

Artigo Científico

## Culantro coyote (*Eryngium foetidum*) hidropónico con riego por goteo y bajo protección: caracterización del sistema y absorción de nutrientes

### Resumen

En el 2016, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica, se realizó un estudio con el objetivo de caracterizar el sistema de producción de culantro coyote en hidroponía bajo protección y cuantificar la absorción de nutrientes por unidad de superficie ( $N_{ab}$ :  $g\ m^{-2}$ ) y como concentración de absorción ( $C_{ab}$ :  $mg\ L^{-1}$ ). El cultivo ( $60\ m^2$ ) incluyó dos etapas de producción consecutivas: 1- en verano protegido con sarán 30% sombra y 2- en invierno protegido con techo plástico. Se cosecharon 15 plantas cada 10 días, con cinco repeticiones/muestreo (50 plantas), a las cuales se les cuantificó biomasa fresca, índice de área foliar (IAF) y longitud de hoja. Para caracterizar el sistema de cultivo se midió radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa, temperatura y grados día (GD) en clima; humedad volumétrica y temperatura en sustrato; y conductividad eléctrica (CE) y pH en drenaje. La  $N_{ab}$  se obtuvo a partir de la materia seca y su concentración de nutrientes; la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) por balance de agua en lisímetro; y la  $C_{ab}$  como el cociente entre  $N_{ab}$  y la  $ET_c$ . Adicionalmente, se realizó un análisis de regresión de la  $N_{ab}$  según GD acumulados. El cultivo bajo protección en invierno y en verano, mostró un elevado potencial de rendimiento, donde el orden de absorción fue  $K > N > P > Ca > S > Mg > Fe > Mn > B > Zn > Cu$ , con un incremento máximo (%) a los 40 DDT; cuando acumuló 625 GD en verano y 608 GD en invierno. El comportamiento de  $N_{ab}$  por unidad de superficie fue consecuente con el patrón mostrado por la  $C_{ab}$ . Para todos los nutrientes, los modelos polinómicos mostraron suficiente potencial ( $R^2 > 0,96$ ) para estimar con precisión la absorción de nutrientes en función de los GD acumulados según el clima.

**Palabras clave:** acumulación de nutrientes, tasa de absorción, extracción de nutrientes, curvas de absorción, culantro espinoso.

### Hydroponic wild coriander (*Eryngium foetidum*) with drip irrigation and under protection: system characterization and nutrient absorption

#### Abstract

In the Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experimental Station, Alajuela, Costa Rica, in 2016, a study was conducted with the objective of characterize the coyote coriander production system in hydroponics and quantify the absorption of nutrients per unit area ( $N_{ab}$ :  $g\ m^{-2}$ ) and as absorption concentration ( $C_{ab}$ :  $mg\ L^{-1}$ ). The crop ( $60\ m^2$ ) included two consecutive production cycles: 1) in summer protected with saran and 2) in winter protected with plastic. 15 plants were harvested every 10 days, with five repetitions/sampling (50 plants), to which fresh biomass, leaf area index (IAF) and leaf length were quantified. To characterize the cultivation system, the solar radiation, wind speed, relative humidity, temperature and day degrees (GD) were measured in climate; volumetric moisture and temperature in the substrate; and electrical conductivity (EC) and pH in drain.  $N_{ab}$  was obtained from dry matter and its concentration of nutrients; crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) by water balance in lysimeter; and the  $C_{ab}$  as the ratio  $N_{ab}$  and  $ET_c$ . Additionally, a regression analysis between the accumulated  $N_{ab}$  and GD was conducted. The crop under protection in winter and summer, showed a high yield potential, where the order of absorption was  $K > N > P > Ca > S > Mg > Fe > Mn > B > Zn > Cu$ , with a maximum increase (%) at 40 DDT; when it accumulated 625 GD in summer and 608 GD in winter. For all nutrients, the polynomial models showed sufficient potential ( $R^2 > 0.96$ ) to accurately estimate nutrient absorption depending on GD accumulated according to climate.

**Keywords:** nutrient accumulation, absorption rate, nutrient extraction, absorption curves, spiny coriander.

Received at: 01/05/2019

Accepted for publication at: 30/07/2019

1 - PhD. Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Alajuela, Costa Rica. Email: freddysotobravo@ucr.ac.cr

## Chicória (*Eryngium foetidum*) hidropónica irrigada por gotejamento em cultivo protegido: caracterização do sistema e absorção de nutrientes

### Resumo

No ano de 2016, na Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica, Foi realizado um estudo com o objetivo de caracterizar o sistema de produção de chicória em hidroponia em cultivo protegido e quantificar a absorção de nutrientes por unidade de área ( $N_{ab}$ :  $g\ m^{-2}$ ) e como concentração de absorção ( $C_b$ :  $mg\ L^{-1}$ ). A cultura ( $60\ m^2$ ) incluiu duas etapas consecutivas de produção: 1- no verão protegido com tela de sombreamento 30% de sombra e 2- no inverno protegido com teto de plástico. Foram colhidas 15 plantas a cada 10 dias, com cinco repetições / amostragem (50 plantas), quantificadas biomassa fresca, índice de área foliar (IAF) e comprimento foliar. Para caracterizar o sistema de cultura, mediram-se radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura e graus diurnos (GD) no clima; umidade volumétrica e temperatura do substrato; e condutividade elétrica (CE) e pH da drenagem. O  $N_{ab}$  foi obtido da matéria seca e sua concentração de nutrientes; evapotranspiração das culturas ( $ET_c$ ) pelo balanço hídrico em lisímetro; e  $C_{ab}$  como quociente entre  $N_{ab}$  e  $ET_c$ . Além disso, foi realizada uma análise de regressão do  $N_{ab}$  de acordo com o GD acumulado. As culturas sob proteção no inverno e no verão apresentaram alto potencial produtivo, onde a ordem de absorção foi  $K > N > P > Ca > S > Mg > Fe > Mn > B > Zn > Cu$ , com aumento máximo (%) aos 40 DDT, quando acumulou 625 GD no verão e 608 GD no inverno. O comportamento de  $N_{ab}$  por unidade de área foi consistente com o padrão mostrado por  $C_{ab}$ . Para todos os nutrientes, os modelos polinomiais mostraram potencial suficiente ( $R^2 > 0,96$ ) para estimar com precisão a absorção de nutrientes com base nos GDs acumulados de acordo com o clima.

**Palavras-chave:** acúmulo de nutrientes, taxa de absorção, extração de nutrientes, curvas de absorção, chicória.

### Introducción

*Eryngium foetidum* L. (Umbelliferae–Apiaceae), conocida como culantro mexicano, culantro coyote, culantro silvestre y culantro espinoso, entre otros, ha sido tradicionalmente utilizada como especia, con fines medicinales y culinarios. Es originaria del trópico de América, entre Panamá, México, el archipiélago del Caribe y las Indias Occidentales (SANTOS, 2001). Actualmente, se cultiva en todos los continentes, incluyendo Puerto Rico, República Dominicana, Cuba, islas de las Antillas, América Central, México, Brasil, Tailandia, Vietnam, Bangladesh y la India (MORALES et al., 2013). En Costa Rica, principal exportador en América Central, se cultiva para exportación desde 1990, cuya demanda muestra una tendencia creciente en Estados Unidos y en Canadá (EUNICE, 2006; CERDAS y MONTERO, 2016). Dicha actividad exportadora beneficia cerca de 200 familias de agricultores de Limón y Cartago, con un valor anual estimado en \$5,1 millones (LAVAGNI y RODRÍGUEZ, 2009).

El sistema de cultivo actual se realiza en suelo a campo abierto, donde ha presentado problemas de inocuidad, fitosanitarios y ambientales, debido al uso de prácticas de cultivo que afectan los rendimientos y

que han puesto en riesgo la rentabilidad y estabilidad del mercado en Estados Unidos. Entre dichas prácticas están la selección y tratamiento de semilla, la siembra al voleo y el uso intensivo de agroquímicos para el control de enfermedades y moluscos (babosas y caracoles), entre otros. Como consecuencia, los rendimientos son bajos, con un promedio de 4 a 5 rollos (200 g) por  $m^2$  ( $40\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ), inferior a los rendimientos reportados en Filipinas ( $80\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) y similares a los obtenidos en Puerto Rico ( $46\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) (MORALES et al., 2013). Además, es uno de los vegetales frescos con mayor cantidad de residuos agroquímicos, ya que supera el límite máximo establecido en Costa Rica (SFE, 2014).

Una alternativa al sistema de producción actual, es el sistema de producción hidropónica bajo protección. Es un sistema aislado del suelo, que reduce los efectos de climas extremos, mejora la eficiencia de uso de agua, de los fertilizantes y del espacio, reduce la incidencia de enfermedades y aumenta la calidad y los rendimientos (JARA, 2016).

En invierno, el uso de techos plásticos reduce el lavado de fertilizantes, la incidencia de plagas y enfermedades y consecuentemente el uso de pesticidas, lo que genera productos más sanos para el consumidor y menor contaminación ambiental

(ROJAS y PANIAGUA, 2015). En verano, el sombreado incrementa el rendimiento respecto al cultivo a pleno sol ya que las hojas de culantro son de mayor tamaño y de mejor calidad, en comparación al cultivo a pleno sol (ALVARADO et al., 1999). El uso de sárán rojo, presenta alta transmisividad de luz del espectro rojo entre 600-700 nm (OREN-SHAMIR et al., 2001), alta difusión de luz (SHAHAK et al., 2004), protege contra la radiación ultravioleta y evita la fotodegradación de los cloroplastos (LEITE, 2005) e incrementa la productividad en cultivos de hortalizas y ornamentales (SHAHAK et al., 2008).

Sin embargo, la principal limitación para implementar el cultivo hidropónico de culantro coyote bajo protección, es la poca información sobre el manejo de la nutrición en hidroponía. Únicamente, BERTSTH (2003), reporta un estudio de absorción de nutrientes en el cultivo convencional en suelo a campo abierto.

En el cultivo hidropónico la demanda nutricional es aportada como concentración de nutrientes ( $\text{mg L}^{-1}$ ), lo cual hace necesario determinar la concentración de absorción de nutrientes ( $\text{CAN: mg L}^{-1}$ ), que es el producto del cociente entre nutriente absorbido ( $\text{mg m}^{-2}$ ) y consumo de agua ( $\text{ETc: L m}^{-2}$ ), en un mismo intervalo de tiempo (SONNEVELD, 2000). Por ello, para adaptar las curvas de absorción de cultivos en suelo reportadas en  $\text{kg por área}$ , al cultivo en hidroponía, es necesario determinar la  $\text{ET}_c$ , sin embargo, en la mayoría de estudios de absorción esta no es reportada.

Asociado a lo anterior, las curvas de absorción habitualmente se presentan en función del tiempo cronológico (días), sin considerar las diferencias en la tasa de crecimiento del cultivo según el clima de la zona. Estudios realizados han demostrado una relación lineal entre la temperatura y la tasa de crecimiento y desarrollo fenológico del cultivo (SALAZAR-GUTIERREZ et al., 2013). Para expresar dicha relación, uno de los métodos más ampliamente utilizado es el de grados-día (GD), tiempo térmico, tiempo fisiológico, o unidades de calor (RUIZ-CORRAL et al., 2002; LÓPEZ et al., 2010). Los GD se definen como la cantidad de grados día necesarios, por encima de una temperatura base, para completar una fase de desarrollo fenológico (TRUDGILL et al., 2005), lo cual permitiría adaptar las curvas de absorción a diferentes agroecosistemas.

El objetivo de este estudio fue caracterizar el sistema de producción de culantro coyote en hidroponía con riego por goteo y bajo protección,

y cuantificar la absorción de nutrientes por unidad de superficie ( $\text{N}_{ab}$ :  $\text{g m}^{-2}$ ) y como concentración de absorción ( $\text{C}_{ab}$ :  $\text{mg L}^{-1}$ ), en función del tiempo fisiológico del cultivo.

## Materiales y métodos

El estudio fue realizado en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno (EEFBM), ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica ( $10^{\circ} 01' \text{ N}$  y  $84^{\circ} 16' \text{ O}$ , 840 msnm), caracterizada como una zona de vida de bosque húmedo premontano con un clima subhúmedo caliente y estación seca bien definida (HOLDRIDGE, 1982). Los valores promedio anual de temperatura, humedad relativa y precipitación son de  $22^{\circ}\text{C}$ , 78% y 1940 mm, respectivamente.

El estudio se realizó en un cultivo de culantro coyote en hidroponía con riego por goteo y bajo protección, que incluyó dos ciclos de producción consecutivos de 50 días cada uno. El primer ciclo fue en verano, donde el cultivo fue protegido con sárán 30% de sombra desde el trasplante hasta la primera cosecha. En el segundo ciclo, en invierno, el cultivo fue protegido con techo plástico ( $50 \mu\text{m}$ ) desde el primer corte hasta la segunda cosecha. Para la instalación de ambas coberturas de protección se utilizaron arcos de varillas de metal ( $12,5 \text{ mm}$ ) de 1,2 m de alto y 1,5 m de ancho, colocados sobre las camas de cultivo y espaciados cada m.

El área de cultivo hidropónico fue de  $60 \text{ m}^2$ , distribuidos en cinco bancales de madera de 12 m de largo, 1 m de ancho y 0,1 m de profundidad, colocados sobre una estructura de metal elevada a 0,8 m sobre la superficie del suelo. El contenedor se impermeabilizó con plástico negro ( $7 \mu\text{m}$ ), y para evacuar el exceso de agua se realizó un orificio de drenaje en un extremo del contenedor a una altura de un cm del fondo de la cama.

Se utilizó una variedad local manejada por los agricultores para exportación, que fue recolectada de diferentes fincas de la zona de producción de Tres Equis, Turrialba. La siembra se realizó por trasplante de plántulas de 60 días de edad con aproximadamente 7 hojas verdaderas. La densidad de siembra utilizada fue de  $7 \times 7 \text{ cm}$  ( $49 \text{ plantas m}^{-2}$ ).

Como sustrato se utilizó polvo de piedra, cuyos componentes de partículas sólidas, de aire y de agua se presentan en la Fig. 1, los cuales fueron determinados según la norma europea UNE-EN-13041 (2007), utilizando un equipo de caja de arena (Eikelkamp, mod. 08.01).

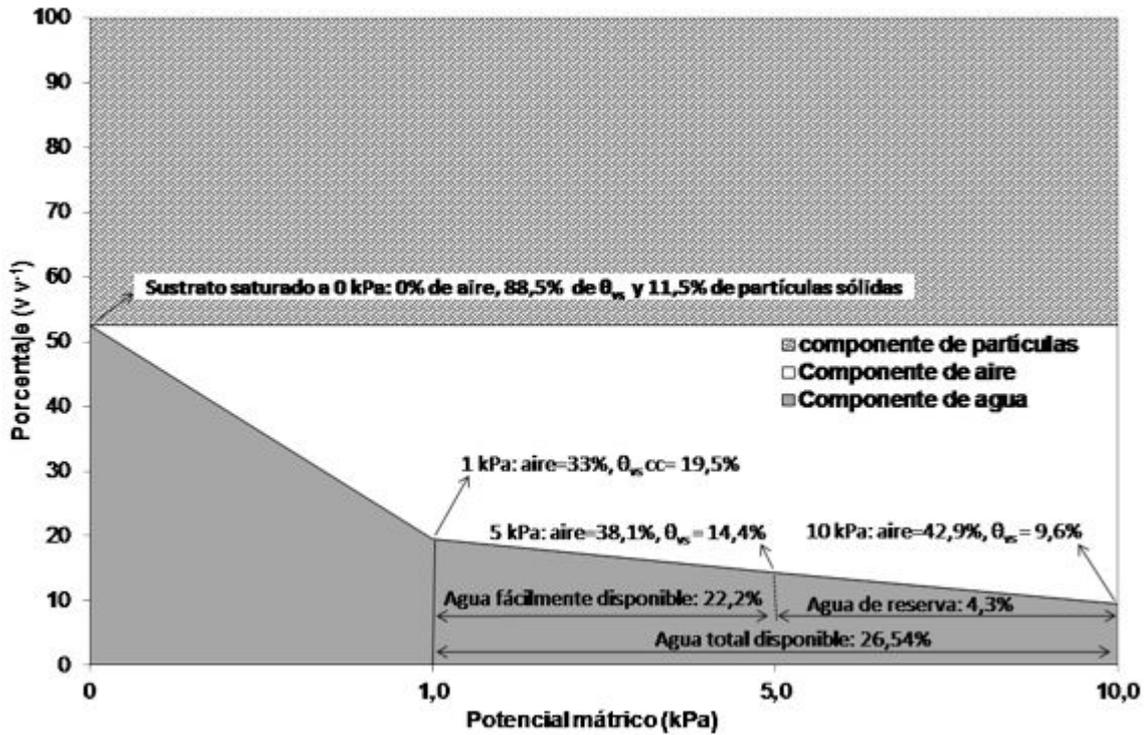


Figura 1. Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco.

Se utilizó un sistema de riego localizado, con cintas de goteo cada 20 cm ( $0,8 \text{ L h}^{-1}$ ), y separadas a 7 cm coincidentes con cada hilera de cultivo. La demanda hídrica del cultivo ( $\text{L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) fue estimada considerando i- un porcentaje de agotamiento (15%) del agua total disponible en el sustrato (Fig. 1), ii- el volumen de sustrato ( $\text{L m}^{-2}$ ) y iii- un porcentaje de drenaje preestablecido (+20%). Una vez determinado el requerimiento de agua ( $\text{L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), se calculó el tiempo de riego a partir del número de goteros por  $\text{m}^{-2}$  y del caudal promedio por gotero. Dicho requerimiento fue distribuido en riegos horarios cortos y frecuentes, mediante válvulas solenoides programables (Baccara Mod. G75-C). El volumen

de drenaje fue monitoreando diariamente con el fin de ajustar la frecuencia y el volumen de riego para obtener el porcentaje de drenaje establecido (+20%).

La concentración de nutrientes (Tabla 1), fue definida considerando los rangos habitualmente utilizados para la producción hidropónica de vegetales de hojas a nivel nacional. Para la preparación de la solución nutritiva se utilizaron sales fertilizantes hidrosolubles tales como el fosfato monopotásico, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, nitrato de calcio, cloruro de calcio, ácido nítrico, elementos menores (Fetrilón comb-1®), ácido bórico y quelatos de hierro y de manganeso (EDTA-Fe, EDTA-Mn).

Tabla 1. Concentración de nutrientes en la solución nutritiva utilizada en la nutrición del cultivo de culantro coyote.

Concentración ( $\text{mg L}^{-1}$ )										
N	P	K	Mg	S	Ca	Fe	Cu	Mn	Zn	B
195	56	287	55	121	207	1,8	0,6	0,9	1,4	1,0

Se realizó un manejo fitosanitario preventivo mediante un programa de aplicación semanal de

productos biológicos, a base de *Beauveria bassiana*, *Metarhizium* y un repelente a base de extracto de

Neem. Adicionalmente, se realizaron monitoreos fitosanitarios, para determinar la necesidad de aplicaciones fitosanitarias específicas.

Para caracterizar el sistema de cultivo, en cada ciclo de producción se determinó radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa, temperatura y grados día (GD) en clima; humedad volumétrica y temperatura en sustrato; conductividad eléctrica (CE) y pH en drenaje; y biomasa fresca y seca, índice de área foliar (IAF) y longitud de hoja en la planta. Para cuantificar la absorción de nutrientes por unidad de superficie ( $N_{ab}$ :  $g\ m^{-2}$ ) y como concentración de absorción ( $C_{ab}$ :  $mg\ L^{-1}$ ), se determinó la materia seca, la concentración de nutrientes en la planta y la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ).

La temperatura y la humedad relativa del aire se midieron en continuo (HOBO Mod. Pro V2), cuyos promedios horarios fueron almacenados en un registrador de datos (Campbell Scientific. Mod. CR1000), a partir de los cuales se determinó los valores máximos, mínimos y promedios diarios de temperatura ( $^{\circ}C$ ), humedad relativa (%) y déficit de presión de vapor (kPa). La precipitación (mm) fue medida con dos pluviómetros (Decagon Devices Mod. ECRN-50), mientras que la radiación solar global y la velocidad de viento ( $V_V$ ), fueron obtenidos de la Estación Meteorológica del Instituto Meteorológico Nacional ubicada a 100 m del cultivo experimental. La radiación solar dentro del cultivo protegido se estimó a partir de un coeficiente de transmisividad de luz, obtenido como el cociente entre los valores de radiación PAR exterior e interior del cultivo bajo protección (APOGEE Mod. LQS100-20). Finalmente se determinó la integral de radiación solar diaria (DLI:  $mol\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) como la sumatoria de los promedios horarios de radiación solar ( $mol\ m^{-2}\ hora^{-1}$ ) del día.

La  $ET_c$  y el drenaje se determinaron para periodos de 10 días, y se estimaron los valores totales acumulados para cada ciclo de cultivo. La  $ET_c$  se determinó por el método de balance de agua en lisímetro, a partir de los aportes de agua de riego (R) y precipitación (P), los volúmenes de drenaje (D) y de la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato ( $\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$ ) al inicio ( $\theta_i$ ) y al final ( $\theta_f$ ) de cada periodo, según la ecuación  $ET_c = R + P - D \pm \Delta\theta$  (Soto 2018). El volumen drenado y la  $\theta$  se midieron diariamente a las 6 a.m. antes del inicio del primer riego, y se recolectaron muestras para medir la CE y el pH en el drenaje utilizando un pHmetro-conductivímetro (HANNA Mod. HI98129). El contenido de  $\theta$  ( $\%v\ v^{-1}$ ) se midió con un sensor de

capacitancia "TDR" (Time Domain Reflectometry, Decagon Devices<sup>®</sup> mod. GS3) conectado a un "datalogger" (Decagon Devices<sup>®</sup> ProCheck).

En cada ciclo del cultivo, se realizaron muestreos de variables de planta a los 10, 20, 30, 40 y 50 días, utilizando cinco repeticiones/muestreo. En cada muestreo, cada repetición fue asignada al azar dentro de cada uno de los 5 bancales de  $12\ m^2$  que componían el área total de cultivo ( $60\ m^2$ ). En los muestreos de 10 a 40 días, se recolectaron 5 plantas (macollas)/repetición para un total de 25 plantas por muestreo, mientras que a los 50 días se muestrearon 20 plantas/repetición para un total de 100 plantas.

La cosecha se realizó a los 50 días, después del trasplante (DDT) en verano y después de la primera cosecha (DDC) en invierno. El rendimiento fresco se obtuvo de 25 plantas (macolla) cosechadas en la parte central de cada UE, dejando dos hileras externas como borde. A partir del peso medio por planta (g), se estimó el rendimiento fresco ( $Kg\ m^{-2}$ ) según densidad de siembra utilizada ( $49\ plantas\ m^{-2}$ ).

El área foliar (AF) por planta o macolla ( $cm^2$ ) se midió con un medidor digital de AF (LI-COR Mod. LI-3100C), y se determinó el índice de área foliar (IAF:  $m^2\ m^{-2}$ ) como el cociente entre AF por planta ( $cm^2$ ) y  $10000$ , multiplicado por  $49\ plantas\ m^2$ .

La extracción de nutrientes para cada periodo decenario, se determinó a partir de la masa de materia seca (MS) de cada una de las muestras ( $g\ m^{-2}$ ) y su respectiva concentración de macronutrientes (%) y micronutrientes ( $mg\ kg^{-1}$ ). La concentración de nutrientes para cada uno de los muestreos realizados cada 10 días, se obtuvo en una muestra de MS compuesta por las 5 repeticiones. Lo anterior, siguiendo la recomendación de BERTSCH (2003), según la cual, 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.

La absorción de nutrientes fue graficada en función del tiempo cronológico (días) y el tiempo térmico expresado en grados centígrados  $día^{-1}$  ( $^{\circ}Cd$ ) estimado según (MURRAY, 2008). Debido a la falta de información sobre el cultivo, se asumió una la temperatura base de  $10^{\circ}C$  según criterio de KRUG (1999) para cultivos de climas cálidos, considerando que el cultivo se adapta bien a climas cálidos tropicales con temperaturas entre  $15$  y  $20\ ^{\circ}C$  (ALVARADO et al., 1999). Adicionalmente, se

determinó la concentración o tasa de absorción para cada nutriente ( $\text{mg L}^{-1}$ ) como el cociente entre la masa del nutriente absorbido ( $\text{mg m}^{-2}$ ) y la  $\text{ET}_c$  del cultivo ( $\text{L m}^{-2}$ ) (SONNEVELD, 2002). Finalmente, para cada elemento se determinó un modelo de regresión con el mejor ajuste ( $R^2$ ), entre el nutriente absorbido acumulado y el tiempo térmico acumulado.

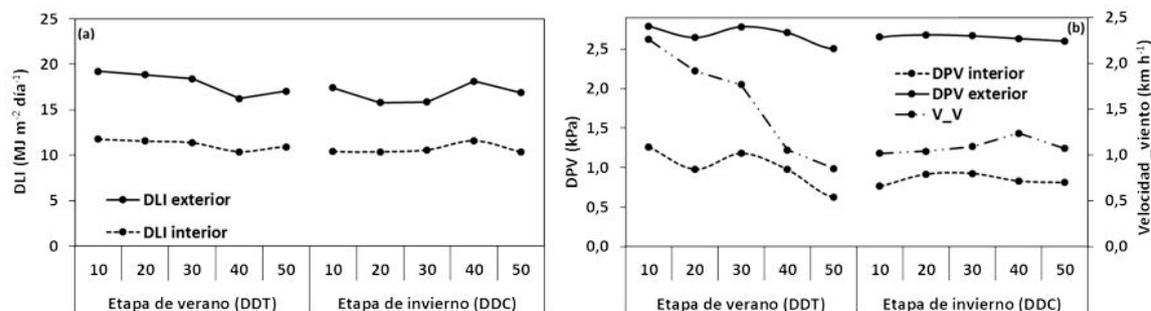
## Resultados y discusión

### Caracterización del sistema de cultivo

El clima: Los valores de DLI fueron similares durante ambas etapas de cultivo, con una reducción de un 59% debido a la protección del cultivo (Fig. 2a). La DLI bajo cultivo protegido fluctuó entre un máximo de  $11,8 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  al inicio del ciclo de verano y un mínimo de  $10,3 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  al final

del ciclo de invierno, con promedios de 11,2 y  $10,7 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , respectivamente. De forma similar, consecuente con el comportamiento de la radiación solar, el déficit de presión de vapor (DPV) fue apreciablemente superior en el exterior del cultivo protegido, mientras que la velocidad del viento fue mayor en época de verano (Fig. 2b).

Los valores promedios de temperatura y humedad relativa máximas, mínimas y promedios, durante el ciclo del experimento fueron muy similares (Tabla 2). Probablemente, al ser un sistema abierto en los laterales, donde únicamente se protege el ancho de la cama de cultivo (1,2 m), los flujos turbulentos de energía convectiva y radiativa (ALLEN Y PEREIRA, 2009), tienden a homogenizar la temperatura y humedad del aire dentro del área experimental de cultivo ( $60 \text{ m}^2$ ). Por tanto, el efecto más evidente del sistema del cultivo



**Figura 2.** Valores promedios de (a) integral de radiación solar diaria (DLI), y (b) déficit de presión de vapor (DPV) interior y exterior, y de velocidad de viento (V\_V), en las etapas de verano e invierno del cultivo de culantro coyote hidropónico bajo protección. Alajuela, Costa Rica. 2016.

**Tabla 2.** Valores promedios de temperatura y humedad relativa máximas, mínimas y promedios, durante las etapas de verano e invierno del cultivo protegido de culantro coyote hidropónico. Alajuela, Costa Rica. 2016.

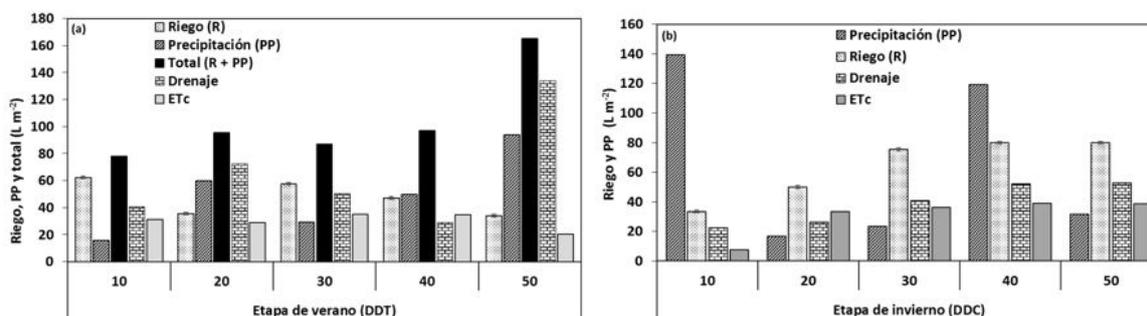
Protección/época	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )			Humedad relativa (%)		
	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.
Sarán en verano	32,56	19,58	24,82	98,61	60,49	85,95
Plástico en invierno	31,42	18,96	23,90	99,96	63,62	88,61

protegido, fue la reducción en la DLI, lo cual afectó el crecimiento y la dinámica del agua en el sistema de cultivo, tal como se describe más adelante.

Balace hídrico: El balance de agua en el sistema de cultivo, incluyendo las entradas ( $\text{L m}^{-2}$ ): riego y precipitación; y las salidas: drenaje y  $\text{ET}_c$ , se presentan en la Fig. 3. En etapa de verano, considerando que el sarán es una cubierta permeable a la lluvia, el volumen total de agua aportada incluyó el riego ( $236,7 \text{ L m}^{-2}$ ) y la precipitación ( $248,8 \text{ L m}^{-2}$ ), para un aporte total de  $485,5 \text{ L m}^{-2}$  (Fig. 3a). El riego

aportado por periodo decenario (10 días) fluctuó entre  $62,3 \text{ L m}^{-2}$  a los 10 DDT hasta  $33,5 \text{ L m}^{-2}$  a los 50 DDT. El promedio diario de agua de entrada al sistema fue de  $4,7 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en riego,  $5,0 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  en PP, para un total de  $9,7 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ .

En el ciclo de cultivo de invierno, el aporte total de agua incluyó únicamente el riego al estar bajo cubierta plástica, donde el riego alcanzó un total de  $318,5 \text{ L m}^{-2}$  y la lluvia incidente en el exterior del cultivo fue de  $329,9 \text{ L m}^{-2}$  (Fig. 3b).



**Figura 3.** Volúmenes de riego aplicado, precipitación (PP), agua total (riego + PP), drenaje y evapotranspiración del cultivo (ETc) por periodo decenario (10 días), durante las etapas en verano (a) e invierno (b) del cultivo de culantro coyote hidropónico bajo protección. Alajuela, Costa Rica. 2016. Las siglas DDT y DDC indican días después de trasplante y días después de cosecha, respectivamente.

La  $ET_c$  durante ambas etapas del ciclo del cultivo, varió poco entre periodos decenarios (10 días), excepto al final de la etapa de verano (50 DDT, Fig. 3a) e inicios de etapa de invierno (10 DDC, Fig. 3b) donde se obtuvieron valores máximos de  $20,4 \text{ L m}^{-2}$  y mínimos de  $7,6 \text{ L m}^{-2}$ , respectivamente. Al final del ciclo la  $ET_c$  total alcanzó  $150 \text{ L m}^{-2}$  en verano y  $157 \text{ L m}^{-2}$  en invierno.

La ausencia de datos de  $ET_c$  en culantro coyote en la literatura internacional, dificulta la interpretación de los valores de  $ET_c$  obtenidos en este estudio. Sin embargo, se asume que una reducción de 59% en la cantidad de luz solar debido a la protección del cultivo, respecto a la radiación exterior (Fig. 2a), implica una disminución sustancial en el consumo hídrico. Al respecto, diversos estudios han demostrado que la  $ET_c$  disminuye de forma lineal conforme se reduce la cantidad de radiación solar (ESCALANTE et al., 2001; MARTÍN et al., 2005; FAN et al., 2016; FERNÁNDEZ et al., 2005).

En la etapa de cultivo en verano se obtuvieron mayores volúmenes de drenaje ( $327 \text{ L m}^{-2}$ ) que en invierno ( $194 \text{ L m}^{-2}$ ), con un comportamiento variable en los diferentes periodos decenarios (Fig. 3a). En verano el drenaje incrementó a los 20 DDT, luego disminuyó hasta los 40 DDT, e incrementó hasta alcanzar valores máximos al final de dicha etapa ( $134 \text{ L m}^{-2}$  a 50 DDT), como consecuencia de mayores precipitaciones ( $139,4 \text{ L m}^{-2}$ ). En la etapa de invierno (Fig. 3b), el volumen de drenaje mostró una tendencia a incrementar durante el ciclo del cultivo, desde  $22,4 \text{ L m}^{-2}$  a los 10 DDC hasta un valor máximo de  $52,7 \text{ L m}^{-2}$  a los 50 DDC.

El año 2016, tuvo un comportamiento irregular, debido al fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) (HIDALGO, 2017). Consecuentemente,

las lluvias se adelantaron con un comportamiento lluvioso típico de la época invernal. En el ciclo de cultivo de invierno, el total de lluvia fue un 25% superior a la etapa de cultivo en verano. Sin embargo, en ciclo de verano el cultivo recibió mayor aporte de agua debido a que el techo de sarán es permeable al agua, mientras que en invierno, la cubierta plástica evito el aporte de agua de lluvia. Por tanto, el agua total aportada (riego + PP) fue de  $522,4 \text{ L m}^{-2}$  en verano y de  $318,5$  en invierno, lo cual explica el porqué de un mayor volumen de drenaje en etapa de verano.

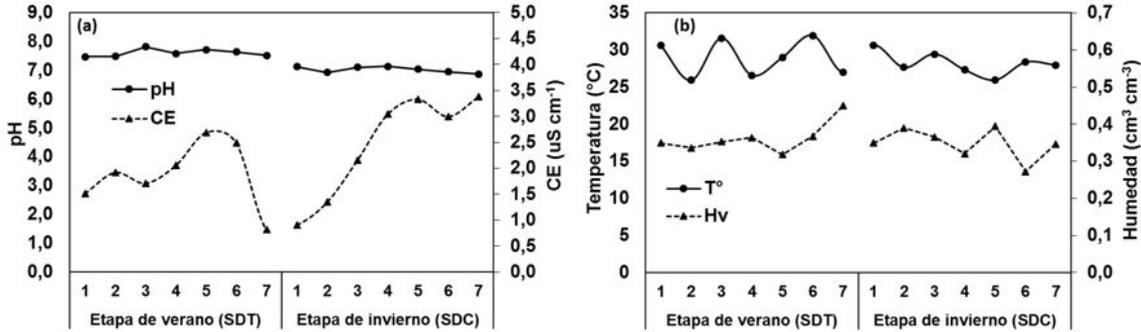
El sustrato: El pH y la salinidad (CE) en el drenaje (Fig. 4), son parámetros habitualmente utilizados como criterios para el manejo del fertirriego en función de las demandas hídricas y nutricionales, en las diferentes etapas fenológica de cultivos sin suelo. La variación de pH y de CE de la solución nutritiva desde el gotero hasta la salida en el drenaje, es un comportamiento normal que se debe a las diferentes reacciones que suceden entre nutrientes en la solución de sustrato, y entre los nutrientes en fase acuosa y las raíces, en su curso a través del perfil del sustrato. En este estudio, el pH en la solución obtenida en el gotero fue de 5,8; mientras que el pH en el drenaje se mantuvo casi constante durante ambas etapas de cultivo (Fig. 4a), con un promedio ligeramente superior en verano (7,6) respecto al invierno (7,02).

La CE en el drenaje (Fig. 4a) fue ligeramente superior en invierno ( $2,45 \text{ uS cm}^{-1}$ ) que en verano ( $1,89 \text{ uS cm}^{-1}$ ). En etapa de verano con sombreado de sarán, debido al fenómeno ENOS se presentaron lluvias fuertes esporádicas en los primeros 30 DDT, que incrementaron en los últimos 15 DDT, lo cual contribuyó al lavado de sales y consecuentemente a la reducción de la CE en el drenaje. La CE máxima ( $2,69 \text{ uS cm}^{-1}$ ) se alcanzó entre 35 y 42 DDT y la mínima al final del ciclo

(0,82 uS cm<sup>-1</sup>) coincidente con mayores precipitaciones.

En invierno, aunque la precipitación fue superior, por el contrario, no hubo lavado de sales ni el consecuente efecto reductor de la CE debido a la protección del techo plástico. La CE mínima (0,91 uS cm<sup>-1</sup>) se presentó al inicio de dicha etapa, producto del lavado de sales al final de la etapa de

verano, cuando aún no se había colocado la cubierta plástica (Fig. 4a). Posteriormente, incrementa progresivamente hasta alcanzar una CE máxima DE 3,38 uS cm<sup>-1</sup> al final del ciclo (30-40 DDT), probablemente debido a la acumulación de sales, ya que no hubo de lavado de sales por las lluvias.

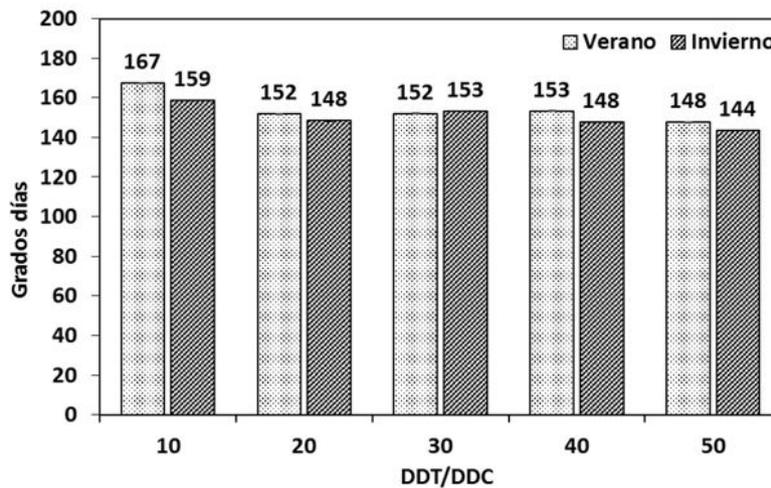


**Figura 4.** Evolución de la conductividad eléctrica (CE) y pH en la solución drenada (a), y de la humedad volumétrica y temperatura (b), según semanas después de trasplante (DDT) en verano y después de cosecha (DDC) en invierno, en el cultivo protegido de culantro coyote hidropónico. Alajuela, Costa Rica. 2016.

La evolución de la temperatura y del contenido de  $\theta$  en el sustrato fueron similares en verano e invierno (Fig. 4b) con valores promedios de 28,5 °C y 0,37 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Esto evidencia que hubo un buen manejo del riego, lo cual, aun cuando la capacidad de retención de  $\theta$  de la piedrilla fue bajo (20%), permitió mantener el contenido de  $\theta$  dentro del rango de agua fácilmente

disponible en el sustrato (15% - 20%, Fig. 1).

El tiempo térmico (GD) varió poco entre periodos (10 días) y entre etapas de cultivo (Fig. 5), lo cual estuvo relacionado con el comportamiento irregular del clima durante el año 2016, debido al fenómeno ENOS. La cantidad total de grados días acumulados fueron 772 GD en verano y 751 en invierno.



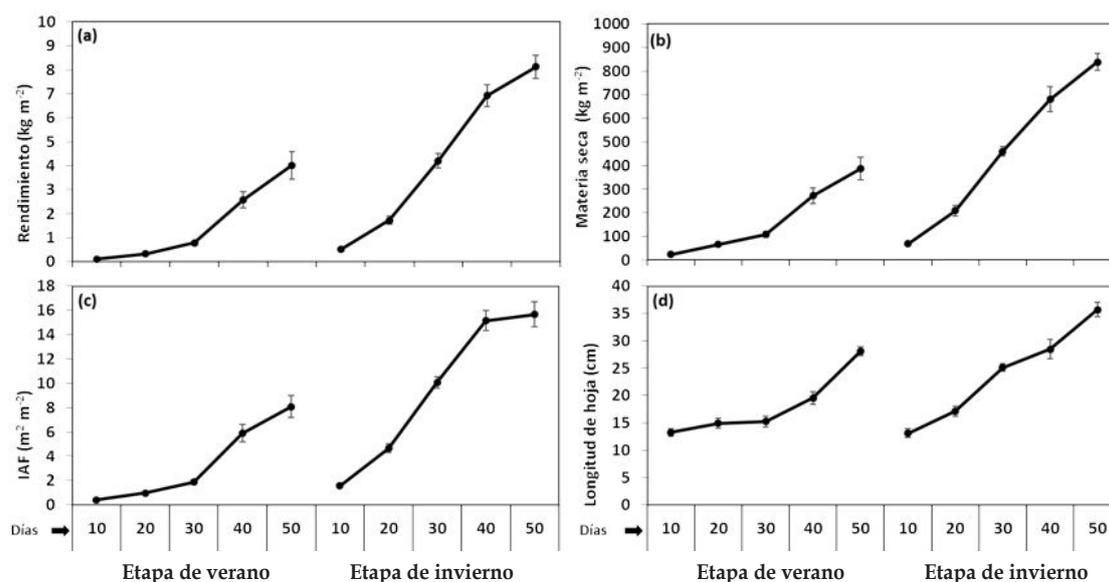
**Figura 5.** Grados días centígrados (GD) por periodo decenal, en cultivo protegido de culantro coyote hidropónico. Alajuela, Costa Rica. 2016. Las siglas DDT y DDC indican, respectivamente, días después de trasplante en verano y días después de cosecha en invierno.

**Crecimiento del cultivo:** En la Fig. 6 se presentan variables que caracterizan el crecimiento durante ambas etapas del cultivo, según tiempo cronológico y tiempo térmico. El primero se presenta en días después del trasplante (DDT) para la etapa de verano y en días después de la primera cosecha (DDC) en etapa de invierno; mientras que el tiempo térmico se expresa en grados centígrados día ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ), por periodo de 10 días (GD\_P) y acumulados (GD\_A).

El rendimiento fresco, la materia seca, el IAF y la longitud de hoja durante la etapa de invierno (Fig. 6), casi duplicaron los valores obtenidos en el ciclo de verano. Esto probablemente fue debido a que en verano la planta recién trasplantada estaba en una etapa de establecimiento del sistema radical y de la formación de suficiente fuente (AF) para los ciclos de producción posteriores, tal como evidenció en el ciclo de invierno.

En ambas etapas de cultivo, todas las variables

de crecimiento mostraron tendencias similares, incrementando apreciablemente a partir de los 30 DDT en verano y a los 10 DDC en invierno. El rendimiento fresco (Fig. 6a) alcanzó un peso de 4,02 en verano y 8,12  $\text{kg m}^{-2}$  en invierno, equivalente a 20 y 40 rollos de 200  $\text{g m}^{-2}$ , respectivamente. La acumulación de materia seca (Fig. 6b) mostró un comportamiento similar a la producción de materia fresca, con un acumulado de 387 y 837  $\text{g m}^{-2}$ , respectivamente. En verano, el IAF (Fig. 6c) mostró una tendencia al incremento aún al momento de la cosecha; mientras que en invierno presentó una tendencia a estabilizarse a partir los 40 DDC. Finalmente, el largo de la hoja alcanzó una longitud promedio de 28,1 cm en verano y de 35,7 cm en invierno (Fig. 6d). Dichos valores fueron superiores a los reportados por CALLEJAS et al. (2016) a los 70 (5,75 cm), 90 (9,79 cm) y 120 DDT (19,2 cm) en un cultivo en suelo con 40% de sombra.



**Figura 6.** Promedios de (a) rendimiento fresco, (b) materia seca, (c) índice de área foliar (IAF) y (d) longitud de hoja, según tiempo cronológico (días) y tiempo térmico en grados centígrados día ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ) por periodo de 10 días (GD\_P) y acumulados (GD\_P) en las etapas de verano e invierno del cultivo protegido de culantro coyote hidropónico. Alajuela, Costa Rica. 2016.

En todos los casos, el cultivo mostró una tendencia a incrementar el crecimiento reflejados en altos valores de IAF y de longitud de hoja. Dichas variables han sido directamente relacionadas con incrementos en el rendimiento fresco y en la ETC,

cuando se reduce el exceso de radiación a niveles aceptables. Al respecto, CALLEJAS et al. (2016) y SOSA (2006), reportaron que el uso de un 40% de sombra en culantro coyote incrementó el IAF respecto a un cultivo sin sombra. Otros autores

han demostrado que al incrementar el AF y el número de hojas aumenta la transpiración (TAIZ y ZEIGER, 2006; QIU et al., 2013; DI BENEDETTO and TOGNETTI, 2016). Sin embargo, sería necesario determinar si la reducción de la radiación solar tiene mayor influencia sobre la ETc que el propio incremento del IAF.

### Absorción de nutrientes

En la Fig. 7, se presenta la absorción acumulada ( $\text{g m}^{-2}$ ) y el incremento porcentual (%) de macro y micronutrientes, según tiempo cronológico y tiempo térmico. Los estudios de absorción de nutrientes en culantro coyote son escasos, sobre todo en sistemas hidropónicos. Únicamente, se encontró un estudio para cultivo convencional en suelo a campo abierto (BERTSTH, 2003), cuyo orden de absorción de macronutrientes en follaje ( $\text{K} > \text{N} > \text{P} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$ ), fue similar al obtenido en el presente estudio en ambas etapas del cultivo ( $\text{K} > \text{N} > \text{P} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$ ). Al estimar la absorción en follaje según BERTSTH (2003), en base al rendimiento obtenido en el presente cultivo de culantro coyote, 20 rollos en verano y 40 rollos en invierno, esta fue superior en el caso de N, P, K, y S, e inferior para el Ca, Mg y Fe.

En ambas etapas, el máximo incremento (%) de absorción se presentó a los 40 DDT, cuando acumuló 625 GD\_A en verano y 608 GD\_A en invierno. Únicamente, el S, el Zn y el B tuvieron un comportamiento diferente. El azufre, tuvo la máxima absorción (36%) a los 30 DDC (460 GD\_A) en periodo de invierno; mientras que el Zn en verano y el Cu en invierno mostraron una tendencia a incrementar el consumo hasta el final del ciclo de cultivo, lo cual probablemente estuvo relacionado con aplicaciones fitosanitarias a base de S, Zn y Cu a los 30, 40 y 50 días, respectivamente.

El patrón de absorción observado en culantro coyote, fue similar al comportamiento descrito para cultivos de hoja por Silbert y Bart-Tal (2008), donde generalmente las etapas de máxima absorción ocurren en respuesta a los cambios en el patrón de crecimiento (Fig. 6) en respuesta a las etapas fenológicas del cultivo.

En el presente cultivo, los periodos de máxima absorción en ambas etapas (30-40 días), coinciden con las etapas de máximo crecimiento expresado en términos de rendimiento, acumulación de materia seca e IAF (Fig. 6). Coincidentemente, la máxima tasa de crecimiento absoluto del cultivo ( $\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , datos no presentados) se presentó en

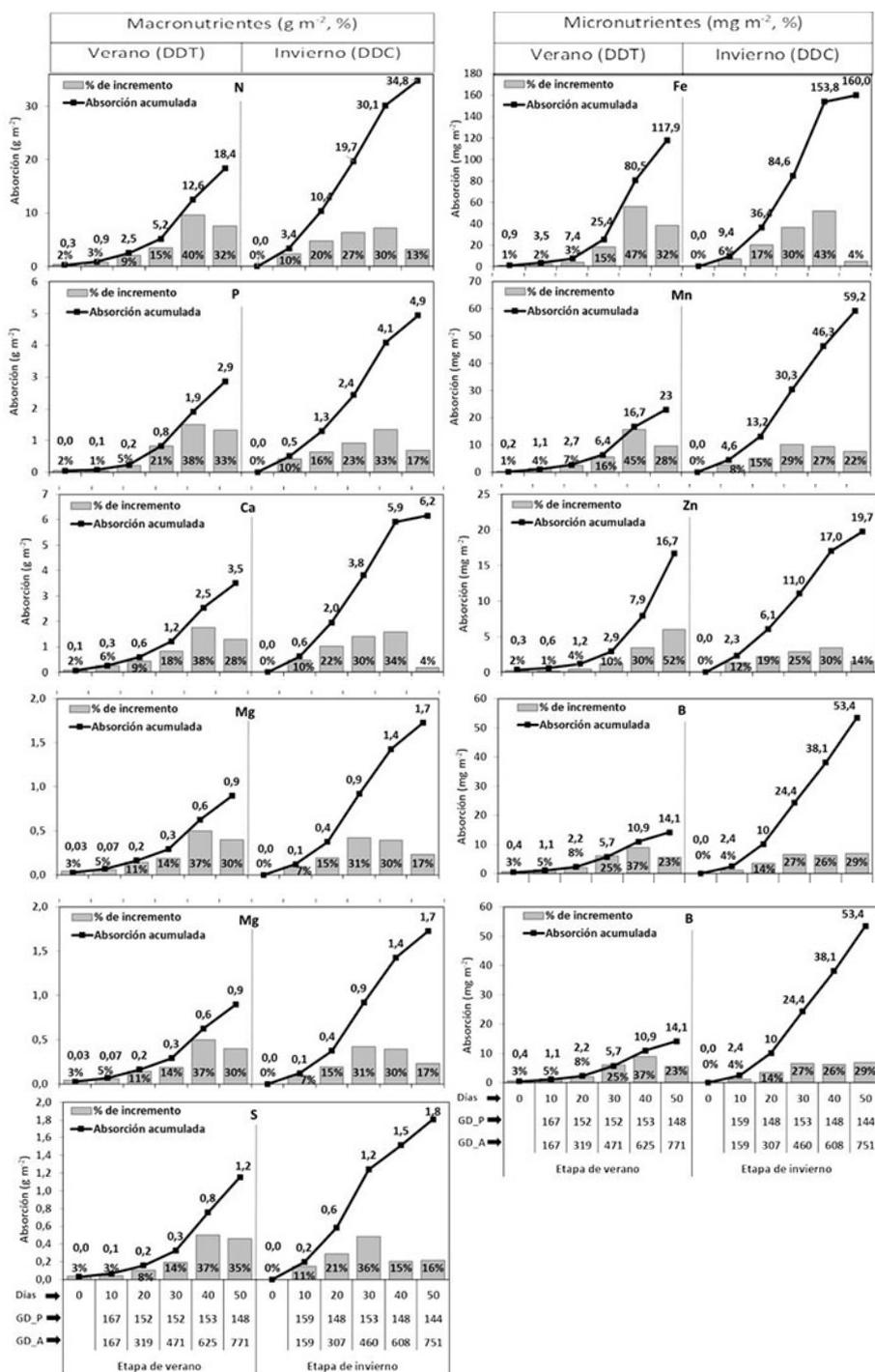
el periodo comprendido entre los 30 y 40 DDT en verano y DDC en invierno. Después de los 40 días, en ambos ciclos de producción las tasas de crecimiento disminuyen, probablemente relacionado con la senescencia del cultivo, lo cual sugiere que la eficiencia de recuperación de nutrientes disminuiría y que por lo tanto a partir del segundo ciclo sería recomendable realizar la cosecha a los 40 DDC.

### Concentración de absorción de nutrientes (CAN)

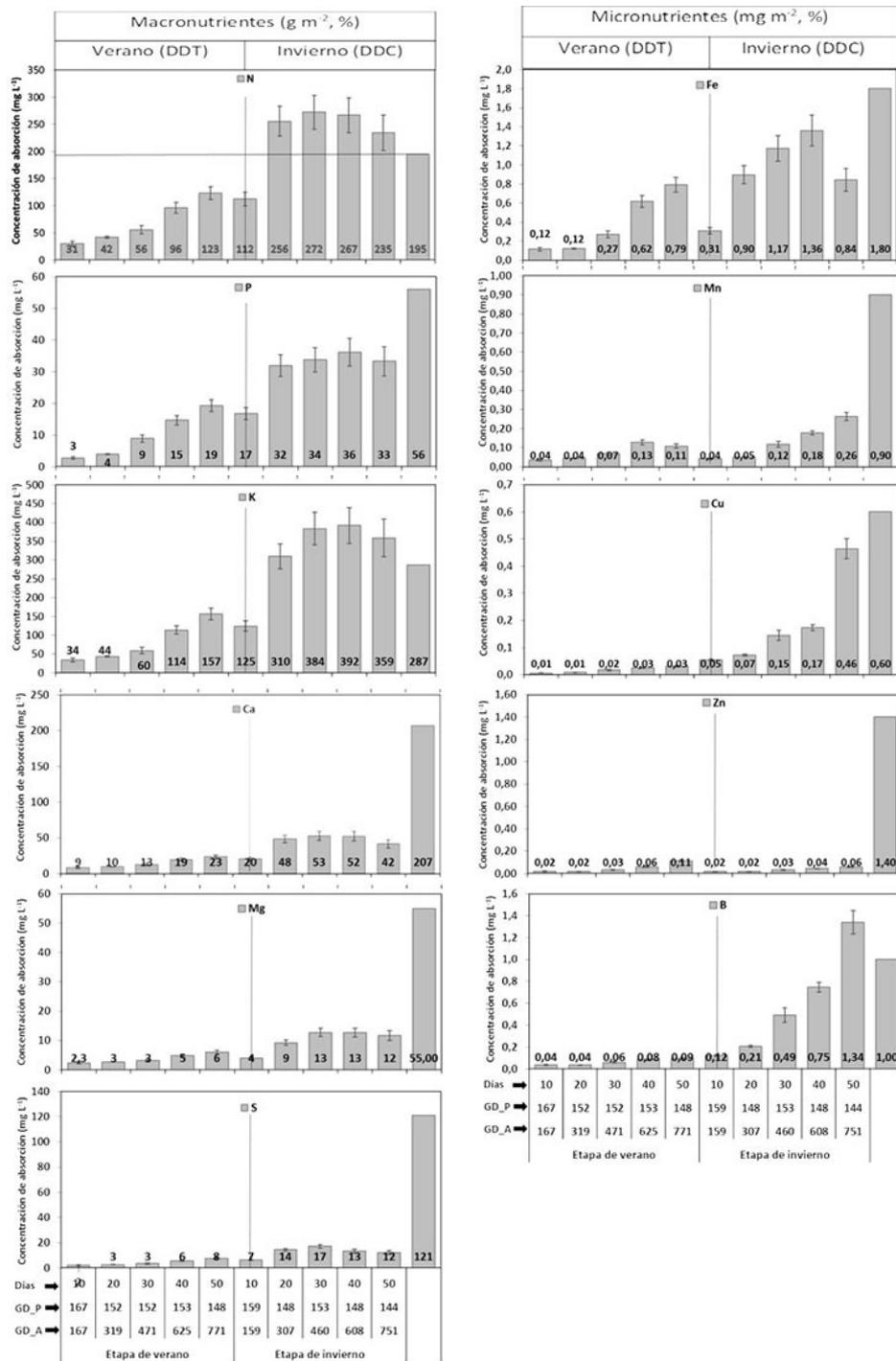
La CAN obtenida en este estudio (Fig. 8), mostró un orden de concentración ( $\text{mg L}^{-1}$ ) consecuente con el comportamiento mostrado por la absorción de nutrientes por unidad de superficie ( $\text{K} > \text{N} > \text{P} > \text{Ca} > \text{S} > \text{Mg}$ ). En verano, hubo una tendencia a incrementar la CAN de micro y macronutrientes durante todo el ciclo, con la máxima absorción a los 50 DDT, excepto el Mn, que disminuyó al final del ciclo. En invierno, la CAN mayores y de hierro aumentó progresivamente hasta alcanzar valores máximos entre 30 y 40 DDC disminuyendo al final del ciclo, excepto para el Mn, Cu, Zn y B, que mostraron una tendencia al incremento con una máxima absorción a los 50 DDC.

Al comparar las concentraciones de nutriente aplicado (Tabla 1) con la CAN, en ambas etapas de cultivo se presentan diferencias apreciables, principalmente en el ciclo de verano. Para la mayoría de nutrientes mayores y menores, la concentración aplicada en la solución nutritiva fue superior a la CAN máxima presentadas entre los 20 y 50 días. Únicamente, la CAN de N y de K entre los 20 y 50 días, fue superior a la concentración aplicada.

Existen dos mecanismos primarios de absorción de nutrientes a través de la superficie de la raíz: i- por flujo de masas a través de la transpiración y ii- por difusión en función de la gradiente de concentración de nutrientes en la rizosfera. El mecanismo principal de absorción depende en gran parte del sistema de producción utilizado, ya sea en suelo o en hidroponía. En sistemas de cultivo en sustratos bajo invernadero el aporte de agua y nutrientes se realiza mediante fertiriego de alta frecuencia. En el cultivo en suelo, por el contrario, la frecuencia del aporte de agua y nutrientes es menor y habitualmente independientes entre sí. Por lo tanto, los principales mecanismos de absorción de nutrientes son el flujo de masas en cultivos sin suelo y la difusión en el cultivo convencional en suelo.



**Figura 7.** Absorción acumulada y porcentaje de incremento en la absorción, de macro y micronutrientes, en las etapas de verano e invierno del cultivo protegido de culantro coyote hidropónico, según tiempo cronológico (días) y tiempo térmico en grados centígrados día ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ) por periodo de 10 días (GD\_P) y acumulados (GD\_A). Alajuela, Costa Rica. 2016.



**Figura 8.** Concentración de absorción ( $\text{mg L}^{-1}$ ) de macro y micronutrientes, en las etapas de verano e invierno del cultivo protegido de culantro coyote hidropónico, según tiempo cronológico (días) y tiempo térmico en grados centígrados día ( $^{\circ}\text{C d}^{-1}$ ) por periodo de 10 días (GD\_P) y acumulados (GD\_P). Alajuela, Costa Rica. 2016.

Estudios realizados por Silber et al. (2008), demostraron que el reabastecimiento frecuente de agua y nutrientes elimina la zona de agotamiento en la superficie de la raíz y disminuyen el gradiente de concentración entre la solución del medio y la interfaz de la raíz, por lo cual disminuyen el papel de la difusión en el transporte de nutrientes hacia las raíces. Además, reportaron que mayor frecuencia de riego aumentó la adsorción de nutrientes por parte de la planta debido a la reposición frecuente de la solución de nutrientes en la zona de agotamiento adyacente a la superficie de la raíz y al incremento del transporte de agua y nutrientes por medio del flujo de masas el cual relegó a segundo plano la absorción por difusión.

Por otra parte, en el cultivo en suelo, generalmente los requerimientos nutricionales se reportan en cantidades por área ( $\text{kg m}^{-2}$ ); mientras que en cultivos hidropónicos dicha demanda es aportada como concentración de nutrientes ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en varios riegos durante el día, lo cual hace necesario conocer la  $\text{ET}_c$  para determinar la concentración de absorción de nutrientes ( $\text{CAN: mg L}^{-1}$ ).

Lo expuesto anteriormente, sugiere que la determinación de la CAN, podría ser una herramienta útil para ajustar la concentración de nutrientes ( $\text{mg L}^{-1}$ ) en solución nutritiva en cultivos hidropónicos, considerando que en dicho sistema el mecanismo de absorción primario de agua y nutrientes, podría ser el flujo de masas. Así lo han demostrado estudios realizados por Thompson et al., (2013) y Gallardo et

al., (2009), en el cultivo de tomate. No obstante, para confirmar dicha hipótesis en cultivos de hoja como el culantro coyote, sería recomendable otros estudios que consideren la interacción entre el genotipo, el clima y el manejo agronómico. Sin embargo, se debe considerar que la  $\text{ET}_c$  varía según los cambios estacionales de clima según la época y la zona, por lo que consecuentemente variaría la CAN. Por otra parte, al incrementar la temperatura, aumenta la tasa de crecimiento y la acumulación de materia seca y absorción de nutrientes. Sin embargo, no hay certeza si la absorción de nutrientes incrementa en similar proporción que la  $\text{ET}_c$ , y por tanto es incierto si la CAN varía proporcionalmente con los cambios de clima. Por tal razón, las recomendaciones de CAN obtenidas deben realizarse para zonas climáticas similares a este estudio, en función del tiempo térmico (GD), para atenuar dicha incertidumbre y adaptar así dichas concentraciones a las condiciones de clima según la época y la zona.

En la Tabla 3 se presentan los modelos de regresión obtenidos, para estimar la absorción de nutrientes en el cultivo de culantro coyote en función de los grados día (GD). En ambos ciclos de producción del cultivo, los modelos obtenidos mostraron una tendencia curvilínea, consecuente con el patrón de crecimiento mostrado por el cultivo (Fig. 6). Para todos los modelos de estimación de nutrientes, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) fueron superiores a 0,96, excepto para el hierro que en invierno obtuvo un  $R^2$  ligeramente inferior

**Tabla 3.** Modelos de regresión con el mejor ajuste, en las etapas de verano e invierno del cultivo de culantro coyote hidropónico bajo protección, según tiempo térmico en grados centígrados día acumulados (GD). Alajuela, Costa Rica. 2016.

Etapa de verano		Etapa de invierno	
Modelo de regresión	R <sup>2</sup>	Modelo de regresión	R <sup>2</sup>
$N = 0,7392 \times \text{GD}^2 - 1,1278 \times \text{GD} + 0,9879$	0,991	$N = -0,2491 \times \text{GD}^2 + 9,7409 \times \text{GD} - 6,8057$	0,990
$P = 1,1486 \times \text{GD}^2 - 0,1679 \times \text{GD} + 0,0547$	0,993	$P = 0,0457 \times \text{GD}^2 + 0,8882 \times \text{GD} - 0,5159$	0,988
$1,4434 \times \text{GD}^2 - 2,9543 \times \text{GD} + 2,4942$	0,993	$K = 0,1186 \times \text{GD}^2 + 12,338 \times \text{GD} - 10,007$	0,988
$\text{Ca} = 0,1404 \times \text{GD}^2 - 0,001 \times \text{GD} + 0,0847$	0,990	$\text{Ca} = -0,1384 \times \text{GD}^2 + 2,3348 \times \text{GD} - 1,7845$	0,974
$\text{Mg} = 0,0398 \times \text{GD}^2 - 0,0265 \times \text{GD} + 0,0521$	0,992	$\text{Mg} = 0,004 \times \text{GD}^2 + 0,04022 \times \text{GD} - 0,3354$	0,986
$\text{S} = 0,0628 \times \text{GD}^2 - 0,0999 \times \text{GD} + 0,0997$	0,999	$\text{S} = -0,0407 \times \text{GD}^2 + 0,6591 \times \text{GD} - 0,4603$	0,988
$\text{Fe} = 7,4317 \times \text{GD}^2 - 14,383 \times \text{GD} + 8,354$	0,981	$\text{Fe} = 7,4317 \times \text{GD}^2 - 14,383 \times \text{GD} + 8,354$	0,887
$\text{Mn} = 1,1489 \times \text{GD}^2 - 1,1153 \times \text{GD} + 0,6711$	0,981	$\text{Mn} = 0,5312 \times \text{GD}^2 + 11,045 \times \text{GD} - 8,2707$	0,993
$\text{Cu} = 0,1921 \times \text{GD}^2 - 0,0296 \times \text{GD} + 0,1436$	0,993	$\text{Cu} = 0,9826 \times \text{GD}^2 - 2,7316 \times \text{GD} + 3,1267$	0,956
$\text{Zn} = 1,3953 \times \text{GD}^2 - 4,479 \times \text{GD} + 3,9393$	0,996	$\text{Zn} = -0,0731 \times \text{GD}^2 + 5,014 \times \text{GD} - 3,0091$	0,989
$\text{B} = 0,416 \times \text{GD}^2 + 0,9699 \times \text{GD} - 0,6663$	0,983	$\text{B} = 1,0572 \times \text{GD}^2 + 6,672 \times \text{GD} - 5,9824$	0,998

( $R^2$ : 0,89). Puesto que el  $R^2$  mide el porcentaje de la variación total que es explicada por el modelo de regresión, las ecuaciones obtenidas estimarían con suficiente precisión la absorción de nutrientes (y) en función de los GD (x) acumulados. Estudios de absorción realizados por Garbanzo et al. (2019) en palma aceitera han reportado modelos de regresión que relacionan la absorción de nutrientes en función del tiempo cronológico (días), con una tendencia exponencial y con valores de r superiores a 0,97.

Una de las limitaciones de las curvas de absorción es que se presentan en función del tiempo cronológico (días), por lo que no consideran las diferencias en la tasa de crecimiento entre cultivos, según las variaciones del clima estacional y regional. Varios estudios, han demostrado que la tasa de crecimiento de plantas presenta una relación lineal con la temperatura expresada como grados día (GD), los cuales se definen como la cantidad de GD necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o fase fenológica (TRUDGILL et al., 2005; PARRA-CORONADO et al., 2014).

Los GD acumulados en cada etapa fenológica de un genotipo, son relativamente constantes e independientes de la época y zona de siembra. El cultivo de culantro coyote ha sido reportado en rangos de temperatura de 15 a 30° (MAG-SFE, 2014), lo cual supone grandes variaciones en la tasa y velocidad de crecimiento. La disponibilidad de datos históricos de temperatura y la temperatura base de los cultivos, permitiría que los modelos de regresión obtenidos en base GD en el presente estudio, sean una herramienta para ajustar la absorción de nutrientes en función del desarrollo fenológico del cultivo en diferentes agroecosistemas.

De esta forma, es posible implementar programas de fertirriego fraccionando las cantidades fertilizantes cuantas veces sea necesario varias veces a la semana, siguiendo una demanda creciente de acuerdo a la tasa de crecimiento y al desarrollo del cultivo en determinadas condiciones climáticas.

No obstante, tal como lo señala SILBER and BAR-TAL (2008), es importante considerar los cambios en las prácticas de manejo del cultivo y del genotipo, principalmente cuando las ecuaciones de ajuste se presentan en función del tiempo cronológico y no en tiempo fisiológico (GD).

## Conclusión

El cultivo bajo protección, mostró el máximo rendimiento durante el ciclo de invierno y consecuentemente una mayor absorción de nutrientes. En ambas etapas, de verano e invierno, el orden de absorción fue  $K > N > P > Ca > S > Mg > Fe > Mn > B > Zn > Cu$ , y en general la máxima absorción se presentó a los 40 DDT cuando el cultivo acumuló 625 GD en verano y 608 GD en invierno. Dicho comportamiento en la absorción fue consecuente con el patrón de crecimiento del cultivo, incluyendo la producción de biomasa fresca y seca, el IAF y la altura. Los modelos polinómicos en función de los GD acumulados, mostraron suficiente potencial ( $R^2 > 0,96$ ) para estimar con precisión la absorción de nutrientes según el clima. La cuantificación de la absorción de nutrientes y la ETC en función del clima, son indispensables para determinar la CAN, una herramienta con potencial para optimizar la concentración de nutrientes ( $mg L^{-1}$ ) en solución nutritiva, considerando que en hidroponía el mecanismo predominante en la absorción de nutrientes, es el flujo de masas.

## Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.*, v.28, n.1, p.17-34, 2009.
- ALVARADO, Y.; SANABRIA, C.; VILLALOBOS, J. El cultivo de culantro coyote (*Eryngium foetidum*) para exportación. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. p.17, 1999.
- BERTSCH, F. Absorción de nutrimentos por los cultivos. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 308 p., 2003.
- CALLEJAS, I.; CERRITOS, R.; RAUDA, M. Caracterización morfoagronómica e invertebrados asociados al acapate (Aparaceae: *Eryngium foetidum* L.). Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de El Salvador. p.97, 2016.
- CERDAS, M.; MONTERO, M. Efecto de cambios en manejo poscosecha sobre la calidad y vida útil del culantro coyote para exportación. *Agron. Costarricense*. Alajuela, Costa Rica. v.40, n.1, p.51-64, 2016.

- DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Ria* v.42, n.1900, p.258-282, 2016.
- ESCALANTE, J.; ESCALANTE, I.; RODRÍGUEZ, M. Producción de frijol, en dos épocas de siembra: su relación con la evapotranspiración, unidades calor y radiación solar en clima cálido. *Terra Latinoam.* v.19, n.4, p.309-315, 2001.
- EUNICE, E. Evaluación de la producción de culantro coyote (*Eryngium foetidum*) en tres ambientes diferentes y dos tipos de fertilización en la zona Atlántica de Costa Rica. Trabajo de graduación. Universidad EARTH. p.41, 2006.
- FAN, J.; WU, I.; ZHANG, T.; XIANG, Y.; ZHENG, J. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956–2015. *J. Hydrol.* v.542, p.923-937, 2016.
- FERNÁNDEZ, M.D.; GALLARDO, M.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.B.; FERERES, E. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *J. Hortic. Sci. Biotech.* v.80, n.1, p.87-96, 2005.
- GALLARDO, M.; THOMPSON, R.B.; RODRÍGUEZ, J.S.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ, M.D.; SÁNCHEZ, J.A.; MAGÁN, J.J. Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate. *Agric. Water Manag.* v.96, n.12, p.1773-1784, 2009.
- HOLDRIDGE L. Ecología basada en zonas de vida. IICA, San José, Costa Rica. 216 p. 1982.
- JARA, D. Evaluación de tres híbridos de pimiento (*Capsicum annum* L.) cultivados en hidroponía con tres mezclas de sustrato. Tesis Ing. Agr. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. p.46, 2016.
- KRUG, H. Environmental influences development, growth and yield. In *Physiology of Vegetable Crops*. Edited by H Wien, Cornell University, USA. p.101-126, 1999.
- LAVAGNI, G.; RODRÍGUEZ, G. El Culantro Coyote, producto de exportación. *Alimentaria* v.102 p.30-36, 2009.
- LEITE, C. Las mallas en el contexto del proyecto de un vivero. *Hortic. Internacional* v.1, p.66-73, 2005.
- LÓPEZ, M.A.; CHAVES, B.; FLÓREZ, V.J.; SALAZAR, M.R. Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agron. Colomb.* v.28, n.19, p.47-54, 2010.
- MARTÍN, F.; LÓPEZ, P.; CALERA, A. Agua y Agronomía. Mundi-Prensa. Madrid, España. 496 p. 2005.
- MORALES, J.; BRUNNER, B.; FLORES, L.; MARTÍNEZ, S. Hoja Informativa: culantro orgánico. Proyecto de agricultura orgánica. Departamento de cultivos y ciencias agroambientales. Estación Experimental Agrícola de Lajas. Puerto Rico. 11 p. 2013.
- MURRAY, M.S. Using degree days to time treatments for insect pests. Fact Sheet. Utah State University Extension and Utah Plant Pest Diagnostic Laboratory. IPM 05-08. 5 p. 2008.
- OREN-SHAMIR, M.; GUSSAKOVSKY, E.; SHPIEGEL, E.; NISSIM-LEVI, A.; RATNER, K.; OVADIA, R.; GILLER, Y.; SHAHAK, Y. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *J. Hortic. Sci. Biotech.* v.76, n.3, p.353-361, 2001.