substrate; T3 = floating root.

T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante.

Table 5. Patterns of nutrient use in butter lettuce with different treatments. Spring cycle, 2012.**Cuadro 5. Patrones de uso de nutrimentos en lechuga tipo mantequilla con diferentes tratamientos. Ciclo primavera, 2012.**

Nutrient/ Nutrimento	Treatment/ Tratamiento	* Used Nutrient (g·m ⁻²)/ *Nutrimento utilizado (g·m ⁻²)	Saving nutrient (%) / Ahorro de nutrimento (%)	Efficiency (g·kg ⁻¹) / Eficiencia (g·kg ⁻¹)
K ⁺	T1	17.5	-	3.15
	T2	15.3	12.5	2.56
	T3	6.9	60.1	1.09
Ca ⁺⁺	T1	14.0	-	2.52
	T2	9.5	32.1	1.59
	T3	1.8	87.1	0.28
N	T1	14.0	-	2.52
	T2	9.8	30.0	1.64
	T3	1.2	91.4	0.19
P	T1	4.2	-	0.75
	T2	4.1	2.4	0.68
	T3	2.1	50.0	0.33

T1 = bed with substrate without recirculation; T2 = bed with recirculating substrate; T3 = floating root. *Nutrient consumed by the + ground + discarded in the drained water fixed on the substrate.

T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante. *Nutrimento consumido por la planta + desechado en el agua drenada + fijado en el sustrato.

Table 6. Patterns of nutrient use in butter lettuce with different treatments. Summer cycle, 2012.**Cuadro 6. Patrones de uso de nutrimentos en lechuga tipo mantequilla con diferentes tratamientos. Ciclo verano, 2012.**

Nutrient/ Nutrimento	Treatment/ Tratamiento	*Nutrient used (g·m ⁻²)/ *Nutrimento utilizado (g·m ⁻²)	Nutrient saving (%) [§] / Ahorro de nutrimento (%) [§]	Efficiency (g·kg ⁻¹) / Eficiencia (g·kg ⁻¹)
K ⁺	T1	15.9	-	2.26
	T2	15.7	1.3	2.23
	T3	12.8	19.5	1.75
Ca ⁺⁺	T1	12.5	-	1.78
	T2	12.4	0.8	1.77
	T3	4.8	61.6	0.66
N	T1	12.4	-	1.76
	T2	12.4	0.0	1.76
	T3	6.0	51.6	0.82
P	T1	3.8	-	0.54
	T2	3.8	0.0	0.54
	T3	2.2	42.1	0.30

*Savings with regard to the substrate bed system without recycling.

T1 = bed with substrate without recycling; T2 = bed with substrate without recycling; T3 = floating root. *Nutrient consumed by the plant + discarded in the drained water + fixed in the substrate.

*Ahorro con respecto al sistema de camas con sustrato sin recirculación.

T1 = cama con sustrato sin recirculación; T2 = cama con sustrato con recirculación; T3 = raíz flotante. *Nutrimento consumido por la planta + desechado en el agua drenada + fijado en el sustrato.

used. At a current cost of \$20 MXN·kg, an investment of \$74,000.00 MXN is required, while the floating root system would use 2,186 kg of potassium sulphate, resulting in an investment of \$43,720 MXN (a savings of \$30,000.00 MXN·ha⁻¹·yr⁻¹ only in this nutrient). Doing a similar calculation to provide calcium, nitrogen and phosphorus, in addition to potassium, shows that a non-recycling system requires an investment of \$139,000 MXN·ha⁻¹·year⁻¹ versus \$52,000 MXN with the floating root system. In addition to the economic advantage achieved with the latter system, there is less contamination by salts that are deposited into the water table and eventually contaminate seas and rivers, as occurs when open systems are used (Massa et al., 2010).

Therefore, despite the technical difficulty and high initial cost involved in installing a floating root system, it offers important advantages that make it economically and ecologically viable for greenhouse lettuce producers.

Conclusions

The floating root system obtained better growth and earliness, and more efficient water and nutrient use compared to the growing bed systems with substrate.

Lettuce growth and yield were similar between substrate bed systems with and without nutrient solution recycling. The difference between them was the more efficient use of water and nutrients in the latter system.

End of English version

References / Referencias

- Adams, P. (2004). Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo en relación al suelo. In: G. M. Urrestarazu (Ed.), *Tratado de Cultivo sin Suelo* (pp. 81-111). Madrid, España. Editorial Mundi-Prensa.
- Asociación Mexicana de Horticultura Protegida A. C. (AMHPAC). (2013). Consultado 20-10-2013 en <http://www.houseofproduce.com/news/production/?storyid=141>
- Castellanos, J. Z. & Borbón, M. C. (2009). Panorama de la horticultura protegida en México. In: J. Z. Castellanos (Ed.), *Manual de Producción de Tomate en Invernadero*, 1-18. Celaya, Guanajuato, México: Intagri Editor.
- Cracker, L. E. & Seibert, M. (1983). Light and the development of grand rapids lettuce. *Canadian Journal of Plant Science*, 63, 277-281. Obtenido de <http://pubs.aic.ca/doi/pdf/10.4141/cjps83-026>
- Dasgan, H. & 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 Horticulturae*, 697, 399-408. Obtenido de

(2003) en los sistemas basados en el uso de sustratos sólidos, se pierde más rápidamente agua que sales y como consecuencia el pH aumenta, lo que favorece la absorción de NO₃⁻. Fallovo et al. (2009) indican que el consumo de nutrimentos para lechuga tipo mantequilla, en un sistema con recirculación de nutrimentos por día por planta en promedio a lo largo del año, es de 8 a 16 mg de NO₃⁻, de 2 a 5.5 mg de P₂O₅ y de 11.5 a 23 mg de K₂O⁺; resultados que parcialmente coinciden con los del presente experimento.

Los presentes resultados son importantes tanto desde el punto de vista económico como ecológico, para la producción comercial intensiva de lechuga en donde es posible obtener hasta 10 ciclos de producción por año, debido a su ciclo corto. Así, en el sistema de camas con sustrato sin recirculación de la solución nutritiva, se requiere aproximadamente un gasto de agua de 10,000 m³·ha⁻¹·año⁻¹, mientras que con el sistema de raíz flotante se ocuparían únicamente 6,000 m³, que en condiciones donde el agua es limitada, esta diferencia en el requerimiento resulta significativa.

Por otra parte, en el sistema sin recirculación de la solución nutritiva, en promedio de los dos ciclos evaluados, solamente para aportar potasio se ocupa por hectárea aproximadamente 3,725 kg de sulfato de potasio al año. A un costo actual de \$20 MXN·kg se requiere de una inversión de \$74,000.00 MXN, mientras que con el sistema de raíz flotante, se ocuparía 2,186 kg de sulfato de potasio, que resulta en una inversión de \$43,720 MXN (un ahorro de \$30,000.00 MXN·ha⁻¹·año⁻¹ únicamente en este nutrimento). Haciendo un cálculo similar para aportar calcio, nitrógeno y fósforo, además del potasio, con el sistema sin recirculación se requiere de una inversión de \$139,000 MXN·ha⁻¹·año⁻¹ contra \$52,000 MXN con el sistema de raíz flotante. Además de la ventaja económica que se logra con este último sistema, hay una menor contaminación por sales que se depositan al manto freático que finalmente contaminan a mares y ríos que sucede cuando se usan sistemas abiertos (Massa et al., 2010).

Por lo anterior, a pesar de la dificultad técnica y del alto costo inicial que representa la instalación de un sistema de raíz flotante, éste ofrece ventajas importantes que hacen que dicho sistema sea económica y ecológicamente viable para los productores de lechuga en invernadero.

Conclusiones

Con el sistema de raíz flotante se obtuvo mayor crecimiento y precocidad así como un uso más eficiente de agua y nutrimentos respecto a los sistemas de camas de cultivo con sustrato.

El crecimiento y rendimiento de lechuga fueron similares entre los sistemas de camas con sustrato

- http://www.researchgate.net/publication/229439578_Comparison_of_Open_and_Recycling_Systems_for_Ion_Accumulation_of_Substrate_Nutrient_Uptake_and_Water_and_Water_Use_of_Tomato_Plants
- Dhakal, U., Salokhe, M. V., Tantau, H. J., & Max, J. (2005). Development of a greenhouse nutrient recycling system for tomato production in humid tropics. *Agricultural Engineering International*, 7, 1-15. Obtenido de <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/4908935.pdf>
- Fallovo, C., Youssef, R., Rea, E., & Battistelli, A. (2009). Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. *acephala* in floating raft culture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89, 162-189. doi: 10.1002/jsfa.3641
- Gonella, M., Seio, F., Conversa, P., & Santamarina, P. (2003). Yield and quality of lettuce grown in floating system using different sowing density and plant spatial arrangements. *Acta Horticulturae*, 614, 687-692. Obtenido de http://www.actahort.org/members/showpdf?booknr=614_102
- Global Agricultural Information Network (GAIN). (2010). Consultado 20-08-2013 en http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Tomato%20Annual_Mexico%20City_Mexico_6-14-2010.pdf
- Huang, W. Y. (2009). *Factors Contributing to the Recent Increase in U.S. Fertilizer Prices, 2002-08*. *Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33*. U.S. Washington, DC: Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Jaques, H. C. & Hernández, M. J. L. (2005). Valoración productiva de lechuga hidropónica con la técnica de película de nutrientes (NFT). *Naturaleza y Desarrollo*, 3, 11-16. Obtenido de <http://biblat.unam.mx/es/revista/naturaleza-y-desarrollo/2>.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi G., Campioti, C. A., & Pardossi, C. A. A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 97, 971-980. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T3X-4YM4FB7-1/2/dbbac2a9eedc7f8ea0517aee8f7132e0>
- Nakano, Y., Sasaki, H., Nakano, A., Suzuki, K., & Takaichi, M. (2010). Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79, 47-55. doi 10.2503/jjshs1.7947
- Pardossi, A., Incrocci, L., Massa, D., Carmassi, G., & Maggini, R. (2009). The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Horticulturae*, 807, 445-450. Obtenido de http://www.actahort.org/books/807/807_63.htm
- Pineda, P. J., Ramírez, A. A., Sánchez del Castillo, F., Castillo, G. A. M., Valdez, A. L. A., & Vargas, C. J. M. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 893, 997-1005. Obtenido de http://www.actahort.org/members/showpdf?booknr=893_112
- Savvas, D., Sigrimis, N., Chatzieustratiou, E., & Paschalidis, C. (2009). Impact of a progressive Na and Cl accumulation in the root zone on pepper grown in a closed-cycle hydroponic system. *Acta Horticulturae*, 807, 451-456. http://www.actahort.org/books/807/807_64.htm
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2010). Consultado 14-06-2013 en http://www.siap.gob.mx/sistema_productos
- Sánchez del Castillo, F., González, M. L., Moreno, P. E. Del C., Pineda, P. J., & Reyes, G. C. E. (2014). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37, 261-269. <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/37-3/11a.pdf>
- Silber, A. & Bar-tal, A. (2008). Nutrition of Substrate-grown plants. In M. Raviv, & H. Lieth (Eds.). *Soilless Culture Theory and Practice*, 291-339. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- Stepowska, A. J. & Kowalczyk, W. (2001). The effect of Growing Media on Yield and Nitrate concentration in Lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata L.). *Acta Horticulturae*, 548, 503-509. Obtenido de http://www.actahort.org/books/548/548_60.htm
- Takahashi, K. (1984). Injury by continuous cropping in vegetables: various problems in the cultivation using grafted plants. *Yasaishikenjo Kenkyu Shiryo*, 18, 87-89. www.actahort.org/members/showpdf?booknr=797_64
- Tüzel, I. H., Tunali, U., Tüzel, Y., & Öztekin, G. B. (2009). Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae*, 807, 457-462. Obtenido de http://www.actahort.org/books/807/807_65.htm
- Valverde, K.; Chang, M.; Rodriguez, D. A. (2009). Effect of the Light Quality on the Nitrate Reductase Activity in Lettuce Plants Grown in NFT. *Acta Horticulturae*, 98, 89-96. Obtenido de http://www.actahort.org/books/843/843_9.htm
- Zhang, Y., Jiang, Y., & Liang, W. (2006). Accumulation of soil soluble salt in vegetable greenhouses under heavy application of fertilizers. *Agricultural Journal*, 1, 123-127. doi=aj.2006.123.127

Fin de la versión en español