Evaluación de la dinámica del agua y los nutrientes en lechuga *(Lactuca sativa)* y culantro castilla *(Coriandrum sativum L.)*, en dos condiciones de protección y dos niveles de nutrición en un sistema hidropónico bajo condiciones de verano, Alajuela, Costa Rica

Daniela Hernández Castro

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

ESCUELA DE AGRONOMÍA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

AÑO 2018

Evaluación de la dinámica del agua y los nutrientes en lechuga (Lactuca sativa) y culantro castilla (Coriandrum sativum L.), en dos condiciones de luz solar y dos niveles de nutrición en un sistema hidropónico bajo condiciones de verano Alajuela, Costa Rica

Daniela Hernández Castro

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA

Preddy Soto Bravo, Ph.D.

Director de Tesis

Carlos Echandi Gurdián, M.Sc.

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Luis Gómez Alpízar, Ph.D.

Director de Tesis

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Director de Escuela de Agronomía

San José, 2018

Dedicatoria

Primero a DIOS por permitirme concluir todo este proceso de desarrollo académico y personal, por darme la sabiduría para seguir superándome.

A mis padres Lisseth y Edwin y a mi hermano Daniel, porque con su amor y apoyo incondicional, facilitaron mis éxitos en la vida.

A mi pareja Gustavo, por su apoyo constante durante este proceso.

A todas las personas que contribuyeron con su experiencia, y tiempo para la culminación de mi carrera.

Daniela H. C

Agradecimiento

La presente tesis, es un esfuerzo en el cual participaron varias personas, para poder cumplir con mi objetivo, por eso a ellos mis más sinceros agradecimientos.

A mi querida Universidad de Costa Rica, en especial a la Escuela de agronomía y la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno por su iniciativa e innovación pertinente en la formación de profesionales de calidad.

A mi director de tesis Dr. Freddy Soto Bravo, por su apoyo y consejos en este proceso, por permitirme crecer como profesional y a la vez por brindarme las herramientas necesarias para concluir esta tesis.

A los miembros del tribunal, Carlos Echandi, Gabriel Garbanzo y Eloy Molina quienes con sus aportes enriquecieron este trabajo.

A los funcionarios de la EEAFBM, Julio Vega y Andrés Oviedo, y al Ing.Carlos Calvo, quienes me ayudaron siempre que lo necesité.

A FITTACORI ya que sin su aporte y apoyo económico este proyecto no se hubiera podido llevar a cabo.

Y a todas aquellas personas que me apoyaron directa e indirectamente, por siempre les estaré agradecida.

Daniela H.C.

Índice

Lista de cuadros	7
Lista de figuras	8
Lista de Anexos	14
Resumen	15
Introducción	16
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
Marco teórico	21
Hidroponía o cultivo sin suelo	21
El uso de agricultura protegida como herramienta para mo de cultivo	
Uso de sarán en la agricultura	23
La evapotranspiración del cultivo (ETc)	24
Rendimiento de los cultivos	26
Nutrición vegetal de los cultivos	27
Eficiencia de recuperación de nutrientes de los cultivos	29
Materiales y métodos	31
1. Sitio experimental	31
2. Descripción de cultivos	31
Material vegetal	33
3. Experimentos y tratamientos	34
4. Diseño experimental	37
5. Características climáticas	39
7. Variables de respuesta	43
8. Análisis estadístico	50
Resultados	51
Evapotranspiración en lechuga	51
Evapotranspiración en culantro castilla	52
Índice de área foliar (IAF) en lechuga	54

Índice de área foliar culantro castilla	56
Tasas de crecimiento (TC) en lechuga	59
Tasas de crecimiento culantro castilla	62
Rendimiento en lechuga	64
Rendimiento en culantro castilla	65
Eficiencia de recuperación de nutrientes en lechuga	66
Eficiencia de recuperación de nutrientes en culantro castilla	68
Discusión de resultados	73
Evapotranspiración en lechuga hidropónica	73
Evapotranspiración en culantro castilla hidropónico	74
Índice de área foliar, tasa de crecimiento absoluto y relativo y rendimiento en lechuga hidropónica	
Índice de área foliar, la tasa de crecimiento absoluto y relativo y rendimiento fresco en culantro castilla hidropónico	79
Eficiencia de recuperación de los macronutrientes en lechuga y culantro cast hidropónico	
Conclusiones	82
Recomendaciones	83
Literatura citada	84
Anexos	95

Lista de cuadros

Cuadro	Título	Página
1	Análisis físico del sustrato de polvo de piedra utilizado en los cultivos hidropónicos de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y culantro de Castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico.	32
2	Descripción de los tratamientos utilizados en los cultivos de lechuga y culantro castilla en época de verano (<i>Lactuca sativa</i> L.) y culantro de Castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico.	35
3	Concentración de los macronutrientes (mg L ⁻¹) y de los micronutrientes (mg L ⁻¹) utilizados en las soluciones nutritivas con baja (NB) y alta (NA) concentración de nutrientes.	36
4	Valores promedio de temperatura (°C) y humedad relativa (%) máximas, mínimas y medias durante el ciclo de ambos cultivos, bajo dos condiciones de radiación solar.	39
5	Valores promedio de la velocidad del viento semanal (Km/hra) durante el ciclo de ambos cultivos.	39
6	Fuentes de variación del modelo estadístico utilizado en el análisis de los datos de los cultivos de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) y culantro castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico	51

Lista de figuras

Figura	Título	Página
1	Bancales utilizados en el módulo de producción hidropónica, Alajuela, 2016.	31
2	Arreglo factorial 2 x 2 con parcelas divididas y distribución de los tratamientos con protección (C) y sin protección (S) a la radiación solar combinados con baja (B) y alta (A) concentración de nutrientes, en los cultivos hidropónicos de lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) en verano y culantro de Castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.), en invierno, Alajuela, Costa Rica, 2016.	38
3	Integral de radiación solar diaria (mol m ⁻² día- ¹) durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica (<i>Lactuca sativa</i> L.), bajo condiciones sin (SP) y con protección (SP), Alajuela, Costa Rica, 2016.	40
4	Integral de radiación solar diaria (mol m ⁻² día ⁻¹) durante el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico (<i>Coriandrum sativum</i> L.), bajo condiciones sin (SP) y con protección (SP), Alajuela, Costa Rica, 2016.	41
5	Precipitación diaria (mm), precipitación promedio (mm) y acumulada (mm) durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica (<i>Lactuca sativa</i> L.), Alajuela, Costa Rica, 2016.	42
6	Precipitación diaria (mm), precipitación promedio (mm) y acumulada (mm) durante el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico (<i>Coriandrum sativum</i> L.), Alajuela, Costa Rica, 2016.	43
7	Valores de pH obtenidos del drenaje durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.	44

Valores de pH obtenidos del drenaje durante el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

Valores de Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) obtenidos del drenaje en las diferentes semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

Valores de Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) obtenidos del drenaje en las diferentes semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

Efecto del factor nutrición sobre la Evapotranspiración (mm) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA son los valores promedio de los tratamientos con nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Efecto de la interacción protección x nutrición sobre la Evapotranspiración (mm) en la semana 4 del ciclo de cultivo del culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente.

Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n= 5). Efecto de la interacción protección x nutrición sobre la Evapotranspiración (mm) en la semana 4 del ciclo de cultivo del culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n= 5).

Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$) en la semana 5 del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).

Efecto del factor protección (14A) y del factor nutrición (14B) sobre el índice de área foliar (IAF) (m²·m²) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (14A) y nutrición (14B).

Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el índice de área foliar ($m^2 \cdot m^{-2}$) en la semanas 3 del ciclo de cultivo del culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).

Efecto del factor nutrición sobre el índice de área foliar (IAF) (m²·m²²) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Efecto de la interacción protección x nutrición (Figura.17A) y del factor nutrición (Figura.17B) sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g·día⁻¹) del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5 (16A) y n= 10 (17B). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) nutrición. El símbolo * indica efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición (17B).

Efecto del factor protección (18A) y del factor nutrición (18B) sobre la tasa de crecimiento relativo (TRC) (g·g⁻¹día⁻¹) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (18A) y nutrición (18B).

Efecto del factor nutrición sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g·día⁻¹) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA son los valores promedio de los tratamientos con nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Efecto del factor nutrición sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) (g·g⁻¹día⁻¹) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el rendimiento $(kg \cdot m^{-2})$ en la semana 5 del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).

Efecto del factor protección (22A) y del factor nutrición (22B) sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (g·g⁻¹) en el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana

indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (22A) y nutrición (22B).

Efecto del factor protección (23A) y del factor nutrición (23B) sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) ($g \cdot g^{-1}$) en el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (23A) y nutrición (23B).

Efecto de la interacción protección x nutrición sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de magnesio (Mg) (g·g⁻¹) en el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5). El símbolo * indica efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición.

Lista de Anexos

Anexo	Título	Página
1	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz del almácigo del cultivo lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	95
2	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	96
3	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	97
4	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	98
5	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (<i>Lactuca sativa</i> L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	99
6	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	100
7	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	101
8	Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (<i>Coriandrum sativum</i> L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.	102

Resumen

La técnica de cultivo hidropónico, en los últimos años ha tomado gran auge en el país para la producción de hortalizas, sin embargo existe una carencia de información en el manejo del riego y de la nutrición en las diferentes etapas del ciclo de cultivos como la lechuga y el culantro castilla. Esto hace necesario determinar un correcto uso del agua y los nutrientes para aumentar su eficiencia y así la competitividad de los sistemas hidropónicos. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de dos condiciones de radiación solar y dos niveles de nutrición sobre la dinámica del agua y de los nutrientes minerales, el crecimiento y el rendimiento en los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla, bajo condiciones de verano. Para ello, se realizaron dos cultivos en secuencia, el primero de lechuqa y otro posterior de culantro castilla durante la época de verano del año 2016. Se utilizaron cuatro tratamientos, combinando dos condiciones de radiación solar con dos niveles de concentración de nutrientes en solución nutritiva. Las condiciones de radiación fueron, i- uso de sombra con sarán rojo con 30% sombreo y ii- a pleno sol, mientras que en nutrición, se utilizó dos niveles de nutrición, i- un nivel de alta concentración y ii- otro de baja concentración. Los cuatro tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar en parcelas divididas con un arreglo factorial 2 x 2. Las variables respuesta fueron: la evapotranspiración de cultivo (ET_c), el índice de área foliar (IAF), las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y relativo (TCR), la eficiencia de recuperación (ER) de macroelementos y el rendimiento. Se encontró para la ET_c en el cultivo lechuga, una mayor respuesta al cambio de nivel de nutrición, mientras que el cultivo de culantro castilla, respondió únicamente a la interacción de la protección por nutrición. En cuanto al índice de área foliar, las tasas de crecimiento y el rendimiento la respuesta de ambos cultivos fue variable respecto al efecto independiente del factor nutrición o protección o a la interacción entre ambos. Finalmente, la eficiencia de recuperación de N, P, K, Ca y Mg de ambos cultivos, respondió principalmente al cambio en el nivel de nutrición, presentando una mayor ER en los tratamientos con un nivel de nutrición bajo. En general, el factor

nutrición fue el que tuvo mayor efecto en las variables respuesta de esta investigación.

Introducción

En la actualidad existe una alteración de los patrones climáticos que afectan la producción agrícola de distintas formas, entre los efectos de mayor importancia, se encuentran las variaciones en la duración de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas y radiación fuera de los umbrales permitidos, respuesta a nuevas concentraciones de CO₂ atmosférico y escasez del recurso hídrico (Burghila *et al.* 2015).

Por otro lado, los mercados nacionales como internacionales demandan con más frecuencia productos sanos e inocuos, libres de residuos químicos, lo que conlleva a la implementación de técnicas más precisas, que permitan controlar la mayor cantidad de factores que puedan afectar el proceso de la producción (Soto, 2005).

En el desarrollo de la agricultura se ha utilizado una serie de tecnologías, tales como la protección de los cultivos y la hidroponía para mejorar la competitividad, abastecer las exigencias de los mercados y optimizar el uso de recursos. Estas técnicas buscan obtener rendimientos más altos ya que existe un mayor control sobre el cultivo y a su vez permite resguardarlos de los fenómenos climáticos al generar un ambiente particular; además se obtienen productos de alta calidad, más limpios, libres de tóxicos y se puede ofrecer productos durante todo el año rompiendo el concepto de la estacionalidad (Alas, 2003).

La técnica hidropónica ha tomado gran auge en el país, se ha puesto en práctica por pequeñas y medianas empresas familiares dedicadas a la producción de hortalizas. Lamentablemente en el manejo de los sistemas hidropónicos existe una falta de métodos de control del riego y de la nutrición de los cultivos, por lo que los productores realizan aportes excesivos de algunos nutrientes en la solución y liberan altos volúmenes de drenaje que puede causar contaminación por fertilizantes (Soto, 2015).

Se han formulado una gran cantidad de soluciones nutritivas para hacer crecer las plantas en cultivo sin suelo, pero éstas se han desarrollado empíricamente y en su mayoría sin consultar con antelación información precisa con respecto a las concentraciones de nutrientes (Hernández *et al.* 2006).

Actualmente, no existen estudios para el trópico sobre soluciones nutritivas relacionadas con la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la absorción de los nutrientes según la etapa del cultivo y el clima. En cultivos hidropónicos en el trópico, las concentraciones de nutrientes utilizadas en soluciones nutritivas usualmente han sido adaptadas de otras latitudes de clima frío, donde la ETc es baja; pero al usarlas en climas tropicales donde la Etc es más alta, sin realizar modificaciones relevantes al clima de la zona o a los requerimientos de las plantas, resulta en un uso de la concentración de nutrientes más alto que lo adecuado (Muñoz *et al.* 2008).

Urquiaga & Zapata (2000), mencionan que la cantidad de N aplicado en la agricultura ha aumentado considerablemente en los últimos años y se estima que de lo aplicado, solamente un 30% se aprovecha por el cultivo y el resto se pierde. La contaminación por nitrógeno que genera la actividad agrícola especialmente por nitratos (NO⁻³) y (NO⁻²) es un problema de relevancia mundial; esta se produce como consecuencia del arrastre de nitrógeno por lixiviación y escorrentía (Velazco et al. 2009).

El contaminante más común en aguas superficiales es el nitrato, el cual puede transportarse a acuíferos y causar eutrofización de las aguas superficiales y además degradación de los ecosistemas acuáticos; por otro lado la contaminación del agua potable con nitratos es importante porque está relacionado con la metahemoglobinemia o "enfermedad del niño azul" en infantes (Smith, 2009) y con cáncer gástrico (Oniyeson *et al.* 2006).

Finalmente, entre otros factores que pueden afectar la producción de los cultivos hidropónicos, se encuentran la cantidad de energía lumínica interceptada por el cultivo que depende de la radiación y de la estructura del dosel; y además la eficiencia para convertir la luz en materia seca (MS) que está relacionada con la intensidad de la radiación, la temperatura y el estado hídrico y nutricional de los cultivos (Lorenzo *et al.* 2003).

La producción de los cultivos se puede ver afectada por un exceso de radiación, ya que puede provocar la inhibición de la fotosíntesis o fotoinhibición. Existe una creciente reducción del espesor de la capa de Ozono (O₃) que permite una alta incidencia de radiación ultravioleta (UV-B), causando un daño en el aparato fotosintético de las plantas como lo es una fuerte reducción en la actividad del fotosistema II (PSII) (Casierra, 2007).

La mayoría de las plantas se saturan entre 500 y 1000 umol/m²/s, mientras que la radiación solar PAR máxima en promedio alcanza valores de 2000 umol/m²/s a nivel del mar. Las especies de alta saturación lumínica o plantas de sol, entre los cuales se encuentran varios cultivos hortícolas, alcanzan elevadas tasas fotosintéticas, altos puntos de compensación lumínica y presentan valores altos de respiración. Por lo que en ellas se puede mejorar la temperatura, el déficit de presión de vapor y reducir la luz incidente en el dosel mediante los sistemas de sombreado (Sánchez *et al.* 2010).

En los cultivos hidropónicos se puede presentar el Tip burn, el cual es un problema de transporte de Calcio (Ca) que bajo ciertas condiciones ambientales, la absorción y distribución de este nutriente se ve afectado aunque esté presente en la solución nutritiva en un nivel adecuado. En el cultivo de lechuga, el Tip burn puede causar grandes pérdidas a medida de que el cultivo se acerca a la madurez. Esto sucede principalmente en época de verano; por lo que algunas alternativas recomendadas para disminuir su severidad es sombrear en épocas de alta intensidad lumínica, altas temperaturas y baja humedad relativa.

El sombreo contribuye a reducir la Etc excesiva, evitando excesos en la conductividad eléctrica (CE), cuando el agua se absorbe a tasas más rápidas que los nutrientes durante períodos de alta transpiración (Alvarado *et al.* 2001). Además, el sombreado ayuda a disminuir la traspiración del dosel y por lo tanto las necesidades hídricas de los cultivos, ya que existe una relación lineal entre la radiación incidente y la transpiración foliar. En períodos cálidos el uso del sombreado reduce la energía calorífica en exceso y adecua la incidencia de radiación en el dosel, mejorando la eficiencia de la conversión de la luz en MS y la calidad de la cosecha (Sánchez *et al.* 2010).

Además se puede obtener hojas de mayor tamaño mediante el uso del sombreo (García, 2007), permitiendo alcanzar en menos tiempo el valor del índice del área foliar (IAF) e interceptando un mayor porcentaje de radiación incidente sobre el cultivo, mejorando de esta forma la productividad. Cuando la luz solar incide directamente sobre el cultivo, éste tiende a producir hojas más cortas y a florecer más rápido, condición que se ve favorecida con un 73% de sombra, logrando duplicar el rendimiento de las hojas frescas en tamaño (Alvarado *et al.* 1999). Por su parte, Acosta (2003) menciona que el culantro es una especie que requiere una mínima cantidad de sombra, pues la presencia de luz incrementa la fotosíntesis y favorece su crecimiento vegetativo.

Dada la carencia de información en el manejo del riego y de la nutrición en las diferentes etapas del ciclo de cultivos hidropónicos como la lechuga y el culantro castilla, se hace necesario determinar un apropiado uso del agua y nutrientes que se puede lograr mediante la utilización de un adecuado programa de fertirriego así como la adopción de nuevas prácticas de manejo, tales como el uso de sarán que permitan generar una serie de recomendaciones para productores y además contribuir a maximizar el aprovechamiento de los recursos de producción, incrementar la productividad y consecuentemente mejorar la competitividad de los sistemas hidropónicos.

Objetivos

Objetivo general

 Determinar el efecto de dos condiciones de radiación solar y dos niveles de nutrición sobre la dinámica del agua y de los nutrientes minerales, el crecimiento y el rendimiento en los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla, bajo condiciones de verano, Alajuela, Costa Rica.

Objetivos específicos

- Determinar si el efecto de la concentración de nutrientes sobre la dinámica del agua (ETc) varía o no según el nivel de régimen de radiación solar impuesto sobre los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla.
- Determinar si el efecto de la concentración de nutrientes sobre la tasa de crecimiento y el rendimiento varía o no según el nivel de régimen de radiación solar impuesto sobre los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla.
- Determinar si la eficiencia de en el uso de los nutrientes varía o no ante el incremento en la concentración de nutrientes según el nivel de régimen de radiación solar impuesto en los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla.

Marco teórico

Hidroponía o cultivo sin suelo

La palabra hidroponía de origen griego es producto de la unión de los vocablos "hidro", que significa agua y "ponos" que significa labor (Treftz *et al.* 2015), esta hace referencia a la técnica de producir comercialmente plantas en cualquier medio de cultivo que no sea el suelo (Asaduzzaman, 2015). A pesar de que esta técnica ha tomado auge en las décadas recientes, la historia de esta se remonta a los imperios chino y egipcio (Raviv y Lieth, 2008). En el caso de Costa Rica la hidroponía se popularizo en la década de los 90, gracias al esfuerzo realizado por personal del Instituto Nacional de Aprendizaje (INA), por difundir la técnica entre los extractos más vulnerables de la sociedad, como alternativa para incrementar y mejorar la oferta de alimentos para estos (Soto, 2015).

A nivel mundial el área agrícola cultivada bajo sistemas hidropónicos se estima en 50000 hectáreas, donde el cultivo en sustratos solidos (lana de roca, fibra de coco, turba, entre otros) empleando riego por goteo representa un 90% de la producción, seguido por un 7% en los sistemas NFT (Nutrient Film Technique) y 3% en raíz flotante (Beltrano y Gimenez, 2015). En el caso de Costa Rica Marín (2010) en su trabajo de cuantificación de estructuras y producción agrícola bajo ambientes protegidos, estimó el área dedicada a los cultivos hidropónicos en 82,59 hectáreas.

La hidroponía en las últimas décadas ha ganado popularidad producto de una serie de ventajas sobre el cultivo convencional en suelo, como lo son: una mayor eficiencia en el uso de los recursos agua y fertilizantes, un mejor control de variables climáticas, plagas y enfermedades, y una mayor productividad y calidad de los cultivos (Asao, 2012, Beltrano y Gimenez, 2015). En buena parte las ventajas de la hidroponía son producto también del uso de sistemas de agricultura protegida, los que consisten en estructuras cerradas o semi-cerradas cubiertas por materiales transparentes o semitransparentes que permiten generar condiciones climáticas artificiales y restringir el ingreso de plagas (Santos y Obregón, 2010).

El uso de agricultura protegida como herramienta para modificar las condiciones de cultivo.

Los ambientes protegidos en sus versiones más simples buscan resguardar los cultivos de condiciones ambientales tan comunes como la lluvia, el viento y la radiación excesiva. En algunos casos donde el nivel tecnológico es mayor, pueden modificar también variables aún más influyentes sobre las respuestas fisiológicas de los cultivos, como lo son la temperatura, la calidad y cantidad de radiación, y la humedad relativa (Ponce *et al.* 2014). En el caso de la temperatura esta variable se encuentra íntimamente ligada a la velocidad con que se llevan a cabo procesos en la planta, como la fotosíntesis y la transpiración, y por ende como la planta responde en desarrollo y rendimiento a una condición climática particular, además los ciclos de vida de plagas y enfermedades se afectan fuertemente por esta variable (Pessarakli, 1999).

Comúnmente en la agricultura protegida se da el uso de coberturas, que permiten modificar el comportamiento de la temperatura, ya sea únicamente para reducir posibles valores excesivos que puedan resultar en estrés para la planta o en aquellos casos de mayor nivel tecnológico, reducir las variaciones de temperatura lo máximo posible a lo largo del día, con la finalidad de propiciar condiciones ideales para el desarrollo del cultivo (Canakci et al. 2013).

Estas mismas cubiertas pueden influir sobre la cantidad y calidad de la radiación a la que se ve expuesta un cultivo, donde por lo general se busca que la mayoría de la radiación incidente sobre el cultivo se encuentre dentro del espectro 400 – 700 nm que incluye la radiación fotosintéticamente activa (PAR por sus siglas en inglés) y se filtrar longitudes de onda como el infrarrojo asociadas a los incrementos de temperatura (Montero *et al.* 2013).

La radiación PAR posee un rol crucial en el desarrollo de la planta, puesto que la misma se ve involucrada en procesos como la fotosíntesis como fuente de energía para llevar a cabo las reacciones asociadas éste. Además las longitudes de onda dentro de este espectro fungen como activadores de fotorreceptores en la planta lo que induce diferentes comportamientos en la plata y conducen diferentes reacciones bioquímicas (Berkovich *et al.* 2017).

Otra variable sobre la cual los sistemas de producción del tipo de agricultura protegida tiene influencia es la humedad relativa, dependiendo de la cobertura y el nivel de confinamiento o hermeticidad, será posible regular los valores de esta variables en mayor o menor medida (Montero *et al.* 2013). En una relación muy estrecha con la temperatura la humedad relativa tiene la capacidad de afectar procesos como la evapotranspiración, de tal forma que cuando los valores de la variable sean bajos, se tendrá un efecto de extracción de humedad de la atmosfera sobre la planta y cuando los valores sean altos se inhibirá el proceso de transpiración; ambos casos estos comportamientos son producto del fenómeno físico de equilibrio entre planta y atmosfera (Thompson, 2010).

Uso de sarán en la agricultura

Las opciones de coberturas plásticas son tan variables como las razones por las que se deciden utilizar. Sin embargo, debe imperar como premisa que su utilización solo es justificada en aquellos casos donde el beneficio económico producto de su uso es significativamente superior al realizar la comparación con un cultivo llevado a cabo en campo abierto (Shany, 2004). El uso de coberturas plásticas puede modificar factores tan simples como la cantidad de luz recibida por el cultivo, hasta factores mas complejos como la composición del espectro de luz que reciben las plantas (Fernández *et al.* 2002).

En aquellos casos donde se logra modificar el espectro de luz producto del uso de una cobertura o una fuente suplementaria de luz, es posible generar efectos positivos sobre la eficiencia del proceso de fotosíntesis, lo que resulta en un incremento en el crecimiento y la disminución de problemas como la elongación (Snowden *et al.* 2016).

Máquez et al. (2014) evaluaron el efecto de utilizar diferentes colores de malla (roja, azul, negra, perla y sin malla (testigo)) en una producción de tomate cherry sebrada en suelo bajo un sistema de producción de macrotúneles. Dichos autores obtuvieron un incremento significativo para la variable de rendimiento (toneladas por hectarea) cuando el color de malla fue de color perla, en los demás casos las diferencias para la variable no fueron significativos con respecto al testigo.

En el cultivo de lechuga, Ruíz (2012) evaluó el efecto de la utilización de mallas de colores (roja, negra, blanca y testigo sin malla), en un sistema de producción de macrotúneles con el cultivo en suelo; las variables evaluadas fueron el peso fresco y seco de la parte aérea y radical, el número de hojas y la longitud radical. En dicho estudio, se encontró que la lechuga cultivada bajo la malla de color rojo presentó mejores valores de rendimiento para las variables estudiadas en comparación con el testigo y los demas colores de malla.

En un estudio realizado por Sosa (2006), se evaluó el efecto de tres ambientes lumínicos: 90% de sombra, 50% de sombra y a pleno sol, en culantro coyote, en Guácimo, Limón. El estudio determinó que el culantro obtiene un mejor crecimiento con un 50% de sombra, además este ambiente ayudó a retener más humedad en el suelo que los otros tratamientos y a su vez disminuyó la evapotranspiración, favoreciendo así al crecimiento de las plantas.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La ET_c, es el resultado de dos procesos que se presenta de forma individual, la evaporación y la transpiración, que actúan tanto sobre el sustrato como en el cultivo, generando la extracción de agua de estos (Cisneros *et al.* 2015). Los procesos de evaporación y transpiración presentan a lo largo del ciclo de vida de un cultivo una relación inversamente proporcional, donde en primera instancia el proceso de evaporación cuenta con la mayoria de la cuota de la sustracción de agua, y conforme el cultivo se desarrolla pierde relevancia frente a la transpiración, llegando a ser la trasnpiración el proceso más importante hacia el final de ciclo de cultivo (Allen *et al.* 2006, Santos-Rufo *et al.* 2008).

Tanto el proceso de transpiración como el proceso de evaporación se ven ampliamente influidos por variables ambientales como: la temperatura, la humedad relativa, la radiación incidente y la velocidad del viento, lo que permite considerar éstas variables ambientales como agentes moldeadores de la ET_c en un cultivo (López *et al.* 2015).

En un sistema organopónico Cun *et al.* (2015) mediante la metodología de balance hídrico determinaron la ET_c para el cultivo de lechuga Var. (BSS-13), los resultados fueron: 12,5 mm del transplante a la formación de roseta (8 diás), 98,02 mm de la formación de la roseta al desarrrollo de la misma (17 días) y 29,61 mm del desarrollo de la roseta hasta la cosecha (7 días). En total el valor acumulado de ET_c a lo largo de ciclo de cultivo de la lechuga fue de 140,13 mm en un ciclo de cultivo de 31 días.

De igual forma Casanova *et al.* (2009) desarrollaron un estudio en el cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero durante nueve semanas, utilizando cinco métodos para la determinación de la ET_c, En dicho estudio, el balance hídrico como método de referencia, al final del ciclo obtuvo un valor de ET_c de 91 mm. Además, el método de evaporímetros Andersson, fue el que mejor correlacionó con la determinación de ETc mediante el método directo de balance hídrico.

Bajo un sistema convencional de producción Mejía de Tafur *et al.* (2014) determinaron la ET_c del cultivo de culantro castilla, para ello utilizaron la metodología de pérdida de peso por balanza. El valor acumulado para la variable fue de 200 mm a lo largo del ciclo de producción.

En otro estudio para el cultivo de culantro castilla, Ghamarnia *et al.* (2013), determinaron la ET_c, utilizando la metodología de lisímetros, donde obtuvieron un valor de ET_c al fnal del ciclo de cultivo de 647 mm. En el caso del estudio de Mejía de Tafur *et al.* (2014) este se llevó a cabo en una región tropical en Colombia y en el caso de Ghamarnia *et al.* (2013) el estudio se realizó en una region árida en Irán.

Rendimiento de los cultivos

Barrera *et al.* (2006) describen el crecimiento como el incremento irreversible en el tamaño de una planta, el cual conlleva cambios en la morfología y diferenciación celular. Taiz, y Zieger (2002) indican que el crecimiento puede ser descrito tanto en un sentido espacial como en uno material; en el primer caso se hace referencia a ese crecimiento experimentado por las células hacia diferentes direcciones en la zona de crecimiento y en el segundo caso se refiere a como las células de manera individual incrementan su masa a través de las diferentes etapas de desarrollo.

Como tal, el crecimiento es un proceso fisiológico sumamente complejo e íntimamente ligado a otros procesos como la fotosíntesis, la respiración, y la división, elongación y diferenciación celular. Además, se puede ver afectado por factores como la calidad de radiación, la temperatura, la disponibilidad del recurso hídrico y la nutrición, entre otros factores presentes en los sistemas productivos (Barrera *et al.* 2006).

El análisis de crecimiento es una herramienta que busca descifrar como la planta crece, a partir de datos primarios como áreas, pesos, volúmenes y contenidos de las diferentes secciones de la planta (Hunt *et al.* 2002). Como parte del análisis de crecimiento se pueden encontrar indicadores tales como las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y relativo (TCR). La TCA se describe como un índice de incremento de masa por unidad de tiempo, mientras que la TCR, un poco más compleja hace referencia al incremento de masa por unidad de tiempo con respecto a la masa ya existente en la planta (Hunt, 2017).

Otros indicadores importantes son el índice de área foliar (IAF) y el rendimiento. El IAF hace referencia a la cantidad de área foliar soportada en un m² (Aguirre *et al.* 2011). Por su parte el rendimiento se constituye de diferentes maneras, expresándose como cantidad de materia seca al final del ciclo, toneladas o kilogramos por unidad de área de un determinado órgano, entre otras formas posibles (FAO, 1982).

Nutrición vegetal de los cultivos

En la nutrición de plantas, se considera que un elemento es esencial, cuando cumple los criterios de ser requerido por la planta para poder desarrollarse y reproducirse, y que ningún otro elemento tiene la capacidad de remplazar a este en sus funciones metabólicas de la planta (Barker y Pilbeam, 2007). La nutrición de plantas como parte de la fisiología vegetal reconoce 17 elementos esenciales para las plantas, los cuales son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, molibdeno, cloro y níquel (Fageria, 2009).

Estos elementos esenciales es posible agruparlos en dos grupos, los macronutrientes y los micronutrientes, en el caso de los macro estos se consideran dentro de este grupo bajo el criterio que se acumulan en los tejidos vegetales en almenos 0,1% de la materia seca; los micronutrientes por su parte se acumulan en valores inferiores a 0,01% de la materia seca de los tejidos vegetales (Barker y Pilbeam, 2007).

En el caso particular de la hidroponía la nutrición de las plantas se logra mediante el uso de solución(es) nutritiva(s) (Raviv y Lieth, 2008), las cuales buscan cubrir todos las necesidades de macros y micronutrientes requeridos por los cultivos (Taiz y Zieger, 2002). El uso de la solución(es) nutritiva(s) en los cultivos hidropónicos buscan suministrar los diferentes macro y micronutrientes, poner los mismos en contacto directo con el sistema radical en espacios lo más confinados posibles. Además el uso de solución(es) nutritiva(s) solventan problemas serios asociados al cultivo convencional en suelo, como lo son la presencia de patógenos y el exceso o deficiencia de un nutriente por factores físico-químicos del suelo (Bougoul y Titouna, 2010).

La solución nutritiva como mecanismo acarreador de fertilizantes tiene como fin último igualar las condiciones que se presentan en la solución del suelo en un cultivo convencional, pero en este caso en un medio de cultivo innerte, llamado sustrato (Asao, 2012). Sin embargo, por lo general las soluciones nutritivas presentan concentraciones de nutrientes superiores a las que se podrian encontrar en la solución del suelo en un cultivo dado.

Este comportamiento se debe al hecho que soluciones nutritivas con valores de concentración de nutrientes inferiores o similares a los que se presentan en la solución del suelo, serían muy susceptibles a generar desbalances nutricionales en un cultivo, sobretodo en aquellos sistemas productivos donde la solución nutritiva es renovada con poca frecuencia (Di Lorenzo *et al.* 2013).

El uso de soluciones nutritivas en cultivos hidropónicos implica casi de forma obligatoria la evaluación de parámetros como el pH, la conductividad eléctrica (CE), y la relación entre los cationes y aniones (Asaduzzaman, 2015). El pH se define el como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno (H⁺) y se estima que el valor de este parámetro en la solución nutritiva deben encontrarse en el rango de 5,5 a 6,5, ya que dentro de éste se encuentra la mayor disponibilidad de los nutrientes en solución para la planta (Orsini *et al.* 2012, Kafkafi y Tarchitzky, 2011).

Como indicador de la cantidad de fertilizante (sales inorgánicas) disueltos en la solución nutritiva se tiene a la CE, la cual es un parámetro obtenido a partir del valor de la capacidad de las sales fertilizantes disueltas en agua de conducir electricidad (Barbaro *et al.* 2014), los valores óptimos de este parámetro dependerán mucho del cultivo y la etapa fenológica de este (Raviv y Lieth, 2008).

En el caso de los cultivos de hoja el rango óptimo se mueve entre los 1500 a 2500 μ S·cm⁻¹, sin embargo, esto puede variar para algunos cultivos (Shannon y Grieve, 1999). En el caso de la relaciones iónicas, éste es un parámetro que hace referencia a las relaciones estequiométricas entre cationes (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ y NH₄⁺) y aniones (NO₃⁻, H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻).

Éstas relaciones deben estar balanceadas puesto que de ello dependerá la disponibilidad de nutrientes para la planta, la acidificación del medio y las pérdidas por lixiviación de los nutrientes (Salvador *et al.* 2006). En aquellos casos donde no se guardan las adecuadas relaciones entre los cationes y aniones de la solución nutritiva es posible observar problemas como deficiencia, debido a antagonismos entre elementos (Retana, 2015).

Eficiencia de recuperación de nutrientes de los cultivos

Se considera la eficiencia de nutrientes o recuperación a la habilidad con la que la planta hace uso de una parte de los nutrientes aplicados, los cuales quedan incorporados en la biomasa del cultivo durante el ciclo de cultivo (Stewart, 2007). El cálculo de esta variable se estima como la proporción de los nutrientes aplicados presentes en el cultivo y la misma se puede utilizar como un punto de referencia para mejorar la recuperación de nutrientes en posteriores cultivos al evaluarlos (Bruulsema *et al.* 2004).

En un ensayo de trigo cultivado de forma convencional en suelo, Hamdani et al. (2017) evaluaron el efecto de utilizar dosis de un compuesto rico en carbón (0 y 1% peso del suelo) y dosis decrecientes de fertilizante en referencia a la dosis recomendada (0, 25, 50, 75 y 100%) para el cultivo, sobre variables como el rendimiento en grano y la eficiencia de recuperación de fertilizantes (N, P y K). En este ensayo se obtuvo mejores rendimientos en grano y eficiencia de recuperación de fertilizantes (N, P y K) cuando el tratamiento aplicado fue 75% de la dosis de fertilizantes recomendado y 1% del compuesto de rico en carbono.

Chuan-jiang *et al.* (2016) evaluaron el crecimiento, la absorción de nutrientes y la eficiencia de nutrientes en un cultivo de lechuga cultivado en potes con suelo, bajo seis tratamientos que combinaban fertilización química convencional, fertilización orgánica, poliacrilamida y polisilicato de potasio. En esta investigación se obtuvo que aquellos tratamientos donde se utilizó la fertilización química convencional más poliacrilamida y fertilización orgánica incrementó el crecimiento en comparación con los tratamientos que utilizaron polisilicato de potasio. La eficiencia de recuperación fue mayor en aquellos tratamientos con poliacrilamida y polisilicato de potasio (115,22 y 53,91% respectivamente) en comparación con el tratamiento que utilizó unicamente fertilización química convencional.

Aruani *et al.* (2008), determinaron la eficiencia del nitrógeno y el rendimiento, en un cultivo de lechuga en un sistema convencional en suelo, donde los tratamientos aplicados fueron fertilización química (100 kg h⁻¹), fertilización orgánica (abono orgánico a 100 kg h⁻¹) y un testigo sin fertilización. En este ensayo se obtuvo un rendimiento de 49,1 t ha⁻¹ para el tratamiento con abono orgánico, 34,6 t ha⁻¹ con fertilización química y 24,7 t ha⁻¹ en el tratamiento testigo; la mayor eficiencia de nutriente se obtuvo en el tratamiento con abono orgánico con un valor para la variable del 25%.

Materiales y métodos

1. Sitio experimental

La investigación se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (E.E.A.F.B.M), ubicada en el distrito de San José de Alajuela, Costa Rica. La ubicación geográfica de la zona es 10° 0'22,89"N y 84°15'54,63"O, con una altura de 840 m.s.n.m. La temperatura promedio anual es de 22 °C y el promedio de la precipitación anual es de 1 940 mm, distribuidos entre los meses de mayo a noviembre.

2. Descripción de cultivos

Durante el verano 2016, se realizaron dos cultivos en secuencia, el primero de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y otro posterior de culantro castilla (*Coriandrum sativum* L.). Ambos cultivos se realizaron en un sistema hidropónico en sustrato, utilizando 5 contenedores de madera con dimensiones de 10 m de largo por 1 m de ancho y una profundidad de 10 cm cada uno, los cuales estaban soportados sobre una estructura metálica a 0,80 m sobre el nivel del suelo (Figura.1).



Figura 1. Bancales utilizados en el módulo de producción hidropónica, Alajuela, 2016.

Los bancales utilizados estaban cubiertos con plástico negro de 9 μ m con el fin de dar protección a la madera y evitar la pérdida de solución nutritiva. Además, cada bancal contaba con drenajes laterales espaciados cada metro colocado aproximadamente a un centímetro del fondo de la cama, con el objetivo de drenar el exceso de agua de riego y/o lluvia.

Como sustrato se utilizó polvo de piedra extraído de yacimientos naturales; al cual se le determinó las características físicas utilizando métodos de laboratorio normalizados (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis físico del sustrato de polvo de piedra utilizado en los cultivos hidropónicos de lechuga y culantro castilla.

Parámetro	s óptimos ¹	Polvo de	
	Máximo	Mínimo	– piedra
Índice de grosor (%)			65,35
Densidad aparente (g·ml ⁻¹)	0,15	<0,15	1,14
Densidad real (g⋅ml ⁻¹)	1,0	<1,0	2,4
Porosidad total (cm⋅cm ⁻³)	-	>85	52,5
Fracción sólida (cm⋅cm⁻³)	0,15	<0,15	47,5
Componentes totales (cm·cm ⁻³)	100,0	100,0	100,0
Humedad volumétrica (cm⋅cm ⁻³)			
1 kPa (capacidad de contenedor)	55,0	70,0	19,0
5 kPa	30,0	40,0	14,4
10 kPa (Punto de marchitez)	25,0	30,0	9,6
Capacidad de aireación (g⋅cm ⁻³)			
1 kPa (capacidad de contenedor)	30,0	15,0	33,0
5 kPa	55,0	45,0	38,10
10 kPa (Punto de marchitez)	60,0	55,0	42,9
Tipos de agua (g⋅cm ⁻³)			
Agua fácilmente disponible	20,0	30,0	5,10
Agua de reserva	5,0	10,0	4,80
Agua total disponible	25,0	40,0	9,90
Agua difícilmente disponible	30,0	30,0	9,60

¹ Adaptado de Ansorena, (1994), ² kPa= kilopascales

Material vegetal

En los cultivos de lechuga y culantro castilla, se utilizaron los híbridos Mónica (Agrinova Seed) y Caribe (Bejos), respectivamente. El híbrido Mónica, presenta características de tolerancia a temperaturas elevadas, posee hojas tipo crespa y voluminosas y se cosecha en 45 - 60 días aproximadamente. El híbrido Caribe es de crecimiento rápido, alto potencial de rendimiento, buena tolerancia a la floración prematura, hojas con limbo ancho y color verde intenso, son plantas vigorosas que soportan alta densidad y su ciclo promedio es de 60 a 65 días.

En ambos cultivos, la siembra se realizó por trasplante utilizando plántulas de 22 días de edad en el cultivo de lechuga y 14 días en el culantro castilla, con aproximadamente 3 a 4 hojas verdaderas. Los almácigos fueron obtenidos en bandejas de 128 celdas.

Una semana antes del trasplante el sustrato se desinfectó con tiocianatometiltio-benzotiazol (TCMTB) y un bactericida a base de extracto de cítricos, posteriormente el día previo a la siembra se humedeció el sustrato con suficiente agua hasta obtener abundante drenaje.

Las distancias de siembra utilizadas fueron 20x20 cm en lechuga y de 7x7 cm en culantro castilla, de acuerdo a las densidades habitualmente usadas por los productores en cultivos hidropónicos a nivel comercial.

Al almácigo en las bandejas, se les realizó una inmersión con *Trichoderma* y enraizador (extracto de algas). Seguidamente las plántulas se colocaron en el sitio de siembra y se les aplicó un riego abundante para obtener una adecuada humedad en el sustrato y facilitar el establecimiento.

Respecto al manejo fitosanitario de los cultivos, se empleó una estrategia basada en la prevención y el monitoreo de plagas. Como prevención se utilizó un programa semanal con productos biológicos tales como *Beauveria bassiana* y *Metarhizium* en rotación con un repelente a base de extracto de Neem. El monitoreo de plagas se realizó cada semana, el cual permitió tomar decisiones sobre la necesidad de aplicación de insecticidas o fungicidas químicos.

3. Experimentos y tratamientos

En el período de verano del 2016 se llevaron a cabo dos experimentos secuenciales, con una duración de cinco semanas cada uno, primero uno en el cultivo de lechuga y posteriormente otro en el cultivo de culantro castilla. En ambos cultivos se evaluó el efecto de los factores de protección y de nutrición sobre la Evapotranspiración del cultivo (*ETc*), el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia de recuperación (ER) de macronutrientes (nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg). El experimento consistió en determinar si dichas variables de respuesta son afectadas por la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, al pasar de una condición de protección de la radiación solar con sombreo a la condición de cultivo a pleno sol.

Se utilizaron cuatro tratamientos, combinando las dos condiciones de radiación solar con dos niveles de concentración de nutrientes en solución nutritiva. Las condiciones de radiación fueron, i- uso de sombra con sarán rojo con 30% sombreo y ii- a pleno sol (Cuadro 2).

Cuadro 2. Descripción de los tratamientos utilizados en los cultivos de lechuga y culantro castilla en época de verano.

Identificación	Condición de luz solar	Concentración de nutrientes (mg L ⁻¹)
CA	Con 30% sombra	Alta
СВ	Con 30% sombra	Baja
SA	Pleno sol	Alta
SB	Pleno sol	Baja

El sarán utilizado fue un tejido con monofilamento de polietileno, el cual se seleccionó considerando que la malla roja reduce las ondas azules, verdes y amarillas y transmite luz del espectro de ondas rojo y rojo lejano por encima 590 nm, lo que le da características de protección del 20% contra la radiación ultravioleta y evita la fotodegradación de los cloroplastos (Oren-Shamir *et al.*,2001). Además, permite amortiguar el efecto de altas temperaturas, evitando y/o retrasando el alargamiento del tallo y la floración de la planta (Valverde *et al*, 2009). Además, Polysack Plastic Industries (2001) determinaron que la malla de color rojo incrementa el peso fresco de hortalizas de hoja.

Respecto al factor nutrición, se utilizó una solución nutritiva con alta concentración de nutrientes (NA) y otra con baja concentración de nutrientes (NB) manteniendo constante la proporción entre los nutrientes. La concentración de nutrientes fue definida considerando los rangos utilizados para la producción hidropónica de vegetales de hojas a nivel nacional e internacional (Soto, 2015) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Concentración de los macronutrientes (mg L⁻¹) y de los micronutrientes (mg L⁻¹) utilizados en las soluciones nutritivas con baja (NB) y alta (NA) concentración de nutrientes (Soto, 2015).

Tratamiento	Ма	Macronutrientes (mg L ⁻¹)						Micronutrientes (mg L ⁻¹)					
	N	Ca	Mg	K	Р	S	Fe	Cu	Zn	Mn	В	Мо	
NB	70	75	18	100	17,4	18	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2	0	
NA	206	224	53	300	51,7	102	2	0,5	0,5	1	1	0,2	

En ambos cultivos se utilizó un sistema de riego por goteo superficial, con cinta de riego con goteros incorporados (0,8 L h⁻¹) cada 20 cm. Cada cultivo experimental, tuvo dos sectores de riego con tanques independientes (2000 L) para los tratamientos de baja y alta concentración de nutrientes.

El volumen de riego aplicado se calculó según los porcentajes de agotamiento del agua disponible en el sustrato y un porcentaje de drenaje preestablecido de aproximadamente un 20-30%. Adicionalmente se evaluó la
uniformidad del sistema de riego al inicio y mediados del ciclo de cada cultivo
según (Christiansen, 1942, citado por Illiassou, 2015). El riego se programó por
tiempos fijos mediante el uso de un registrador programable para riegos Toro
(Mod. TMC-212) considerando el volumen de riego a aplicar y el caudal de los
goteros por área.

La nutrición se aplicó en el riego por goteo, mediante soluciones nutritivas iónicamente equilibradas entre cationes y aniones (Cuadro 3), considerando las concentraciones de nutrientes en el agua de riego. El pH de las soluciones nutritivas se ajustó a 5.5 con ácido nítrico considerando la concentración de bicarbonatos (HCO₃₋) en el agua de riego. Para su preparación se utilizaron fertilizantes hidrosolubles como fosfato monopotásico, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, nitrato de calcio, nitrato de potasio, cloruro de calcio y pre-mezclas de micronutrientes.

Para la elaboración de las soluciones nutritivas para el riego, previamente se prepararon 3 soluciones concentradas, distribuidas en tres recipientes distintos: i- solución A, con nutrientes mayores como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y magnesio; ii- solución B con nutrientes menores como el hierro, manganeso, zinc, boro y molibdeno y iii- solución C que contenía nitrato de calcio. Posteriormente estas se agregaban una a una en los tanques de 2000 L que contenían la solución para riego.

4. Diseño experimental

En ambos cultivos, se utilizó un diseño de bloques completos al azar en parcelas divididas con un arreglo factorial 2 x 2, que incluyó cuatro tratamientos combinados de dos condiciones de radiación solar, con sombreo (C) y sin sombreo (S), y dos niveles de nutrición, uno con alta concentración de nutrientes (A) y otro con baja concentración de nutrientes (B) (Cuadro 2). La parcela grande correspondió a la condición de radiación solar y la parcela pequeña al nivel de nutrición (Figura.2).

Se utilizaron cinco repeticiones para un total de 20 unidades experimentales (UE). Cada bancal (B1 a B5) correspondió a un bloque o repetición. Cada UE tuvo un área de 2,5 m² (resaltado en azul y amarillo), utilizando las plantas centrales para las evaluaciones (resaltado en amarillo con equis rojas). En las secciones de 1,5 m² se muestreó durante las primeras cuatro semanas las variables de crecimiento, y en la quinta semana dichas evaluaciones se llevaron a cabo en la sección de 1 m², donde además se muestreó diariamente los volúmenes de riego aplicado y de drenaje. (Figura.2).

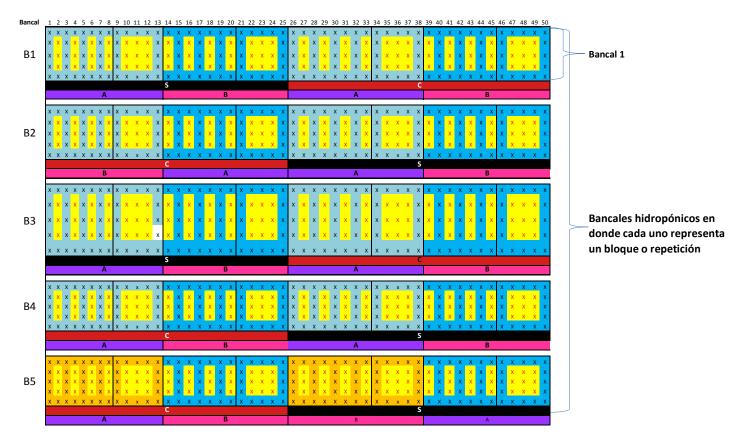


Figura 2. Arreglo factorial 2 x 2 con parcelas divididas y distribución de los tratamientos con protección (C) y sin protección (S) a la radiación solar combinados con baja (B) y alta (A) concentración de nutrientes, en los cultivos hidropónicos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en verano y culantro castilla (*Coriandrum sativum* L.), en temporada lluviosa, Alajuela, Costa Rica, 2016.

5. Características climáticas

En ambos experimentos de lechuga y culantro castilla, se caracterizó el microclima en los cultivos bajo sombreo y a pleno sol. Para ello se utilizaron dos sensores de temperatura y de humedad del aire (HOBO Mod. Pro V2), dos barras de radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) provistas de 20 sensores (APOGEE Mod. LQS100-20). Además, se utilizaron 4 pluviómetros (Decagon Devices Mod. ECRN – 50) para cuantificar la precipitación en los tratamientos con y sin protección. Los datos fueron almacenados en un registrador- programador de medición y control (Data logger) Campbell Scientific. (Mod. CR1000).

Cuadro 4. Valores promedio de temperatura (°C) y humedad relativa (%) máximas, mínimas y medias durante el ciclo de ambos cultivos, bajo dos condiciones de protección.

Cultivo	Condición*	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
		Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Lechuga	SP	34,38	18,79	25,50	88,67	38,72	67,14
	CP	34,84	18,99	25,72	85,43	35,91	64,36
Culantro	SP	31,60	18,86	23,62	99,58	60,28	88,18
	CP	31,60	18,86	23,62	99,58	60,28	88,18

*CP: Con Protección, SP: Sin Protección

Cuadro 5. Valores promedio de la velocidad del viento semanal (km h⁻¹) durante el ciclo de ambos cultivos.

Velocidad del viento (km h ⁻¹)					
Semana	Lechuga	Culantro castilla			
1	2,85	1,71			
2	2,55	1,10			
3	2,74	0,87			
4	5,18	1,04			
5	2,65	0,80			

En ambos cultivos se determinó la integral de radiación solar diaria (DLI: mol m⁻² día⁻¹) en los tratamientos SP y CP (Figura.3 y 4). Los promedios globales de DLI, en el cultivo de lechuga fueron 45,8 y 27,9 (mol·m⁻²·día⁻¹) para los tratamientos SP y CP, respectivamente (Figura.3), mientras que en el cultivo de culantro se obtuvieron valores de 32,1 en SP y 20,1 (mol·m⁻²·día⁻¹) en CP. (Figura.4).

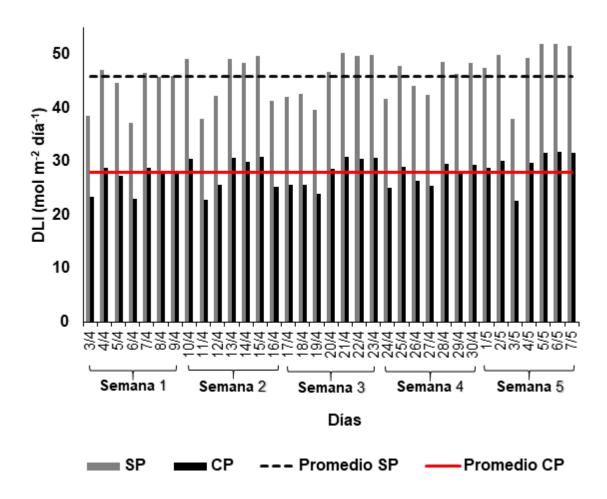


Figura 3. Integral de radiación solar diaria (mol m⁻² día⁻¹) durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, bajo condiciones sin (SP) y con protección (SP), Alajuela, Costa Rica, 2016.

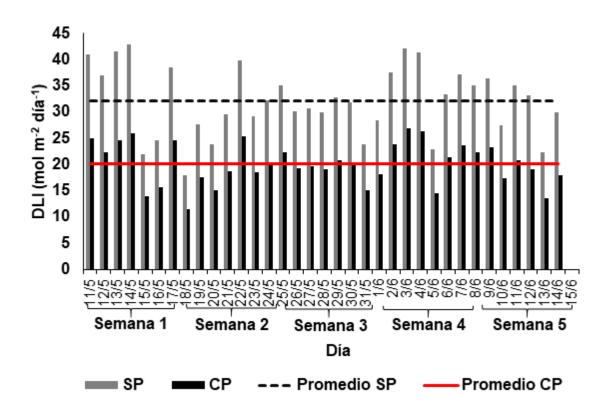


Figura 4. Integral de radiación solar diaria (mol m⁻² día⁻¹) durante el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, bajo condiciones sin (SP) y con protección (SP), Alajuela, Costa Rica, 2016.

Los valores de precipitación diaria acumulada (mm) fueron obtenidos de una estación meteorológica del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) ubicada en la EEAFBM y de cuatro pluviómetros colocados en los tratamientos con protección. Los valores obtenidos de precipitación acumulada en los ciclos de cultivos de lechuga y culantro castilla fueron de 13,7 y 325,1 mm, respectivamente (Figura. 5 y 6).

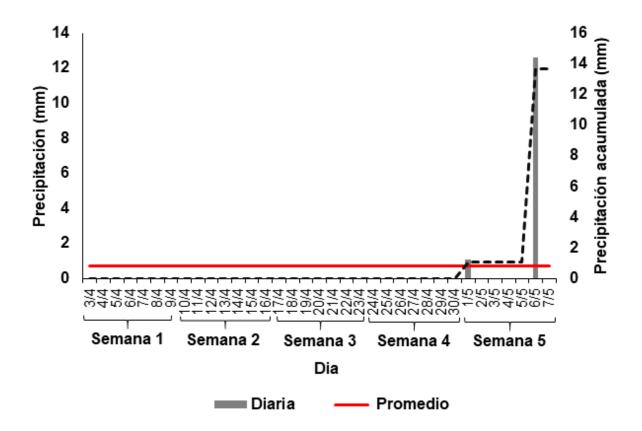


Figura 5. Precipitación diaria (mm), precipitación promedio (mm) y acumulada (mm) durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016.

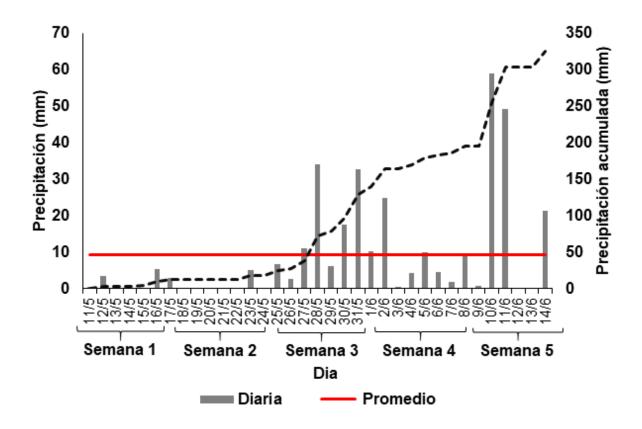


Figura 6. Precipitación diaria (mm), precipitación promedio (mm) y acumulada (mm) en las diferentes semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016.

7. Variables de respuesta

Para determinar si los cultivos de lechuga y culantro castilla con niveles de nutrición alto o bajo, son afectados al pasar de una condición sin protección a otra con protección, se evaluó la ET_c, la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa de crecimiento relativo (TCR), el rendimiento y la eficiencia de recuperación (ER) de los macronutrientes N, P, K, Ca y Mg.

Durante el ciclo de vida de ambos cultivos experimentales, para determinar la ET_{c_i} se cuantificó diariamente en cada tratamiento el volumen de riego aplicado (L), el volumen de drenaje (L) y el aporte de la precipitación (mm). Para evaluar el crecimiento y el rendimiento se midió cada semana el contenido de materia seca (MS). Finalmente para obtener la ER de nutrientes (g g^{-1}) se cuantificó las concentración de los nutrientes aplicados (g m^{-2}) en cada nivel de nutrición y el nutriente absorbido (g m^{-2}) de cada tratamiento.

El volumen de drenaje diario se midió antes de iniciar el primer riego de cada día. Se recolectaron semanalmente sub-muestras de cada solución nutritiva y de los drenajes de cada tratamiento para determinar la conductividad eléctrica (CE) y el pH utilizando un pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod.HI98129).

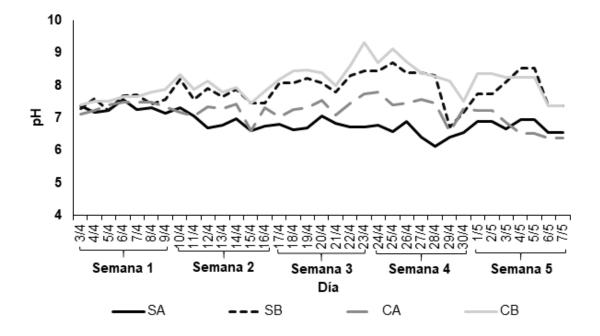


Figura 7. Valores de pH obtenidos del drenaje durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

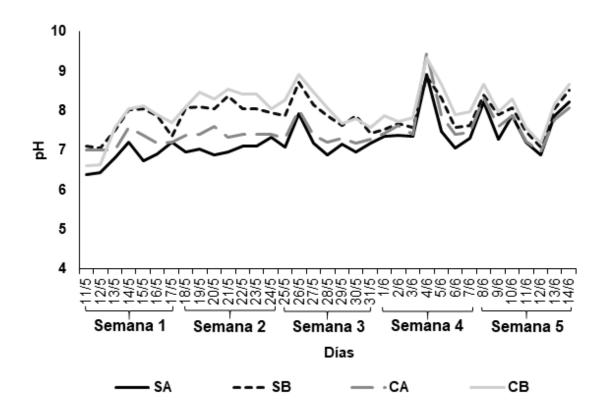


Figura 8. Valores de pH obtenidos del drenaje durante el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

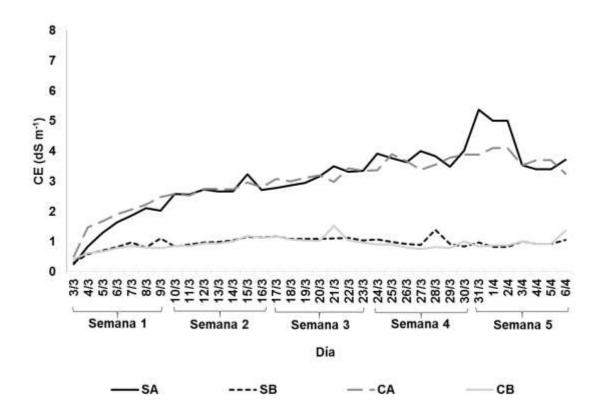


Figura 9. Valores de Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) obtenidos del drenaje en las diferentes semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

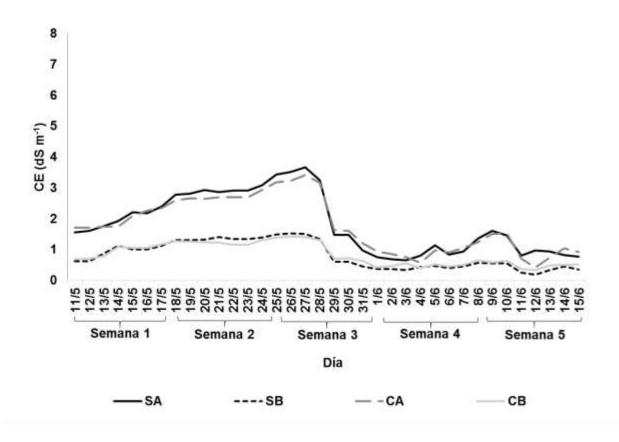


Figura 10. Valores de Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) obtenidos del drenaje en las diferentes semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, bajo tratamientos sin protección y nutrición alta (SA), sin protección y nutrición baja (SB), con protección y nutrición alta (CA) y con protección y nutrición baja (CB) Alajuela, Costa Rica, 2016.

Adicionalmente, se determinó semanalmente, las concentraciones de nutrientes N, P, K, Ca y Mg aplicados (g m⁻²) en cada solución nutritiva a partir de una muestra compuesta. La cantidad de nutrientes aplicados (g m⁻²) se calcularon a partir de los volúmenes de riego (L m⁻²) y sus respectivas concentraciones de nutrientes (g L⁻¹). En ambos experimentos, en cada tratamiento se determinó la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) para períodos semanales, a partir del balance de agua en el sustrato.

$$ETc = (Hv_i - Hv_f) + R - D$$

Donde (H_{vi}–H_{vf}), es la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato (mm) al inicio (H_{vi}) y al final ((H_{vf}) del período: R y D son los volúmenes de riego y drenaje (mm) para dicho período, respectivamente (Soto, 2013). El contenido volumétrico de agua en el sustrato se midió semanalmente utilizando un sensor de humedad conocido como TDR, por sus siglas en inglés (Decagon Mod GS3).

El área foliar (AF) se midió con el equipo de medición LI-COR (mod. LI-3100C area meter, Estados Unidos). En el cultivo de lechuga se utilizó el total de las hojas de cada planta para un total de tres plantas por UE, en el caso de culantro castilla, se midió las hojas de tres plantas de cada uno de los rollos y luego se extrapoló al valor del AF del rollo de las tres muestras de cada UE. El valor de AF, se utilizó para calcular el índice de área foliar (IAF).

$$IAF = \frac{AF * \#plantas m^{-2}}{\text{área m}^{-2}}$$

Para la evaluación de la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y tasa de crecimiento relativo (TCR) se determinó el contenido de MS mediante el uso de una balanza analítica (Ocony Mod ES-1000H) y un horno de ventilación forzada a 72°C hasta alcanzar peso constante.

$$TCA = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} (g \cdot día^{-1})$$

$$TCR = \frac{\ln m_2 - \ln m_1}{t_2 - t_1} (g \cdot día^{-1})$$

Donde m = masa seca, t = tiempo y ln= logaritmo natural.

El contenido de MS de cada cultivo se determinó al momento del trasplante tomando 20 plántulas al azar. Durante el ciclo de cultivo, para determinar MS en cada semana se recolectaron tres plantas completas por cada UE.

La extracción de nutrientes para cada semana se determinó a partir de cada una de las muestras de MS (kg ha⁻¹) y su respectivo contenido de nutriente (%) N, P, K, Ca y Mg. La concentración de nutrientes se obtuvo para cada tratamiento, a partir de una muestra compuesta de las 5 repeticiones de los muestreos semanales de MS. Al respecto, Bertsh (2009), recomienda que las muestras de peso seco se pueden fundir en una sola, ya que el coeficiente de variación entre las repeticiones de concentraciones, experimentalmente ha dado valores menores a 15%, y efectuar los análisis individuales para cada repetición y tejido encarece drásticamente los costos.

Los análisis químicos completos del material vegetal, de la solución nutritiva inicial se realizaron en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). La ER de cada nutriente (g g ⁻¹), se determinó como el cociente entre g m⁻² absorbidos y g m⁻² aplicados por metro cuadrado.

$$ER = \frac{\text{nutriente absorbido (g m}^{-2})}{\text{nutriente aplicado (g m}^{-2})}$$

Al final del ciclo de cultivo, se determinó el rendimiento en términos de peso fresco (kg m⁻²), utilizando nueve plantas por cada UE.

8. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de la normalidad y homocedasticidad de los datos utilizando el programa estadístico InfoStat versión 2008. Al cumplirse los supuestos los datos provenientes de los diferentes variables medidas, se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) para determinar si hubo efecto de la interacción protección x nutrición o efecto independiente de ambos factores.

En caso de determinar efectos estadísticamente significativos (P<0,05), se realizó una prueba de comparación múltiple de medias según Tukey (P<0,05). Cuando se presentó interacción entre condición luz solar y nivel de nutrición, se realizó un análisis en dirección y magnitud de los efectos simples de ambos factores, mientras que cuando no hubo efecto de la interacción (P>0,05), se analizó el efecto principal del factor que fue estadísticamente significativo (P<0,05).

Para el análisis de la información se utilizó un modelo de análisis de varianza de para bloques completos al azar en parcelas divididas (Di Rienzo *et al.*, 2013), según el siguiente modelo estadístico (Cuadro 6).

yijk=
$$\mu$$
+ Ui + Sj + (MxU)ij + ϵ ijk

Dónde: y = variable de respuesta obtenida de la ecuación.

m = media general.

U = efecto i ésimo de la protección en los tratamientos.

S = efecto j ésimo del nivel de nutrición en los tratamientos.

SxU= efecto ij ésimo de la interacción entre protección y nutrición.

 ε = término de error, donde ε ~N (0, σ 2).

Cuadro 6. Fuentes de variación del modelo estadístico utilizado en el análisis de los datos de los cultivos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y culantro de Castilla (*Coriandrum sativum* L.) hidropónico.

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)
Bloque	4
Protección	1
Error (P)	4
Nutrición	1
Protección x nutrición	1
Error (N)	8
Total	19

Resultados

Evapotranspiración en lechuga

Durante el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica se obtuvieron valores de ET_c acumulada de 231,02 (±11,83 Error Estándar [E.E.]), 239,10 (±7,45 E.E.), 224,81 (±12,08 E.E.) y 230,08 (±13,20 E.E.) mm para los tratamientos con protección y nutrición alta (CA), con protección y nutrición baja (CB), sin protección y nutrición alta (SA) y sin protección y nutrición baja (SB), respectivamente. No hubo efecto estadísticamente significativo (P>0,05) de la interacción protección x nutrición ni efectos independientes de la protección y de la nutrición sobre la ET_c acumulada.

No se presentó efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, ni efecto (P>0,05) independiente de la protección sobre la ET_c semanal. El factor nutrición afectó significativamente (P<0,05) la ET_c de la lechuga en las semanas 2 y 4, en donde al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto se observó que la ET_c disminuyó 20,64% en la semana 2 y aumentó 9,05% en la semana 4 (Figura.11).

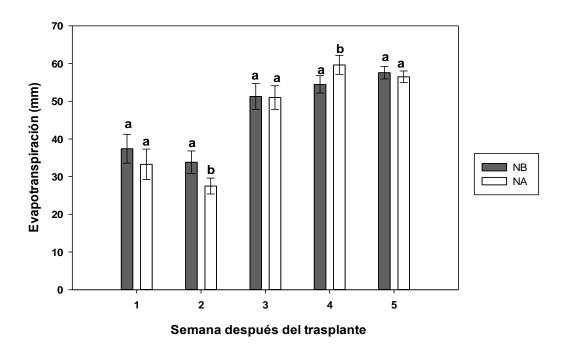


Figura 11. Efecto del factor nutrición sobre la Evapotranspiración (mm) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA son los valores promedio de los tratamientos con nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Evapotranspiración en culantro castilla

En el ciclo de cultivo del culantro castilla se obtuvieron valores de ET_c acumulada de 155,73 (±15,27 E.E.), 189,02 (±10,13 E.E.), 170,17 (±8,24 E.E.) y 161,21 (±15,54 E.E.) mm para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. No hubo efecto de la interacción protección x nutrición ni efecto independiente de la protección y de la nutrición sobre la ET_c acumulada del cultivo (P>0,05).

Respecto a las evaluaciones semanales, en la semana 4 hubo efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición sobre la ET_c, mientras que no hubo efecto (P>0,05) de los factores independientes en las diferentes semanas. En la semana 4, al variar de una condición sin protección a otra con protección, la ET_c aumentó 27,93% con un nivel de nutrición bajo; mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto la ET_c disminuyó 14,97%. Respecto al efecto de la nutrición sobre la ET_c, se observó que al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto la ET_c incrementó sustancialmente 33,12% en el cultivo con protección, mientras que en el cultivo sin protección por el contrario se redujo 9,68% (Figura.12).

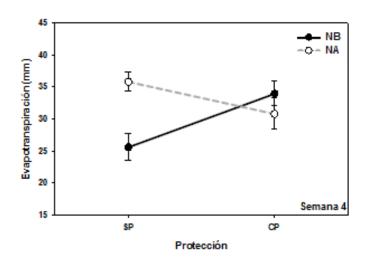


Figura 12. Efecto de la interacción protección x nutrición sobre la Evapotranspiración (mm) en la semana 4 del ciclo de cultivo del culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n= 5).

Índice de área foliar (IAF) en lechuga

Se obtuvieron valores de IAF en los tratamientos CA, CB, SA y SB de 28,45 (1,84 E.E.), 31,45 (±1,94 E.E.), 21,77 (±1,90 E.E.) y 26,66 (± 2,08 E.E.) m²·m⁻², respectivamente. En las evaluaciones semanales, hubo efecto (P<0,05) de la

interacción protección x nutrición sobre el IAF en la semana 5. El efecto independiente de la protección sobre el IAF fue significativo (P<0,05) en la semana 2 (Figura.14B). Por su parte el factor nutrición afectó únicamente (P<0,05) en la semana 4 (Figura.14B).

Durante la semana 5, al pasar de un cultivo sin protección a otro con protección, el IAF aumentó 11,44% con un nivel de nutrición bajo; mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto el IAF aumentó 30,42%. Al analizar el efecto de la nutrición, se observó que al pasar de un nivel de nutrición alto a un nivel de nutrición bajo, la magnitud en respuesta en IAF fue mayor en el cultivo sin protección respecto al cultivo con protección, en donde el IAF se aumentó 28,69% en el cultivo sin protección y 9,67% en el cultivo con protección (Figura.13).

Al variar las condiciones del cultivo sin protección a otro con protección el IAF aumentó 16,88% en la semana 2 (Figura.14A). Mientras que, al pasar de un nivel de nutrición alto a uno bajo el IAF aumentó 19,44% en la semana 4 (Figura.14B).

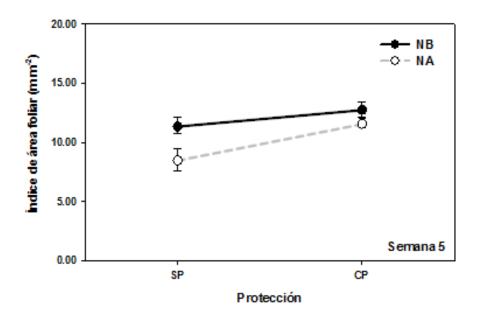
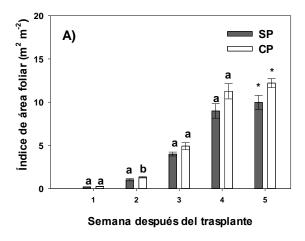


Figura 13. Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el índice de área foliar (m²·m²) en la semana 5 del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).



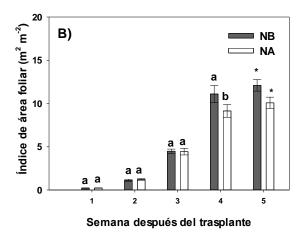


Figura 14. Efecto del factor protección (14A) y del factor nutrición (14B) sobre el índice de área foliar (IAF) (m²·m²) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (14A) y nutrición (14B).

Índice de área foliar culantro castilla

Durante el ciclo de cultivo se obtuvieron valores de IAF acumulada en los tratamientos CA, CB, SA y SB de 3,41 (0,29 E.E.), 1,98 (±0,09 E.E.), 2,96 (±0,24 E.E.) y 1,73 (± 0,09 E.E.) m²·m²·, respectivamente. El IAF presentó efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición en la semana 3 en el cultivo de culantro casilla. Por su parte, el IAF no presentó efecto (P>0,05) independiente de la protección durante las evaluaciones del cultivo, pero si hubo efecto (P<0,05) independiente de la nutrición en las semanas 2, 4 y 5.

En la semana 3, al cambiar de un cultivo sin protección a otro con protección, el IAF se mantuvo constante con un nivel de nutrición bajo; mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto el IAF aumentó sustancialmente 29,51%. Al analizar el efecto de la nutrición, se observó que al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto, la magnitud en respuesta en IAF fue mayor en el cultivo con protección respecto al cultivo sin protección, en donde aumentó 24,67% en el cultivo sin protección y 55,53% en el cultivo con protección (Figura.15).

En la semana 2, 4 y 5, al cambiar de un nivel de nutrición alto a un nivel de nutrición bajo el IAF disminuyó 14,70%, 71,62% y 47,29%, respectivamente (Figura.16).

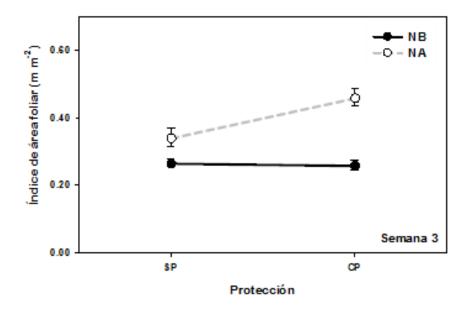


Figura 15. Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el índice de área foliar (m²·m⁻²) en la semanas 3 del ciclo de cultivo del culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).

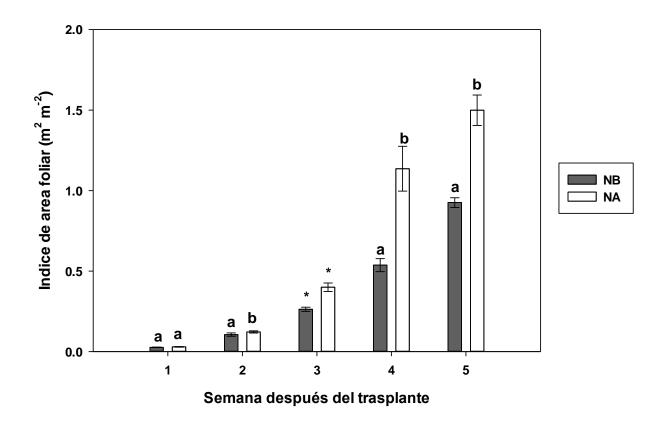


Figura 16. Efecto del factor nutrición sobre el índice de área foliar (IAF) (m²·m²) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Tasas de crecimiento (TC) en lechuga

En el cultivo de lechuga hidropónica hubo efecto estadísticamente significativo (P<0,05) de la interacción protección x nutrición sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA) en la semana 5. No hubo efecto (P>0,05) independiente de la protección sobre la TCA, mientras que el factor nutrición presentó efecto (P<0,05) sobre la TCA en la semana 2 (Figura.17). Respecto a la TCR, no hubo efecto estadísticamente significativo (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, ni de los factores independientes sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) durante las semanas de evaluación.

Al final del ciclo, al cambiar de una condición sin protección a otra con protección, la TCA disminuyó 135,11% con un nivel de nutrición bajo; mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto la TCA aumentó 159,21%. Al evaluar el efecto de la nutrición sobre la TCA, se observó que al variar de un nivel de nutrición alto a otro nivel con nutrición bajo, la magnitud en respuesta de la ER de Mg fue menor en el cultivo sin protección, la TCA aumentó 128,31% en el cultivo sin protección y disminuyó 163,41% en el cultivo con protección (Figura.17A).

En la semana 2, al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto la TCA aumentó un 28,85% (Figura.17B).

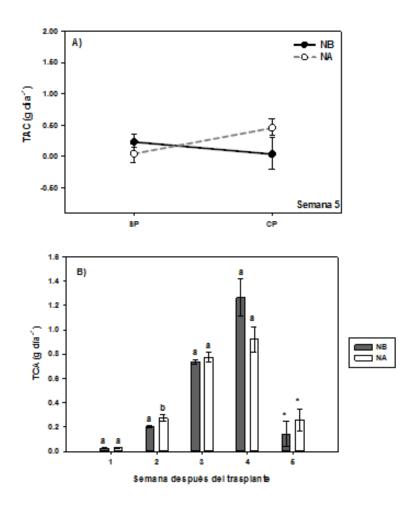


Figura 17. Efecto de la interacción protección x nutrición (Figura.17A) y del factor nutrición (Figura.17B) sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g⋅día⁻¹) del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5 (16A) y n= 10 (17B). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) nutrición. El símbolo * indica efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición (17B).

Respecto a la TCR, no hubo efecto estadísticamente significativo (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, ni de los factores independientes sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) durante las semanas de evaluación (Figura.18).

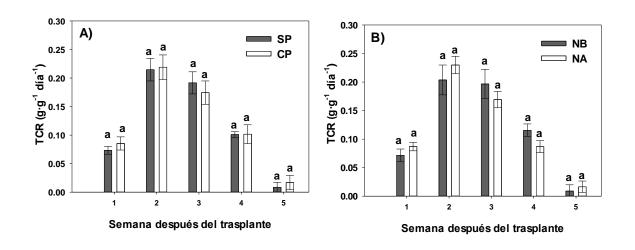


Figura 18. Efecto del factor protección (18A) y del factor nutrición (18B) sobre la tasa de crecimiento relativo (TRC) (g·g-¹día-¹) en las semanas del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (18A) y nutrición (18B).

Tasas de crecimiento culantro castilla

En la TCA y la TCR, no hubo efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición durante las semanas evaluadas. Además, durante el ciclo de cultivo, la protección no afectó la TCA (P>0,05), mientras que la nutrición tuvo efecto (P<0,05) estadísticamente significativo sobre la TCA en las semanas 1, 3 y 4. Al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto la TCA aumentó 15,25% en la semana 1, 44,12% en la semana 3, y 46,08% en la semana 4 (Figura.19).

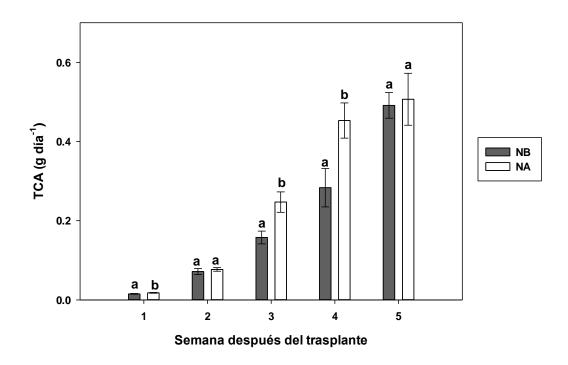


Figura 19. Efecto del factor nutrición sobre la tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g·día⁻¹) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas NB y NA son los valores promedio de los tratamientos con nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Por su parte, no hubo efecto (P>0,05) independiente de la protección sobre la TCR, mientras que el factor nutrición afectó (P<0,05) durante las semanas 1, 3 y 5. Al cambiar de un nivel con nutrición bajo a un nivel con nutrición alto la TCR aumentó 9,42 % en la semana 1, 20,02% en la semana 3 y disminuyó 32,97% en la semana 5 (Figura.20).

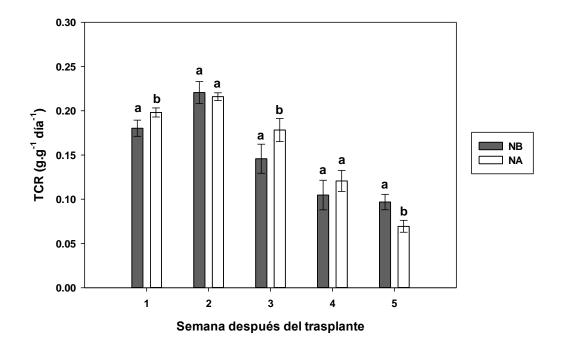


Figura 20. Efecto del factor nutrición sobre la tasa de crecimiento relativo (TCR) (g·g⁻¹día⁻¹) en las semanas del ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor nutrición.

Rendimiento en lechuga

La respuesta en rendimiento fresco al final del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, en orden creciente fue de11,17 (±0,46 E.E), 11,16 (±0,76 E.E), 10,82 (±1,11 E.E) y 7,29 (±0,95 E.E) kg·m⁻², para los tratamientos CA, CB, SB y SA, respectivamente.

La interacción de ambos factores afectó (P<0,05) el rendimiento en la semana 5. Al analizar el efecto simple de la protección, se observó que con un nivel de nutrición bajo, al pasar de una condición sin protección a una condición de cultivo protegido, el rendimiento incrementó ligeramente un 3,04% (0,33 kg m⁻²), mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto el rendimiento aumentó sustancialmente un 41,98% (3,88 kg m⁻²). Al evaluar el efecto de la nutrición sobre el rendimiento, se observó que el efecto fue mayor en el cultivo sin techo, donde al variar de un nivel de nutrición alto a uno bajo, el rendimiento incrementó 38,97% (3,53 kg m⁻²), mientras que en el cultivo con techo el rendimiento se mantuvo constante (P>0,05) (Figura.21).

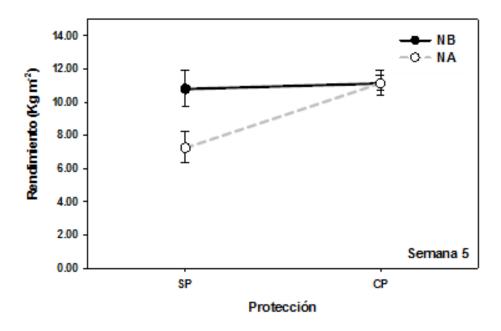


Figura 21. Efecto de la interacción protección x nutrición sobre el rendimiento (kg·m⁻²) en la semana 5 del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5).

Rendimiento en culantro castilla

En el cultivo de culantro castilla hidropónico, la respuesta en rendimiento fresco al final del ciclo, en orden creciente fue de 5,30 (±0,28 E.E), 4,78 (±0,49 E.E), 3,06 (±0,11) y 3,01(±0,36 E.E) kg·m⁻², para los tratamientos CA, SA, SB y CB, respectivamente, lo cual equivale a 11,78 rollos m⁻² en el tratamiento CA, 10,61 en SA, 6,79 en SB y 6,68 en CB. No hubo efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición ni efecto (P>0,05) independiente de la protección sobre el rendimiento. Únicamente el factor nutrición afectó significativamente (P<0,05) dicha variable, ya que al cambiar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto el rendimiento aumentó 49,72% (2,01 kg m⁻²).

Eficiencia de recuperación de nutrientes en lechuga

Al final del ciclo de cultivo, la ER de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg no fue afectada por la interacción protección x nutrición. Por otra parte, hubo efectos (P<0,05) independientes de ambos factores sobre la ER de P y Mg, y de la nutrición sobre la ER de N, K y Ca.

Nitrógeno

Al final del ciclo de cultivo se obtuvieron valores de eficiencia de recuperación (ER) acumulada de nitrógeno (N) de 0,35 (±0,01E.E), 0,75 (±0,05 E.E.), 0,29 (±0,02 E.E.) y 0,76 (±0,04 E.E.) g g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER acumulada no presentó efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición. Al evaluar el efecto independiente de los factores, se observó que no hubo efecto (P>0,05) de la protección, mientras que la nutrición afectó (P<0,05) la ER acumulada de N. Al comparar el nivel con nutrición alto con el de nutrición bajo la ER de N aumentó 80,04% (Figura.22B).

Fósforo

Durante el ciclo de cultivo se obtuvieron valores de ER acumulada de fósforo (P) de 0,16 (±0,05=1 E.E), 0,35 (±0,05 E.E.), 0,13 (±0,02 E.E.) y 0,33 (±0,04 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER en el P no presentó efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición. Por su parte, la ER acumulada del P presentó efecto (P<0,05) independiente de la protección y de la nutrición. Al variar de una condición sin protección a una condición con protección la ER aumentó un 12,04% (Figura.21A). Mientras que al cambiar de un nivel con nutrición alto a un nivel con nutrición bajo la ER aumentó 81,40% (Figura.22B).

Potasio

La ER acumulada de potasio (K) presentó valores de 0,36 (±0,01 E.E.), 0,79 (±0,05 E.E.), 0,30 (±0,02 E.E.) y 0,78 (±0,05 E.E.) g·g⁻¹, para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER acumulada no presentó efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, ni efecto (P>0,05) independiente de la protección. Sin embargo, hubo efecto (P<0,05) independiente de la nutrición, en donde el cambio de un nivel de nutrición alto a otro con nutrición bajo, incrementó la ER del K 81,08% (Figura22B).

Calcio

Durante el ciclo de cultivo se obtuvieron valores de ER acumulada de Ca de 0,09 (±0,003 E.E.), 0,22 (±0,01 E.E.), 0,08 (±0,005 E.E.) y 0,21 (±0,01 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER acumulada de Ca, no fue afectada por la interacción protección x nutrición (P>0,05) ni por el efecto independiente de la protección. Por su parte el factor nutrición afectó significativamente (P<0,05), en donde al cambiar de un nivel con nutrición alto a un nivel con nutrición bajo la ER aumentó 83,80% (Figura.22B).

Magnesio

Se obtuvieron valores de ER acumulada de Magnesio (Mg) en los tratamientos CA, CB, SA y SB de 0,11 (0,004 E.E.), 0,33 (±0,02 E.E.), 0,09 (±0,006 E.E.) y 0,29 (± 0,02 E.E.) g·g·¹, respectivamente. No hubo efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición sobre la ER acumulada de Mg. Por su parte hubo efecto independiente del factor protección y durante el ciclo de cultivo (Figura.22). Al variar de una condición sin protección a otra con protección la ER acumulada de Mg aumentó 13,68% (Figura.22A). Mientras que al pasar de un nivel de nutrición alto a un nivel bajo la ER aumentó 100% (Figura.22B).

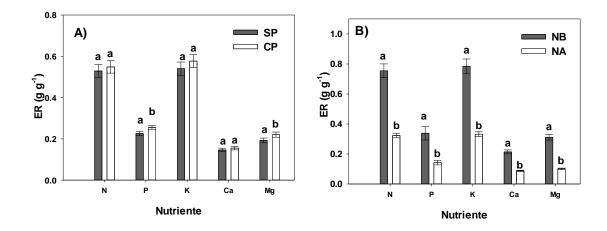


Figura 22. Efecto del factor protección (22A) y del factor nutrición (22B) sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (g·g⁻¹) en el ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (22A) y nutrición (22B).

Eficiencia de recuperación de nutrientes en culantro castilla

Al final del ciclo de cultivo, hubo efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición sobre la ER de Mg. Mientras que hubo efectos (P<0,05) independientes de ambos factores sobre la ER del P y Ca y efecto (P<0,05) de la nutrición sobre la ER de N y K.

Nitrógeno

La ER acumulada del N presentó valores de 0,68 (±0,03 E.E), 0,84 (±0,05 E.E.), 0,61 (±0,06 E.E.) y 0,95 (±0,03 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente Durante el ciclo de cultivo, la ER no presentó efecto (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, ni efecto (P>0,05) independiente de la protección, únicamente el factor nutrición tuvo efecto (P<0,05) durante el ciclo. Al cambiar las condiciones del cultivo a un nivel de nutrición alto a un nivel bajo, la ER acumulada de N aumentó 32,47% (Figura.23B).

Fósforo

Durante el ciclo de cultivo se obtuvieron valores de ER acumulada de P de 0,32 (±0,03 E.E), 0,46 (±0,32 E.E.), 1,71 (±0,07E.E.) y 5,82 (±0,18 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER acumulada de P no fue afectada (P>0,05) por la interacción de ambos factores, mientras que se presentó efecto (P>0,05) independiente de la protección y de la nutrición (Figura. 23).

Al variar las condiciones del cultivo sin protección a otro con protección la ER acumulada de P disminuyó 15,14% (Figura.22A). Mientras que, al pasar de un nivel de nutrición alto a uno bajo la ER aumentó 47,09% (Figura.23B).

Potasio

Los tratamientos CA, CB, SA y SB presentaron valores de ER acumulada de K de 8,04 (±0,27 E.E), 17,04 (±1,01 E.E.), 7,90 (±0,39 E.E.) y 16,40 (±0,48 E.E.) g·g⁻¹, respectivamente. La ER de K no fue afectada por la interacción protección x nutrición (P>0,05). Al evaluar el efecto independiente de los factores, se observó que no hubo efecto (P>0,05) de la protección, mientras que la nutrición afectó (P<0,05) la ER. Al pasar de un nivel con nutrición alta a un nivel con nutrición bajo la ER de K aumentó 56,83% (Figura.23B).

Calcio

Durante el ciclo de cultivo se obtuvieron valores de ER acumulada de Ca de 0,69 (±0,04 E.E.), 2,38 (±0,12 E.E.), 0,73 (±0,03 E.E.) y 2,64 (±0,26 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La ER de Ca, no fue afectada por la interacción protección x nutrición (P>0,05). El efecto independiente de la protección y de la nutrición sobre la ER fue significativo (P<0,05).

Al variar de una condición sin protección a una condición con protección la ER acumulada de Ca disminuyó 15,0% (Figura.23A). Mientras que al cambiar de un nivel con nutrición alto a un nivel con nutrición bajo la ER aumentó 91,09% (Figura.23B).

Magnesio

LA ER acumulada de Mg presentó valores de 0,94 (±0,03 E.E), 5,98 (±0,32 E.E.), 1,10 (±0,05 E.E.) y 7,63 (±0,35 E.E.) g·g⁻¹ para los tratamientos CA, CB, SA y SB, respectivamente. La interacción protección x nutrición tuvo efecto (P<0,05) sobre la ER acumulada de Mg (Figura.24).

Al final del ciclo, al cambiar de una condición sin protección a otra con protección, la ER de Mg disminuyó 33,69% con un nivel de nutrición bajo; mientras que cuando el nivel de nutrición fue alto la ER disminuyó, en menor magnitud (10,18%). Al evaluar el efecto de la nutrición sobre la ER de Mg, se observó que al variar de un nivel de nutrición alto a otro nivel con nutrición bajo, la magnitud en respuesta de la ER de Mg fue menor en el cultivo con protección, la ER de Mg aumentó 114,92% en el cultivo sin protección y 97,87% en el cultivo con protección (Figura.24).

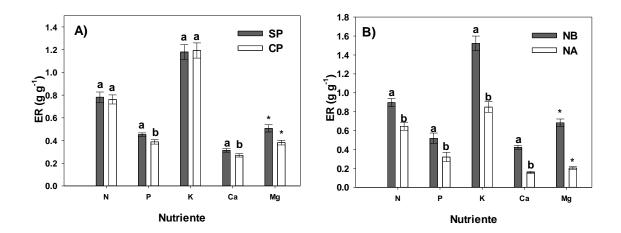


Figura 23. Efecto del factor protección (23A) y del factor nutrición (23B) sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) (g·g⁻¹) en el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 10). Letras diferentes en cada semana indican efecto estadísticamente significativo (P<0,05) del factor protección (23A) y nutrición (23B).

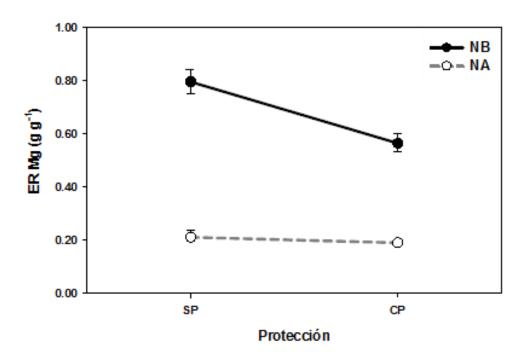


Figura 24. Efecto de la interacción protección x nutrición sobre la eficiencia de recuperación acumulada (ER) de magnesio (Mg) (g·g⁻¹) en el ciclo de cultivo de culantro castilla hidropónico, Alajuela, Costa Rica, 2016. Las siglas SP y CP indican condición sin y con protección, respectivamente, NB y NA indican el nivel de nutrición bajo y alto, respectivamente. Las barras verticales corresponden al error estándar de la media (n = 5). El símbolo * indica efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición.

Discusión de resultados

Evapotranspiración en lechuga hidropónica

En el presente estudio, no hubo efecto de la interacción protección x nutrición sobre la ET_c de lechuga. Al mismo tiempo, la protección no afectó (P>0,05) la ET_c a pesar de que se presentaron altos valores promedio de radiación solar durante el ciclo de 45,8 y 27,9 mol m⁻²día⁻¹(Figura.3) y de temperatura de 25,5 y 25,75°C para los tratamientos SP y CP, respectivamente (Cuadro 4). Según Defilipes *et al.* (2006), la influencia de los factores climáticos sobre la ET_c es mayor en condiciones de alta temperatura y radiación solar, pero esto no se reflejó en los resultados obtenidos.

Probablemente, esto se debe a que al ser un sistema de protección abierto lateralmente, durante el verano, la alta velocidad de los vientos fue el factor climático predominante sobre las tasas de ET_c, relegando al efecto de sombreo (Cuadro 5). Esta condición tiene como consecuencia una alta evaporación desde la superficie húmeda y expuesta del sustrato, principalmente en etapas iniciales del cultivo cuando se presenta una baja cobertura foliar debido al bajo IAF. El comportamiento de la ET_c en este estudio (Figura.11), fue coincidente con el obtenido por Silva *et al.* (2013), donde los valores fueron menores al inicio y final del cultivo y mayores durante la etapa de formación de la roseta (Cun *et al.* 2015).

Por su parte, el nivel de nutrición afectó la ET_c en las semanas 2 y 4. En la semana 2, la ET_c disminuyó, al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel alto, probablemente al efecto osmótico de la alta concentración de nutrientes. Posteriormente en la semana 4, el factor nutrición afectó (P<0,05) incrementando la ET_c al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel alto (Figura,11). Varios autores mencionan que el requerimiento hídrico aumenta conforme incrementa el nivel de nutrición, ya que hay más crecimiento de la planta en términos de área foliar y rendimiento (Kumar *et al.* 2008; Jamali, 2013 y Silva *et al.* 2013). AlKhader y Rayyan (2013) concuerdan en que la tasa de absorción de agua es mayor cuando las tasas de aplicación de diferentes fertilizantes son altas, ya que las plantas adquieren mayor tamaño.

El IAF, presentó efecto (P<0,05) del factor nutrición en la semana 4, en donde los valores más altos de IAF y TCA se obtuvieron en los tratamientos con nivel de nutrición bajo. Este comportamiento fue influenciado por la acumulación de sales en el nivel de nutrición alto, ya que los valores de CE aumentaron considerablemente en esta semana (Figura.9), repercutiendo en un daño en las raíces de los tratamientos con NA, principalmente en el tratamiento sin protección y con nivel de nutrición alto.

El cultivo de lechuga es moderadamente sensible a la salinidad, presenta un umbral de tolerancia de 1,3 dS m⁻¹, si lo sobrepasa, la tasa de crecimiento de las hojas se ve afectada. Coca *et al.* (2012), mencionan que las sales producen un estrés hídrico que impide la absorción de agua por las raíces, reduciendo la expansión celular de éstas y de las hojas jóvenes, y a su vez disminuye el área foliar y las tasas de crecimiento (Munns y Tester, 2008).

Al presentarse valores por encima del umbral de CE en los tratamientos con NA en la semana 4, el IAF fue menor y la absorción de agua fue afectada a nivel de raíces por la acumulación de sales. Dándose una mayor pérdida de agua por evaporación en el sustrato y una menor transpiración del cultivo bajo un nivel de nutrición alta, lo que se reflejó en una mayor ETc.

Evapotranspiración en culantro castilla hidropónico

Vallejos y Estrada (2004) en un ciclo de culantro castilla tiene un ciclo de 40 días en condiciones tropicales, determinaron que la demanda de agua fue de 200 mm, distribuidos en un 20% en los primeros 6 días, 50% en la etapa de establecimiento y crecimiento acelerado hasta los 25 días y un 30% en los 10 días restantes hasta cosecha. Los valores obtenidos (mm) en esta investigación en orden creciente, fueron de 189,02 (CB), 170,17 (SA), 161,21 (SB) y 155,73 (CA).

En la semana 3 se presentaron mayores valores de precipitación (Figura.6), lo cual se reflejó en una disminución de la CE en todos los tratamientos en la semana posterior (Figura.10). En la semana 4, la interacción protección x nutrición se reflejó en una menor ET_c en el tratamiento sin protección con nivel de nutrición bajo (Figura.12), esto se puede deber a que hubo una lixiviación de nutrientes por la precipitación, lo que causó una dilución de la solución nutritiva y por ende una menor cantidad de nutrientes, influyendo en un menor IAF (Figura.4) y ET_c del cultivo (Figura.12).

Kumar *et al.* (2008), mencionan que en el cultivo de culantro castilla al aumentar la concentración de nutrientes, incrementa la eficiencia del uso del agua y por lo tanto hay una mejora en el rendimiento y en el área foliar, esto hace que aumente la transpiración, ya que la fracción de cobertura del suelo es mayor y por lo tanto la evaporación disminuye (Silva *et al.* 2013).

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Rashed y Darwesh (2015), en donde evaluaron el efecto del microclima y de la nutrición en el cultivo de culantro castilla, correlacionaron los valores de temperatura, humedad relativa y precipitación, con niveles crecientes de fertilización nitrogenada en una época lluviosa y seca y determinaron que las variables ambientales y el nivel de nutrición afectan el consumo de agua del cultivo.

Índice de área foliar, tasa de crecimiento absoluto y relativo y rendimiento en lechuga hidropónica

En general, independientemente del nivel de nutrición, se observó una tendencia mayor de IAF en los tratamientos CP, aumentando significativamente (P<0,05) en la semana 2 un 16,88% (Figura.14A). Al respecto De Grazia *et al.* (2001) mencionan que la producción de hojas con una mayor superficie por unidad de biomasa se da con niveles más bajos de radiación incidente.

A su vez, Do Bonfim *et al.* (2010), citado por Ruiz (2012), al evaluar cubiertas plásticas de distintos colores y encontraron que al utilizar malla de color rojo, las plantas son más altas y presentas hojas de mayor tamaño en comparación con las cultivadas a pleno sol. Santos *et al.* (2009) determinaron que desde los 14 días después del trasplante (semana 2), las plantas bajo una condición de protección, incrementan un 64,18% en el número de hojas, en comparación con el cultivo a campo abierto

Por otro lado, al considerar el factor nutrición independientemente de la condición de protección, se observó que en la semana 4, el cultivo con nutrición baja aumentó el IAF en 19,44% (Figura.14B) respecto al cultivo NA. Esto fue coincidente con el aumento considerable de los valores de CE en los tratamientos con nutrición alta en esta semana (Figura.9).

Smarakoon *et al.* (2006) mencionan que con un incremento de CE el número de hojas, el área foliar y el peso de la planta de lechuga disminuye. Por su parte, Santos *et al.* (2009) mencionan que desde los 28 días después del trasplante (semana 4), las plantas de lechuga aumentan un 54,2% su área foliar.

Al final del ciclo del cultivo (semana 5), hubo interacción protección x nutrición, en donde el mayor IAF se obtuvo en el tratamiento con un nivel de nutrición bajo y con protección (CP-NB), mientras que el menor IAF se obtuvo en el cultivo con un nivel de nutrición alta y a pleno sol (SA o SP - NA) (Figura.13).

En estudios similares Velásquez *et al.* (2014), evaluaron dos tipos de ambientes en la producción de lechuga, uno bajo macrotúnel y otro a pleno sol, combinados con tres niveles de fertilización de N, P₂O₅ y K (considerados alto, medio y alto). Coincidente con el presente estudio, los autores determinaron que bajo las condiciones del macrotúnel se presentó un mayor IAF, respecto a las cultivadas a pleno sol. Además, encontraron que no hubo efecto (P>0,05) del nivel de fertilización, ni de la interacción entre ambiente y dosis de fertilización.

La TCA en el cultivo de lechuga hidropónica, en ambos niveles de nutrición, presentó un incremento exponencial entre las semanas 1 y 4 (28 ddt) para luego desacelerar el crecimiento en la semana 5. Dicho comportamiento fue coincidente con los valores obtenidos hasta la semana 4, donde el factor nutrición presentó efecto (P<0,05) sobre la TCA (Figura.17B).

Al final del ciclo (semana 5), la TCA fue afectado (P>0,05) de la interacción protección x nutrición, en donde la mayor TCA la tuvo el tratamiento con un nivel de nutrición alto y protección (Figura.17A). De Grazia *et al.* (2001), evaluaron el efecto de tres niveles radiación solar incidente (0 %, 35 % y 65 %), combinados con tres niveles de nutrición de N (0, 75 y 150 kg N ha⁻¹) y determinaron que el nivel de radiación fue el factor determinante del crecimiento, por su parte, señalan que el nivel de nutrición nitrogenada afectó únicamente la tasa de producción de biomasa si la misma no se halla en niveles limitantes.

En cuanto a la TCR, no hubo efecto (P>0,05) de la interacción protección ni de los factores independientes. La mayor actividad en la demanda del cultivo se presentó en las semanas 2 y 3, posteriormente se observó que la TCR decreció con la edad. Resultados similares han sido descritos en otras especies (Sedano *et al.* 2005), tales como en chía (Colorado *et al.* 2013) y albahaca (Silva *et al.* s.f), en donde la mayor TCR se presentó al inicio del ciclo y posteriormente fueron disminuyendo gradualmente hasta alcanzar valores mínimos debido a que durante las semanas se inició la etapa de senescencia, presentando una disminución en la MS total de la planta.

Respecto al rendimiento en el cultivo de lechuga, el tratamiento CB (CP-NB) obtuvo valores similares (11,16 kg m⁻²) a los tratamientos CA (CP-NA) y SB (SP-NB) (11,17 y 10,82 kg m⁻² respectivamente), y superiores al tratamiento SA (7,29 kg m⁻²) (Figura.21) lo cual fue coincidente en el comportamiento mostrado en la ETc y IAF al final del ciclo.

En estudios similares Samarakoon *et al.* (2006), estudiaron el comportamiento de la producción de lechuga al utilizar tres distintas dosis de una solución nutritiva, i- 0,5 g l⁻¹ (CE: 1,4 dS m⁻¹), ii- 1 g l⁻¹ (CE: 2 dS m⁻¹) y iii- 2 g l⁻¹ (CE: dS m⁻¹), encontraron que el rendimiento disminuye al incrementar la CE y que además se pueden presentar antagonismos, desbalances y toxicidades utilizando una CE alta. Los autores concluyeron que la mejor opción para la producción de lechuga en condiciones de clima caliente es la solución nutritiva de baja concentración, lo que coincide con los resultados obtenidos en este estudio.

Los tratamientos con alto nivel de nutrición (NA: SA y CA) presentaron valores de CE por encima del óptimo durante todo el ciclo de cultivo, siendo más altos en las tres últimas semanas (Figura.9), donde se presenta el máximo crecimiento y el mayor consumo de agua (Figura.11). El incremento en la CE se debe a que bajo condiciones típicas de verano, de alta radiación solar (Figura.3) y temperatura, así como baja humedad relativa y vientos fuertes, la tasa de absorción de agua es mayor que la tasa de absorción de nutrientes (Samarakoon et al. 2006), provocando una acumulación de nutrientes en el sustrato con altos niveles de nutrición (Figura.3).

Valverde *et al.* (2010) encontraron rendimientos más altos en plantas de lechuga cultivadas bajo sarán negro (7,76 kg m⁻²) y rendimientos inferiores en plantas producidas a pleno sol (4,0 kg m⁻²). A su vez, De Grazia *et al.* (2001), determinaron que las plantas de lechuga que son cultivadas a pleno sol o con 35% de sombra alcanzan un rendimiento significativamente mayor que las cultivadas bajo un 65% de sombra.

Los resultados de dichos autores, coincidentes con este estudio, probablemente están más relacionados con el factor nutrición que con el factor protección, debido a la acumulación de sales (alta CE) en condición sin protección y alta concentración de sales, tal como sucedió en SA. Además, similar al presente estudio, se obtuvieron rendimientos superiores en los tratamientos con protección con un nivel de nutrición bajo.

Índice de área foliar, la tasa de crecimiento absoluto y relativo y rendimiento fresco en culantro castilla hidropónico

En este estudio, el factor nutrición fue el más determinante sobre el IAF, TCA, TCR y el rendimiento del cultivo de culantro castilla hidropónico. El IAF aumentó al utilizar un nivel de nutrición alto en las semanas 2, 4 y 5 (Figura.16). Por su parte en la semana 3, hubo efecto (P<0,05) de la interacción protección x nutrición, en donde el mayor valor de IAF lo obtuvo el tratamiento con protección y un nivel de nutrición alto (CA: CP-NA). Mientras que los tratamientos con menor valor de IAF fueron los que tuvieron un nivel de nutrición bajo (SB y CB), independientemente del nivel de protección (Figura.15).

Al respecto, Angeli *et al.* (2016) evaluaron el rendimiento y la eficiencia del uso de agua en el cultivo de culantro castilla mediante la implementación de distintas profundidades y tres dosis de aplicación de nitrógeno (50, 100 y 150% de la recomendación 70 kg ha⁻¹ para el cultivo). Dichos autores determinaron que existe una correlación positiva entre el rendimiento y el área foliar con las dosis de nitrógeno aplicado.

Durante el ciclo de cultivo, al pasar de un nivel de nutrición bajo a uno alto la TCA aumentó en las semanas 1, 3 y 4 (Figura.19), mientras que la TCR, al pasar de un nivel de nutrición bajo a un nivel de nutrición alto la TCR aumentó en las semanas 1, 3 y 5 (Figura.20). El comportamiento obtenido de la TCR en el culantro castilla, coincide con el reportado por Marín (2003) en donde independientemente del ambiente de producción utilizado, la TCR fue más alta al inicio del ciclo y disminuyó rápidamente a través del tiempo. Por otro lado, en otra investigación realizada en lechuga hidropónica con distintos niveles de nutrición, encontraron que los valores de TCR aumenta linealmente conforme aumenta el nivel de nutrición (Walker *et al.* 2001).

Respecto al rendimiento, este aumentó al utilizar un nivel de nutrición de alta concentración (NA), independientemente de la condición de protección presente. Esto fue influenciado por la alta precipitación durante el ciclo de culantro castilla (Figura.6), en el cual la lluvia acumulada fue de 325,1 mm, ya que se adelantó el inicio de las lluvias debido a la irregularidad del clima por el fenómeno del niño. Lo que causó una dilución de todas las soluciones nutritivas, siendo reflejada en los valores de CE a partir de la semana tres (Figura.10), en donde la precipitación incrementó significativamente (Figura.6).

Por lo tanto a partir de la semana 3, la CE en los niveles de nutrición de alta concentración, permanecieron en rangos de 1,01 -1,02 dS m⁻¹, mientras que los niveles de nutrición baja tuvieron rangos de 0,41- 0,51 dS m⁻¹ (Figura.10) debido a la lixiviación de los nutrientes. Probablemente el impacto del lavado fue mayor en los cultivos con baja concentración de nutrientes. Los resultados obtenidos en el presente estudio, sugieren que los niveles de nutrición alta en condiciones de alta precipitación, favorecen la producción de materia fresca, ya que permiten mantener una solución de CE adecuada en el medio de cultivo, a pesar del lavado de nutrientes.

Al respecto, Carrasco *et al.* (2007) estudiaron el efecto de diferentes CE (1,5, 3 y 4,5 dS m⁻¹) en la solución nutritiva en plantas de albahaca cultivadas en un sistema hidropónico Nutrient Film Technique (NFT). Estos autores concluyeron que el mejor rendimiento fresco y el rendimiento de aceite esencial se obtuvieron con la solución nutritiva de 1,5 dS m⁻¹ de CE, correspondientes al nivel de alta concentración de nutrientes. Por lo que los niveles de nutrición alta en condiciones de alta precipitación favorecen la producción de materia fresca, ya que permite mantener una solución de CE adecuada en el medio de cultivo, a pesar del lavado de nutrientes.

Finalmente, Oliveira *et al.* (2003), evaluaron el efecto de distintas dosis de N en los componentes de producción de cultivos, donde obtuvieron incrementos de 0.0256 kg m⁻² en masa verde de culantro por cada kg de N ha⁻¹ aplicado, con un rendimiento máximo de 5.4 kg m⁻². Estos resultados coinciden con el rendimiento obtenido en esta investigación, en donde los mayores valores se presentaron en los tratamientos de nivel de nutrición alta con 5,30 kg·m⁻² en el tratamiento CA y 4,78 kg·m⁻² en el SA, independientemente de la protección.

Eficiencia de recuperación de los macronutrientes en lechuga y culantro castilla hidropónico

La eficiencia de recuperación de los macronutrientes al final del ciclo de cultivo de lechuga, presentó efecto (P<0,05) de ambos factores sobre la ER de P y Mg, y de la nutrición sobre la ER de N, K y Ca. Al tener un cultivo con protección, la ER aumentó 12,04% en el P y 13,68% en el Mg. Mientras que al implementar un nivel de nutrición bajo, la ER del N, P, K, Ca y Mg aumenta un 80,04%, 81,40%, 81,08%, 83,80% y 100%, respectivamente (Figura.22).

Al final del ciclo de cultivo de culantro castilla, en condiciones bajo protección, la ER disminuyó 15,14% en el P y 15% en el Ca. Mientras que al usar un nivel de nutrición bajo, la eficiencia de recuperación aumentó 32,47%, 47,09%, 56,83%, 91,09%, en los elementos de N, P, K y Ca, respectivamente (Figura.23).En el caso del Mg, la mejor ER se obtuvo en el tratamiento sin protección y con un nivel de nutrición bajo (Figura.24).

Chávez et al., (2000) citado por Chavez et al. (2002), estudiaron la eficiencia de recuperación del nitrógeno, fósforo y del potasio en los cultivos de chile jalapeño y cebolla, determinaron que el nitrógeno a dosis bajas obtiene una eficiencia hasta del 90%, mientras que en dosis intermedias un 60% y en dosis altas del 50%. Respecto al fósforo, utilizando dosis bajas se obtiene un ER del 70%, con dosis intermedias un 40% y con dosis altas un 20%. En el caso del potasio se obtienen eficiencias del 100% en las dosis intermedias, y a su vez, a dosis mayores la eficiencia disminuye considerablemente.

Conclusiones

- El factor más determinante en la respuesta de la evapotranspiración en el cultivo de lechuga hidropónica fue la nutrición, el cual fue influenciado por la conductividad eléctrica y por el índice de área foliar.
- En la evapotranspiración del cultivo de culantro castilla hidropónico, hubo un efecto de la interacción protección x nutrición casi al final del ciclo, en donde la mayor Etc la obtuvo el tratamiento sin protección con un nivel de nutrición alto.
- En el cultivo de lechuga hidropónica, los tratamientos que presentaron mayor IAF y rendimiento fueron los cultivados con un nivel de nutrición bajo en pleno verano, tratamiento que permite utilizar una menor cantidad de fertilizante.
- En el cultivo de culantro castilla el uso de un nivel de nutrición alto favoreció
 el incremento del IAF y el rendimiento en condiciones de invierno, debido a
 que la alta concentración de nutrientes amortiguó el efecto de la lixiviación
 excesiva de nutrientes, mejorando la disponibilidad de éstos en el medio de
 cultivo.
- En el cultivo de culantro castilla, el uso de un nivel de nutrición bajo disminuyó el IAF y el rendimiento en condiciones de invierno, debido a la pérdida de nutrientes por el drenaje.
- El rendimiento fresco obtenido al final del ciclo de cultivo de lechuga hidropónica, en orden creciente fue de 11,17, 11,16, 10,82 y 7,29 kg·m⁻², para los tratamientos CA, CB, SB y SA, respectivamente.
- El rendimiento fresco obtenido al final del ciclo del culantro castilla hidropónico, en orden creciente fue de 5,30, 4,78, 3,06 y 3,01 kg·m⁻², para los tratamientos CA, SA, SB y CB, respectivamente, lo cual equivale a 11,78 rollos m⁻² en el tratamiento CA, 10,61 en SA, 6,79 en SB y 6,68 en CB.

- El efecto sobre la eficiencia de recuperación de los macronutrientes en ambos cultivos hidropónicos se debió principalmente al factor nutrición, en donde hay un incremento sustancial en la alta eficiencia de recuperación de los macronutrientes cuando el nivel de nutrición es bajo.
- En el cultivo de lechuga, el factor protección tuvo un efecto positivo en la ER del P y Mg, mientras que en el cultivo de culantro castilla tuvo un efecto negativo sobre la ER del P y Ca, probablemente debido a la pérdida de nutrientes en el drenaje por las altas precipitaciones.

Recomendaciones

- Se puede complementar la investigación con un análisis del costo beneficio, sobre el uso de sarán y el nivel de fertilización a utilizar, con base al rendimiento obtenido en cada tratamiento.
- Se recomienda monitorear la incidencia de Tip burn en el cultivo de lechuga, según tratamientos, ya que podría complementarse con el uso de una fertilización foliar con calcio en una determinada semana.
- Se puede monitorear variables como incidencia y severidad de problemas fitopatológicos para determinar si hay un posible efecto positivo de los tratamientos sobre la incidencia e infección de enfermedades.
- Dadas las condiciones climáticas obtenidas en esta investigación, se puede repetir evaluando una solución baja en pleno verano y una solución alta en época de invierno, realizando ajustes nutricionales por semana y por cultivo.

Literatura citada

- ACOSTA, L. 2003. Principios agroclimáticos básicos para la producción de plantas medicinales. Revista Cubana de Plantas Medicinales. Disponible en: http://bvs.sld.cu/revistas/pla/vol8_1_03/pla08103.htm . Consultado 9 Nov. 2015.
- AGUIRRE, CA; VALDEZ, JR; ÁNGELES, G; DE LOS SANTOS, HM; AGUIRRE, Al. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos spot 5 HRG: regresión y k-nn. Agrociencia 45(1): 105-119.
- ALAS, M. 2003. Estructura de costos para la producción de hortalizas cultivadas en invernaderos de la cuenca del Río Reventazón, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc.CATIE, Turrilaba. CR. 90 p.
- ALKHADER, AMF; ABU RAYYAN, AM. 2013. Improving water use efficiency of lettuce (*Lactuca sativa* L.) using phosphorous fertilizers. SpringerPlus 2(1): 563.
- ALLEN, RG; PEREIRA, LS; RAES, D; SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. FAO. Roma, Italia. 323 p.
- ALVARADO, D; CHÁVEZ, F; WILHELMINA, K. 2001. Seminario de agronegocios. Lechugas hidropónicas. Universidad del Pacífico. 43p.
- ALVARADO, Y; SANABRIA, C; VILLALOBOS, J. 1999. El cultivo de culantro coyote (*Eryngium foetidum L., APIACEAE*) para exportación. Siquirres, CR, MAG. 26 p.
- ANGELI,K; DELAZARI,F; NICK,C; FERRERIA, M; DA SILVA, D. 2016. Yield components and water use efficiency in coriander under irrigation and nitrogen fertilization. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 20(5): 6p.
- ANSORENA, M.J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España. 172 p.

- ARUANI, MC; GILI, P; FERNÁNDEZ, L; JUNYENT, RG. 2008. Utilizacion del nitrogeno en diferentes manejos de fertilización en lechuga (*lactuca sativa* L.) y su efecto sobre algunas variables biológicas del suelo. Agro Sur 36(3): 147-157.
- ASADUZZAMAN, M. 2015. Soilless Culture. Use of sustrates for the production of quality horticultural crops. Ave4eva. Mymensingh, Bangladesh. 172 p.
- ASAO,T. 2012. Hydroponics a standard methodology for plant biological researches. Rijeka, Croacia, InTech, 253 p.
- BARBARO, LA; KARLANIAN, MA; MATA, DA. 2014. Importancia del pH y la conductividad eléctrica en los sustratos para plantas. INTA. Buenos Aires Argentina. 5 p.
- BARKER, A; PILBEAM, D. 2007. Handbook of plant nutrition. CRC Press, Taylor & Francis group. Florida, United States. 662 p.
- BARRERA, J; MELGAREJO, LM. 2006. Análisis de crecimiento en plantas. Univeridad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 14 p.
- BELTRANO, J. GIMENEZ, D. 2015. Cultivo en hidroponía. Edupl. Buenos Aires, Argentina. 180 p.
- BERKOVICH, Y; KONOVALOVA, I; SMOLYANINA, S; EROKHIN, A; AVERCHEVA, O; BASSARSKAYA, E; KOCHETOVA, G; ZHIGALOVA, T; YAKOVLEVA, O; TARAKANOV, I. 2017. LED crop illumination inside space greenhouses. REACH Reviews in Human Space Exploration. 6 (2017): 11-24.
- BERTSCH, F. 2009. Absorción de nutrimentos por los cultivos. (multimedia). San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 308 p.
- BOUGOUL, S; TITOUNA, D. 2010. Study of a nutrient solution flows in a saturated rockwool slab using the model of sources and sinks. Transport in Porous Media 85(2): 477-487..

- BRUULSEMA, TW; FIXEN, E; SNYDER, CS. 2004. Fertilizer nutrient recovery in sustainable cropping systems. Better Crops with Plant Food 88(4): 15-17
- BURGHILA, D; BORDUN, C-E; DORU, M; SARBU, N; BADEA, A. 2015. Climate change effects Where to next?. Agriculture and Agricultural Science Procedia 6: 405-412p.
- CANAKCI, M; YASEMIN, N; BILGIN, S; CAGLAYAN, N. 2013. Heating requirement and its costs in greenhouse structures: A case study for Mediterranean region of Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24(2013): 483-490.
- CARRASCO, G; RAMÍREZ, P; VOGEL,H. 2007. Efecto de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva sobre el rendimiento y contenido de aceite esencial en albahaca cultivada en NFT. IDESIA. (25)2: 59-62.
- CASANOVA, M; MESSING, I; JOEL, A; CANETE, A. 2009. Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 69(1): 60-70.
- CASIERRA, F. 2007. Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 1:114-123 p.
- CHAVEZ, N; BERZOZA, M; CUETO; J. 2002. Requerimientos nutricionales y programación de la fertirrigación en hortalizas. Campo Experimental Delicias-INIFAP.10p.
- CHUAN-JIANG, N; YU-YUN, W; MAO-PAN, F; ZHI, X; LI, T; FA-BAO, Z. 2016. Effect of different additives organic fertilizer on fertilizer use efficiency and growth of lettuce. Southwest China journal of agricultural Sciences 29(1): 1-6.

- CISNEROS, E; REY, R; MARTÍNEZ, R; LÓPEZ, T; GONZÁLEZ, F. 2015. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 24(2): 23-30.
- COCA, A; CARRANZA, C. MIRANDA, D; RODRIGUEZ, M. 2012. Efecto del NaCl sobre los parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad de la cebolla de bulbo (*Allium cepa* L.) bajo condiciones controladas. 17 p.
- COLORADO, F., I. MONTAÑEZ, Y C. BOLAÑOS. REY, J. 2013. Crecimiento y desarrollo de albahaca (ocimum basilicum I.) bajo cubierta en la sabana de Bogotá. U.D.C.A actualidad y divulgación científica. 16(1): 121-129.
- CUN, R; DUARTE, C; MONTERO, L. 2015. Evapotranspiración y coeficiente de cultivo de la lechuga (BSS-13) en condiciones de organopónico. Ingeniería Agrícola 5(2): 10-15.
- DE GRAZIA, J; TITTONELL, P; CHIESA, A. 2001. Efecto de la época de siembra, radiación y nutrición nitrogenada sobre el patrón de crecimiento y el rendimiento del cultivo de lechuga (*Lactuca sativa L.*). (16)3:1-11.
- DI LORENZO, R; PISCIOTTA, A; SANTAMARIA, P; SCARIOT, V. 2013. From soil to soil-less in horticulture: Quality and typicity. Italian Journal of Agronomy 8(30): 255-260.
- FAGERIA, NK. 2009. The use of nutrients in crop plants. 1 ed. Florida, United States of America, CRC Press, 448.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1982. Estadística agrícola: estimación de las superficies y de los rendimientos de los cultivos. FAO. Roma, Italia, 282 p.
- FERNÁNDEZ, JA; BAÑÓN, S; GONZÁLEZ, A; LÓPEZ, J; FONTECHA, A; SALMERÓN, A. 2002. Efectos del uso de plásticos fotoselectivos sobre el desarrollo y la productividad del tomate en invernadero. Agricultura: Revista agropecuaria 2002: 890-893.

- GARCÍA, M. 2007. Refrigeración de invernadero: Influencia sobre la bioproductividad y la eficiencia en el uso del agua en un cultivo de tomate en sustrato sometido a distintos niveles de salinidad. Tesis doctoral. Universidad de Almería. 291p.
- GHAMARNIA, H; JAFARIZADE, M; MERI, E; GOBADEI, MA. 2013. Lysimetric Determination of Coriandrum sativum L. Water Requirement and Single and Dual Crop Coefficients in a Semiarid Climate. Journal of irrigation and drainage engineering © asce: 447-455.
- HAMDANI, SAF; AON, M; ALI, L; ASLAM, Z; KHALID, M; NAVEED, M. 2017. Application of Dalbergia sissoo biochar enhanced wheat growth, yield and nutrient recovery under reduced fertilizer doses in calcareous soil. Pakistan Journal of Agricultural Sciences 54(1): 107-115. HERNÁNDEZ, J; BACA, G; ACEVES, L; SÁNCHEZ, P; TIRADO, J, SAHAGÚN, J; COLINAS DE LEÓN, M. 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. Rev, Scielo. (31)4
- HUNT, R. 2017. Growth analysis, individual plants. Encyclopedia of Applied Plant Sciences 2: 421-429.
- HUNT, R; CAUSTON, DR; SHIPLEY, B; ASKEW, AP. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. Annals of Botany 90(4): 485-488.
- ILLIASSOU, N. 2015. Evaluación del uso y productividad del agua de la comunidad de Regantes Río Adaja. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. Universidad Politécnica de Madrid. 184 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE APRENDIZAJE (INA). 2005. Caracterización físicoquímica de diez sustratos utilizados en cultivo sin suelo. 43 p.
- JAMALI, MM. 2013. Investigate the effect of drought stress and different amount of chemical fertilizers on some physiological characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) International journal of farming and allied sciences 2(3): 872-879.

- KAFKAFI U; TARCHITZKY, J. 2011. Fertigation: a tool for efficient fertilizer and water management. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, Francia. 125 p.
- KUMAR, A; SINGH, R; CHHILLAR, RK. 2008. Influence of omitting irrigation and nitrogen levels on growth, yield and water use efficiency of coriander (*Coriandrum sativum* L.). Acta Agronomica Hungarica 56(1): 69-74p.
- KUSLU. Y; DURSUN, A; SAHIN, U. 2008. Effect of deficit irrigation on curly lettuce qrown under semiarid conditions. Short communication, Spanish Journal of Agricultural Research. 6 (4): 714-719.
- LÓPEZ, J; DÍAZ, T; WATTS, C; RODRÍGUEZ, JC; CASTELLANOS, AE; PARTIDA, L; VELÁZQUEZ, T DE J. 2015. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. Terra Latinoamericana 33(3): 209-219.
- LORENZO, P; SÁNCHEZ, M; MEDRANO, E; GARCÍA, M; CAPARRÓS, I; GIMÉNEZ, M. 2003. El sombreado móvil exterior: efecto sobre el clima del invernadero, la producción y la eficiencia en el uso del agua y la radiación. En: Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Fernández, M.; Lorenzo, P.; Cuadrado, I.M. (eds.). D.G.I.F.A. de la Junta de Andalucía, Hortimed, F.I.A.P.A. y CAJAMAR. Almería. 207-229p.
- MÁQUEZ, C; ROBLEDO, V; BENAVIDES, A; VÁSQUEZ, M; DE LA CRUZ, E; ESTRADA, A; LÓPEZ, S. 2014. Uso de mallas sobra: una alternativa para la producción de tomate cherry. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 1(2): 175-180.
- MARÍN, F. 2010. Cuantificación y valoración de estructuras y procesos de producción agrícola bajo ambientes protegidos en Costa Rica 2008 2009. PRONAP FITTACORI. San José, Costa Rica. 34 p.

- MEJIA DE TAFUR, MS; MENJIVAR FLORES, JC; MARIN PIMENTEL, GE. 2014. Respuesta fisiológica de cilantro (*Coriandrum sativum* L.) a la disponibilidad de agua en el suelo. Facultad de ciencias Agropecuarias 63(2): 1-7.
- MONTERO, J; TEITIL, M; ESTEBAN, B. 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for mediterranean climate areas. FAO. Roma, Italia. 640 p.
- MUNNS, R. Y M. TESTER. 2008 Mechanism of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. (59): 651–81.
- MUÑOZ, P; ANTON, A; PARANJPE, A; ARIÑO, J; MONTER, J. 2008. High decrease in nitrate leaching by lower N input without reducing greenhouse tomato yield. Europe Journal Agronomy 28, 489-495p.
- OLIVEIRA, A; PAIVA SOBRINHO, S; BARBOSA, J; RAMALHO, C; OLIVEIRA, A. 2003. Rendimento de coentro cultivado com doses crescentes de N. Horticultura Brasileira. 21(1): 81-83.
- ONIYESOM, I. OKOH, P. 2006. Quantitative analysis of nitrate and nitrite contents in vegetables commonly consumed in delta state, Nigeria. British Journal of Nutrition 96(5): 902-905.
- OREN-SHAMIR, M., GUSSAKOVSKY, E.E., SHPIEGEL, E., NISSIM-LEVI, A., RATNER, K., OVADIA, R., GILLER, Y.E., SHAHAK, Y. 2001. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of Pittosporum variegatum J. Hort. Sci. Biotechnol. 76:353–361.
- ORSINI, F; MARCHETTI, F; MICHELON, N; PROSDOCIMI, G. 2012. Simplified soilless systems for urban vegetable production. Horticity S.r.I . Bologna, Italia. 38 p.
- PESSARAKLI, M. 1999. Handbook of plant and crop stress. 2 ed. Nueva York, Estados Unidos, Marcel Dekker, Inc. 1188 p.

- PONCE, P; MOLINA, A; CEPEDA, P; LUGO, E; MAC CLEERY, B. 2014. Greenhouse design and control. CRC Press, Taylor & Francis group. London, Reino Unido. 354 p.
- QUINTERO, G. 2015. Efecto de dos condiciones de protección de cultivo sobre los índices de crecimiento y producción de tres variedades de lechuga (Lactuca sativa) tipo gourmet en la Sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. 86p.
- RASHED, NM; DARWESH, RK. 2015. A comparative study on the effect of microclimate on planting date and water requirements under different nitrogen sources on coriander (*Coriandrum sativum* L.) (En 231234235ver239 para fertilizantes). Annals of Agricultural Sciences 60(2): 227-243.
- RAVIV, M; LIETH, J. 2008. Soilless culture. Theory and practice. Massachusetts, United States, Elsevier. 625 p.
- RETANA, M. 2015. Determinación de los requerimientos nutricionales para el mejoramiento de la fertilización en etapa de almácigo de 12 especies hortícolas. Tesis Lic. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. 67 p.
- RUIZ, J. 2012. Evaluación de cepas de (*Azospirillum* sp.) y mallas sombra de colores sobre la morfología y bioquímica de la lechuga. Tesis Lic. Cohahuila, México. Universidad Autónoma Agriaria Antonio Narro. 145p.
- RUIZ, J. 2012. Evaluación de cepas de (Azospirillum sp.) y mallas sombra de colores sobre la morfologia y bioquímica de la lechuga. Tesis maestria.
 Coahuila, México. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 145 p.
- SALVADOR, J; FOLONI, S; ANTONIO, C; FOLONI, JSS; ROSOLEM, CA; GARCIA, RA. 2006. Effect of liming and ammonium sulfate in cotton. Il-concentration of cations and anions in the soil solution and plant nutrient uptake. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 30 (3): 433-442.

- SAMARAKOON, U; WEERASINGHE, P; WEERAKKODY, W. 2006. Effect of electrical conductivity (ec) of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary sulture. Tropical Agricultural Research 18:13-21.
- SÁNCHEZ, M; RAMIREZ, F; LORENZO, P; MEDRANO, E; PÉREZ,J; BAEZA,J; GÁZQUEZ, J; LÓPEZ,J; MONTERO,J. 2010. Manejo del clima en el Mediterráneo. Instituto de formación agraria y pesquera (IFAPA). 131p.
- SANTOS, B; OBREGÓN, H. 2010. Producción de hortalizas en ambientes protegidos: estructuras para la agricultura protegida.(En linea). In University of Florida, IFAS Extension. Consultado 20 jun. 2017. Disponible en: http://gcrec.ifas.ufl.edu/static/docs/pdf/PAInet/spanish/Estructuras-protegidas.pdf.
- SANTOS, F; LOBATO, R; SILVA, D; SCHIMIDT, C; OLIVEIRA, N. 2009. Growth of Lettuce (Lactuca Sativa L.)In Protected Cultivation and Open Field.

 Journal of Applied Sciences Research. 5(5):529 53p.
- SANTOS-RUFO, C; LORITE-TORRES, I; RICHARD, A. 2008. La evapotranspiración: concepto y métodos para su determinación. Mejora de la gestión de los recursos hídricos por medio de la integración de técnicas de teledección y modelos de simulación 2008: 1-8.
- SEDANO, G; GONZÁLEZ, V; ENGLEMAN, M; VILLANUEVA-VERDUZCO, C.2005. Dinámica del crecimiento y eficiencia fisiológica de la planta de calabacita REVISTA CHAPINGO SERIE HORTICULTURA. (11) 2: 291-297.
- SHANNON, MC; GRIEVE, CM. 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. Scientia Horticulturae 78(1-4): 5-38.
- SHANY, M. 2004. Producción de hortalizas en condiciones tecnificadas. IICA. Managua, Nicaragua. 65 p.

- SILVA, V DE P DA; TAVARES, AL; SOUSA, IF. 2013. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. Horticultura Brasileira 31(2): 255-259.
- SMITH, R. 2009. The blue baby syndromes. American Scientist. 97(2): 94-96p.
- SNOWDEN, MC; COPE, KR; BUGBEE, B. 2016. Sensitivity of seven diverse species to blue and green light: Interactions with photon flux. PLOS ONE 11(10): 1-33.
- SOSA, E. 2006. Evaluación de diferentes sistemas de siembra del culantro coyote (*Eryngium foetidum L.*). Proyecto de Graduación Lic. Ing. Agr. Guácimo, CR, Universidad EARTH. 41 p.
- SOTO, F. 2015. Mejoramiento de la eficiencia de uso del agua y los nutrientes minerales en producción hidropónica familiar. Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 1 16 p.
- SOTO, F. 2015. Mejoramiento de la eficiencia de uso del agua y los nutrientes minerales en producción hidropónica familiar. Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 1 16 p.
- STEWART, W. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. Informaciones Agronomicas. 67: 7.
- TAIZ, L; ZIEGER, E. 2002. Plant Physiology. 3 ed. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts, United States. 674 p.
- THOMPSON, A. 2010. Controlled atmosphere storage of fruits & vegetables. 2 ed. CAB International. Preston, Reino Unido. 289 p.
- TREFTZ, C; KRATSCH, H; OMAYE, S. 2015 "Hydroponics: a brief guide to growing food without soil". University of Nevada cooperative extension. 4 p.
- URQUIAGA, S; ZAPATA, F. 2000. Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe. ARCAL-EMBRAPA. Porto Alegre. Río Grande. Brasil.

- VALLEJO, F. Y ESTRADA, E. 2004. El cultivo de hortalizas de clima cálido. Palmira. Universidad Nacional de Colombia. 346 p.
- VALVERDE,K; CHANG, M; RODRIGUEA, A. 2010. Efecto de la calidad de luz sobre la actividad de la nitrato reductasa en plantas de lechuga cultivadas hidropónicamente. Red Hidroponía, Lima, Perú. (54) 8-12p
- VILLALOBOS, A. 2012. Precios y oferta para el culantro castilla (Coriandrum sativum L.) entre los principales mercados mayoristas de Costa Rica y Panamá. Tecnología en Marcha. (25)1:32-43.
- VELAZCO, K; NOGUERA, N; JIMENEZ, L; LARREAL, M; ETTIENE, G. 2009. Evaluación de nitratos y nitritos lixiviados en un sistema de pastoreo intensivo usando fertilizantes nitrogenados. 23-28p.
- WALKER, RL; BURNS, IG; MOORBY, J. 2001. Responses of plant growth rate to nitrogen supply: a comparison of relative addition and N interruption treatments. Journal of Experimental Botany 52(355): 309-317.

Anexos

Anexo 1. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz del almácigo del cultivo lechuga (*Lactuca sativa* L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: **57412**

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

CORREO daniheca@hotmail.es / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

ANÁLISIS: QC,B,S

PROVINCIA: ALAJUELA FECHA RECEPCIÓN: 15/03/2016

CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 17/03/2016

LOCALIDAD FERM Nº DE MUESTRAS TOTAL 2

LOCALIDAD EEFBM N° DE MUESTRAS TOTAL 2 CULTIVO: LECHUGA PÁGINA: 1/1

											., .			
ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR														
		%¹							mg/kg					
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В		
RAIZ	P-16-01834	0,77	0,31	0,50	0,45	2,13	0,22	94	8	25	<8	15		
FOLIAR	P-16-01835	1,48	0,27	0,98	0,29	3,23	0,12	109	4	36	15	21		

Floria Bertsch H.
COORDINADORA

Mariel Álvarez B

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original frimado y setimprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Alt ance de Acredinación N3.1F-0.03 Acreditado a partir de: 12.96.2006 endete de vi. i como escare contrata encide

Alcance disponible on www.eca.or.cr

Anexo 2. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (Lactuca sativa L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES **REPORTE DE ENSAYO**

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: **57503**

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO

RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO **CORREO** daniheca@hotmail.es / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

PROVINCIA: FECHA RECEPCIÓN: ALAJUELA CANTÓN: ALAJUELA LOCALIDAD E.E.F.B



Laboratorio de ensess

Alicance de Acreditación NN LE 033 Acreditado a partir de 12 05 2006 In del destritosopo acomo Acces (Arredit

Alcance disposible en www.eca.or.cr

CULTIVO:	LECHUGA						PÁGIN	NA:	1/2			
	AN	ÁLIS	IS Q	UÍM	CO	FOL	IAR					
				9	%¹					mg/kg	9	
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В
SEM ANA 1- RAIZ - CA	P-16-01930	3,34	0,26	0,66	0,82	3,14	0,36	108	23	47	114	29
SEM ANA 1 - FOLLAJE - CA	P-16-01931	4,15	0,24	1,44	0,56	4,32	0,27	96	6	28	113	33
SEM ANA 1 - RAIZ - CB	P-16-01932	2,85	0,38	0,71	0,75	1,70	0,38	248	22	40	127	23
SEM ANA 1 - FOLLAJE - CB	P-16-01933	3,62	0,32	1,53	0,63	3,91	0,26	189	5	25	101	23
SEM ANA 1 - RAIZ - SB	P-16-01934	2,54	0,29	0,59	0,65	1,79	0,29	124	11	33	87	20
SEM ANA 1 - FOLLAJE - SB	P-16-01935	3,71	0,32	1,78	0,62	3,99	0,31	123	7	341	99	26
SEM ANA 1 - RAIZ - SA	P-16-01936	3,53	0,33	0,79	0,78	3,15	0,31	153	25	50	123	24
SEM ANA 1 - FOLLAJE - SA	P-16-01937	4,45	0,33	1,93	0,65	4,94	0,30	128	7	39	124	37
SEM ANA 2 - RAIZ - CA	P-16-01938	4,51	0,70	0,91	0,50	5,82	0,46	335	36	61	384	37
SEM ANA 2 - FOLLAJE - CA	P-16-01939	4,85	0,53	1,44	0,54	6,35	0,27	177	9	30	146	43
SEM ANA 2 - RAIZ - CB	P-16-01940	3,73	0,46	0,75	0,62	2,81	0,43	509	24	37	289	25
SEM ANA 2 - FOLLAJE - CB	P-16-01941	4,48	0,48	1,58	0,75	5,01	0,28	179	7	19	148	25
SEM ANA 2 - RAIZ - SB	P-16-01942	3,82	0,42	0,83	0,64	3,52	0,35	345	25	36	154	25
SEM ANA 2 - FOLLAJE - SB	P-16-01943	4,85	0,49	2,02	0,72	5,66	0,33	157	9	24	144	31
SEM ANA 2 - RAIZ - SA	P-16-01944	4,62	0,71	1,05	0,45	5,77	0,39	372	32	68	352	32

BriaBerlse Floria Bertsch H. COORDINADORA

Mariel Álvarez B. N.I. 2835

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Tespay o válido es el original firmado y setímpime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Anexo 3. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (*Lactuca sativa* L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: **57584**

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO

RESPONSABLE: GUSTAVO RODRIGUEZ

CORREO daniheca@hotmail.es / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

PROVINCIA: ALAJUELA ANÁLISIS: QC,B,S FECHA RECEPCIÓN: 05/04/2016 CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 15/04/2016

CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 15
LOCALIDAD EEFBM Nº DE MUESTRAS TOTAL 8
CULTIVO: LECHUGA PÁGINA: 1/

	ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR											
				9	61	mg/kg						
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В
LECHUGA - HOJA - SEM.4 - SA	P-16-01988	5,59	0,56	1,68	0,55	7,28	0,28	244	11	32	163	69
LECHUGA - HOJA - SEM.4 - SB	P-16-01989	4,95	0,52	1,70	0,63	5,75	0,28	221	8	19	168	30
LECHUGA - HOJA - SEM.4 - CA	P-16-01990	5,83	0,55	1,26	0,45	7,17	0,24	209	9	29	144	44
LECHUGA - HOJA - SEM.4 - CB	P-16-01991	5,16	0,53	1,48	0,65	5,80	0,26	229	7	17	162	25
LECHUGA - RAIZ - SEM.4 - SA	P-16-01992	4,64	0,93	1,25	0,29	5,78	0,46	882	43	180	324	38
LECHUGA - RAIZ - SEM.4 - SB	P-16-01993	3,75	0,45	0,82	0,40	3,70	0,38	638	23	37	233	26
LECHUGA - RAIZ - SEM.4 - CA	P-16-01994	4,28	0,83	1,11	0,33	6,45	0,48	955	38	56	371	38
LECHUGA - RAIZ - SEM .4 - CB	P-16-01995	3,78	0,44	0,71	0,49	2,78	0,43	707	24	31	262	26

Floria Bertsch H.
COORDINADORA

Mariel Álvarez B. N.I. 2835

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometria de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el enví o del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Alcance de Adreditación Nº. LE 033 Acreditado a partir de: 12,86,2006

Alcance disposible en www.eca.cr.cr

Anexo 4. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (*Lactuca sativa* L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



PROVINCIA:

CANTÓN:

CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

№ DE REPORTE: **57759**

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO

RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

CORREO gustavo.rodriguezocampo@gmail.com / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

ANÁLISIS: QC,B,S
ALAJUELA FECHA RECEPCIÓN: 19/04/2016
ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 28/04/2016

LOCALIDAD E.E.F.B Nº DE MUESTRAS TOTAL 8 CULTIVO: LECHUGAS PÁGINA: 1/1

	AN	ÁLIS	IS Q	UÍMI	ICO I	FOLI	AR					
				9	6 ¹		1	mg/kg	g			
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В
CA - SEM. 4 - FOLLAJE	P-16-02310	5,43	0,66	1,21	0,44	8,74	0,23	276	10	36	155	53
CA - SEM . 4 - RAIZ	P-16-02311	3,92	0,85	1,03	0,28	5,67	0,47	988	46	54	307	42
CB - SEM. 4 - FOLLAJE	P-16-02312	4,64	0,60	1,29	0,53	6,64	0,22	335	8	22	150	28
CB - SEM . 4 - RAIZ	P-16-02313	3,12	0,52	0,90	0,37	3,01	0,33	1896	27	33	251	29
SA - SEM. 4 - FOLLAJE	P-16-02314	5,35	0,60	1,23	0,42	7,57	0,23	237	10	36	127	56
SA - SEM. 4 - RAIZ	P-16-02315	3,93	0,78	0,96	0,28	5,67	0,51	1750	44	49	267	36
SB - SEM . 4 - FOLLAJE	P-16-02316	4,51	0,64	1,66	0,61	7,35	0,28	315	9	23	170	40
SB - SEM . 4 - RAIZ	P-16-02317	3,44	0,59	1,23	0,42	3,94	0,43	1787	33	56	277	36

Horia Berlset Floria Bertsch H. COORDINADORA

Mariel Álvarez B. N.I. 2835

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO3 y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Alcance de Acreditarión Nº. 154001 Apredicado a partir de: 12,56,2006 arrando en 1, parace aconstitución a nota

Alcance disponible on www.eca.or.cr

Anexo 5. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo lechuga (*Lactuca sativa* L.) hidropónica durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: 57884

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

CORREO gustavo.rodriguezocampo@gmail.com / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

PROVINCIA: ALAJUELA FECHA RECEPCIÓN: 28/04/2016
CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 06/05/2016

LOCALIDAD E.E.F.B N $^{\circ}$ DE MUESTRAS TOTAL 8 CULTIVO: LECHUGA PÁGINA: 1/

	AN	ÁLIS	IS Q	UÍMI	CO	FOL	AR					
				9,	6 ¹	mg/kg						
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В
RAIZ SA - SEMANA 5	P-16-02416	4,28	1,05	1,27	0,32	6,29	0,62	1188	65	73	345	106
FOLLAJE SA - SEMANA 5	P-16-02417	5,48	0,61	1,61	0,50	8,26	0,25	298	10	37	186	83
RAIZ SB- SEMANA 5	P-16-02418	3,61	0,57	0,84	0,35	3,97	0,44	443	22	28	97	78
FOLLAJE SB - SEM ANA 5	P-16-02419	4,68	0,57	1,42	0,49	6,68	0,24	417	7	19	137	39
RAIZ CA- SEMANA 5	P-16-02420	3,83	0,86	1,00	0,37	6,94	0,72	831	44	41	263	91
FOLLAJE CA - SEM ANA 5	P-16-02421	5,65	0,71	1,60	0,49	8,50	0,27	557	10	36	239	74
RAIZ CB- SEMANA 5	P-16-02422	3,17	0,60	1,10	0,43	3,38	0,43	1236	26	32	201	68
FOLLAJE CB - SEMANA 5	P-16-02423	4,77	0,64	1,50	0,58	7,07	0,25	371	8	23	173	50

For a Bertsch H.
COORDINADORA

Marianela Blanco M. N.I. 2468

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original frimado y selmmenta es dicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Alcance de Adreditación Nº. LE 033 Acreditado a partir de: 12.06.2006

Alcance disposible en www.eca.cr.cr

Anexo 6. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (Coriandrum sativum L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES **REPORTE DE ENSAYO**

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: 58806

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO

RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

CORREO gustavo.rodriguezocampo@gmail.com / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

> ANÁLISIS: QC,B,S FECHA RECEPCIÓN: 07/07/2016 ALAJUELA

PROVINCIA: CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 15/07/2016

LOCALIDAD E.E.F.B Nº DE MUESTRAS TOTAL 8 CULTIVO: **CULANTRO CASTILLA** PÁGINA:

	ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR													
		%1							mg/kg					
ID USUARIO	ID LAB	N	Р	Ca	Mg	K	s	Fe	Cu	Zn	Mn	В		
FOLLAJE ALMACIGO	P-16-04874	*	0,77	0,60	0,37	8,89	0,38	139	10	74	70	29		
RAIZ ALMACIGO	P-16-04875	*	0,76	0,60	0,48	5,13	0,24	297	18	73	422	22		
SA - RAIZ - SEM.1	P-16-04876	*	0,77	0,62	0,53	5,98	0,32	225	40	184	1133	36		
SB - RAIZ - SEM.1	P-16-04877	*	0,62	0,63	0,60	5,45	0,30	254	21	109	729	106		
CA - RAIZ - SEM.1	P-16-04878	*	0,63	0,63	0,53	5,22	0,28	259	42	140	931	29		
CB - RAIZ - SEM.1	P-16-04879	*	0,57	0,66	0,60	5,04	0,28	277	21	87	681	27		
SB - FOLLAJE - SEM.5	P-16-04880	2,63	0,45	1,30	0,32	6,30	0,21	184	5	34	189	30		
CB - FOLLAJE - SEM.5	P-16-04881	2,44	0,39	1,23	0,28	6,61	0,19	169	5	19	133	31		

OBSERVACIÓN: * MUESTRA INSUFICIENTE PARA REALIZAR EL ANÁLISIS DE NITRÓGENO.

Floria Bertsch H. COORDINADORA Marianela Blanco M. N.I. 2468

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Laboratorio de ensayo

Alcance de Acreditación Nº LE 033 Acreditado a partir de: 12-16-2006

A cance disponible en www.eca.or.cr

Anexo 7. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (*Coriandrum sativum* L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



RAIZ SEM.2 - CB

FOLLAJE SEM.3 - SA

FOLLAJE SEM.3 - SB

FOLLAJE SEM.3 - CA

CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

Nº DE REPORTE: 58563

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

SUBCLIENTE TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

CORREO gustavo.rodriguezocampo@gmail.com / FREDDY.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr

PROVINCIA: ALAJUELA FECHA RECEPCIÓN: 16/06/2016
CANTÓN: ALAJUELA EMISIÓN DE REPORTE 24/06/2016

	Nº DE MUESTRAS TOTAL 28													
CULTIVO: CUL	ANTRO CASTIL	.LA					PÁGI	NA:			1/2			
		٩NÁ۱	LISIS	QU	ÍМІС	0 F	OLIA	R						
			%¹							ı	mg/k	g		
ID USUARIO	ID LAB	N*	P*	Ca*	Mg*	K*	S*	Na**	Fe*	Cu*	Zn*	Mn*	В*	Al**
FOLLAJE SEM.1 - SA	P-16-04464	5,04	0,56	1,27	0,51	6,84	0,34	2408	157	14	48	132	59	98
FOLLAJE SEM.1 - SB	P-16-04465	4,64	0,54	1,15	0,46	7,42	0,33	3080	155	10	41	98	38	109
FOLLAJE SEM.1 - CB	P-16-04466	4,35	0,44	1,01	0,41	6,27	0,27	2417	136	8	32	75	31	91
FOLLAJE SEM.1 - CA	P-16-04467	4,58	0,47	1,08	0,46	6,29	0,29	1916	131	12	39	102	54	82
FOLLAJE SEM.2 - SA	P-16-04468	5,25	0,56	1,17	0,39	6,81	0,31	1191	123	14	41	150	69	67
FOLLAJE SEM.2 - SB	P-16-04469	4,26	0,35	0,98	0,33	5,67	0,26	1363	100	8	21	74	33	64
FOLLAJE SEM.2 - CA	P-16-04470	4,92	0,43	1,07	0,41	6,18	0,28	1340	108	13	32	106	61	62
FOLLAJE SEM.2 - CB	P-16-04471	4,35	0,33	0,97	0,33	5,33	0,25	1141	113	8	20	75	33	55
RAIZ SEM.2 - SA	P-16-04472	4,46	0,82	0,90	0,56	5,19	0,29	3413	318	52	149	1719	33	168
RAIZ SEM.2 - SB	P-16-04473	4,06	0,53	0,79	0,77	5,45	0,28	5084	278	23	65	1120	26	161
RAIZ SEM.2 - CA	P-16-04474	4,29	0,68	0,90	0,54	4,81	0,27	3832	331	59	128	1551	30	195

OBSERVACIÓN: *ENSAYO ACREDITADO, ver alcance en www.eca.or.cr **ENSAYO NO ACREDITADO MUESTRAS SECAS.

0,40

0,33

0,41

0,69

0,81

0,93

0,75

0.67

0,24

0,27

0,25

Floria Bertsch H. COORDINADORA

4,04

3,90

3,12

3,64

P-16-04475

P-16-04476

P-16-04477

P-16-04478

Marianela Blanco M. N.I. 2468

0,22

0,23

0,19

0,24

4,67

5,99

5,12

6,04

5353 289

660

941

627

108

220

135

25 58

9 38

6 60

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO3 y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo válido es el original fírmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Alcance de Acreditación Nº, 18 083 Acreditado a porty del 15.06.3006

Alcance disportible on www.eca.cr.cr

32

27

39

856

95

84 27

83

163

53

67

52

Anexo 8. Resultado de los análisis químicos foliar y de raíz en el ciclo de cultivo culantro castilla (Coriandrum sativum L.) hidropónico durante la época de verano, Alajuela, Costa Rica en el año 2016.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES **REPORTE DE ENSAYO**

SC12-LSF-I01-R01 (v9)

N° DE REPORTE: **59225**

USUARIO: FREDDY SOTO BRAVO

TESIS DANIELA HERNANDEZ CASTRO SUBCLIENTE RESPONSABLE: DANIELA HERNANDEZ CASTRO

gustavo.rodriguezocampo@gmail.com / FREDD **CORREO**

PROVINCIA: ALAJUELA ALAJUELA CANTÓN:

LOCALIDAD **EEFBM** Nº DE MUESTRAS TOTAL 6 CULANTRO CASTILLA CULTIVO: PÁGINA:



Alcance de Acredinación N3.1F-033 Acreditado apartir de: 12.96.2006 asindar de vi. i caracteración sobre con

Arcance disponible on www.eca.or.cr

Y.SOTOBRAVO@ucr.ac.cr	
ANÁLISIS: FECHA RECEPCIÓN: EMISIÓN DE REPORTE	

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR													
				9	61		r	ng/k	g				
ID USUARIO	ID LAB	N											
CC - S5 - CA - FOLLAJE	P-16-06098	3,87	0,51	0,87	0,25	7,57	0,26	182	8	31	116	30	
CC - S5 - SA - FOLLAJE	P-16-06099	3,47	0,52	0,96	0,25	6,97	0,27	192	7	28	132	31	
CC - S5 - CA - RAIZ	P-16-06100	3,00	0,50	1,16	0,96	4,17	0,24	798	26	90	1389	33	
CC - S5 - SA - RAIZ	P-16-06101	3,21	0,58	1,27	1,10	4,46	0,27	1512	31	89	1404	33	
CC - S5 - CB - RAIZ	P-16-06102	2,30	0,34	1,10	1,30	2,47	0,17	993	15	67	1085	25	
CC - S5 - SB - RAIZ	P-16-06103	2,04	0,41	1,38	1,56	3,14	0,18	1151	14	48	1380	29	

Floria Bertsch H. COORDINADORA Marianela Blanco M. N.I. 2468

1. Las unidades están expresadas en base seca, en m/m. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al SC09-LSF-P06; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al SC09-LSF-P10. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensay adas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensay o válido es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.