

# Comportamiento químico y nutricional en un cultivo de clavel sembrado en sustrato, con riego monitoreado con lisímetro de pesada

**Germán Arturo Moreno Poveda**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de cultivos  
Bogotá D.C., Colombia  
2018

# Comportamiento químico y nutricional en un cultivo de clavel sembrado en sustrato, con fertirriego monitoreado con lisímetro de pesada

**Germán Arturo Moreno Poveda**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología de cultivos**

Director:  
Víctor J. Flórez Roncancio

**Línea de investigación:**  
Fisiología Vegetal

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Maestría en Ciencias Agrarias  
Bogotá D.C., Colombia  
2018

Este trabajo está dedicado a:

*Mi esposa e hijos por ser el motor, la inspiración de cada inicio, el mejor momento del día, el lugar seguro, la fuerza extra, la sonrisa que lo cambia todo, la más grande bendición.*

## **Agradecimientos**

A Dios por cada día, por cada etapa, por cada sueño, por cada logro, por cada enseñanza, por cada persona, por cada lugar que dispuso para hacer esto realidad.

Al profesor Víctor por poner su experiencia, su entrega y dedicación sobre la mesa.

A Arysta LifeScience Colombia por ser el inicio de este proceso.

## Resumen

En la sabana de Bogotá la práctica del fertirriego en los cultivos de clavel en sustrato en su mayoría se hace de forma empírica. El objetivo de la presente investigación fue determinar el comportamiento de los parámetros nutricionales del continuo planta - sustrato - lixiviado en clavel cultivado en sustrato y sometido al manejo del fertirriego monitoreado con lisímetro de pesada en comparación con el sistema de manejo tradicional. Para esto, en el área de invernaderos del Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia se dispuso de una nave de invernadero metálico tipo Flexon, con ventilación lateral y cenital pasiva, en la cual se sembraron esquejes de miniclavel cv. Rony, dispuestos en doce camas (15 x 0,75 m) elevadas, para una densidad de siembra de 24,7 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero. El diseño experimental contempló los tratamientos sistema de cultivo con lisímetro (CL) y sistema de cultivo sin lisímetro (SL), en un diseño de bloques completos al azar (BCA). Las variables evaluadas fueron volumen de riego, contenido nutricional de planta completa en cinco estadios fenológicos, capacidad de intercambio catiónico (CIC), relación carbono nitrógeno (C:N), conductividad eléctrica (CE), pH y nutrientes en sustrato y solución drenada; evaluaciones que permitieron determinar un ahorro promedio en el uso del fertirriego de un 13,2% con la utilización del lisímetro en comparación con el sistema de fertirriego tradicional, reportando diferencias estadísticas en el continuo planta, sustrato, lixiviado en los elementos nitrógeno, potasio, magnesio; además de la variable pH de sustrato. Fue más eficiente el tratamiento con lisímetro al mostrar una diferencia en los promedio de acumulación de masa seca de un gramo más por planta utilizando menos agua y nutrientes, sin afectar rendimiento y calidad.

**Palabras clave:** Lisímetro, capacidad de intercambio catiónico, relación carbono nitrógeno, conductividad eléctrica, pH, nutrientes, fertirriego, clavel.

## Abstract

In the Bogotá plateau, the fertigation practice in carnation substrate crops is mostly empirical. The aim of this research was to determine the nutritional parameters from continuum plant - substrate - leached in carnation, grown on substrate and subjected to the management of fertigation monitored with lysimeter compared with the traditional management system. For this, in the area of greenhouses Marengo Agricultural Center of the National University of Colombia was built a metal greenhouse Flexon type, with lateral and overhead passive ventilation, in which spray carnation cv. Rony cuttings were planted, arranged in twelve beds (15 x 0.75 m) above 0.4m soil level, for a density of 24.7 plants m<sup>-2</sup>. The experimental design was a complete randomized blocks (BCA) with two treatments: Lysimeter crop system and crop system without lysimeter. Irrigation volume, whole plant nutritional content in five phenological stages, cation exchange capacity (CEC), carbon nitrogen ratio (C:N), electrical conductivity (CE), pH, and nutrients in substrate and drained solution were the variables evaluated. The use of lysimeter generates saving in the use of fertigation on average of 13.2% when compared with the traditional system, reporting statistical differences in the continuum plant – substrate - leached in nitrogen, potassium, magnesium, and pH substrate variable. The lysimeter treatment was more efficient because it showed a difference in the average dry mass accumulation of one gram more per plant using less water and nutrients, without affecting yield and quality.

**Keywords:** Lysimeter, cation exchange capacity, carbon nitrogen ratio, electrical conductivity, pH, nutrients, fertigation, carnation.

# Tabla de contenido

	Pág.
Tabla de contenido	
Agradecimientos .....	4
Resumen .....	5
Abstract.....	6
Tabla de contenido.....	7
Lista de Figuras .....	9
Lista de Tablas .....	10
Lista de símbolos y abreviaturas.....	11
Introducción.....	13
Objetivos .....	18
General .....	18
Específicos .....	18
Revisión de literatura .....	19
Función de los Nutrientes.....	19
Nutrientes que permanecen en forma iónica.....	19
Fuente: Bonilla (2000); Salisbury y Ross (1992); Epstein y Bloom (2005)..	20
Curvas de extracción .....	20
Asimilación de nutrientes en función de parámetros de nutrición mineral	21
pH, CE, CIC y Relación C:N.....	21
pH .....	21
Relación C:N.....	24
Capacidad de intercambio catiónico - CIC .....	25
Conductividad Eléctrica - CE.....	27
Generalidades de los sustratos .....	29
Generalidades del cultivo del clavel .....	31
Evapotranspiración de los cultivos .....	34
Lisímetros en la agricultura .....	36
Materiales y métodos .....	43
Ubicación.....	43
Montaje de infraestructura.....	43
Instalación sensores climáticos e información meteorológica .....	45
Ubicación de lisímetros “UNlisitrón” .....	45
Instalación del sistema de riego .....	47
Material vegetal .....	47
Fertirriego .....	48
Variables evaluadas .....	48
Análisis de laboratorio .....	49
Cálculo de absorción de nutrientes durante el ciclo .....	50
Diseño experimental y análisis estadístico.....	51

<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>52</b>
<b>Descripción de la caracterización química del tejido .....</b>	<b>52</b>
<b>Curva de ganancia en masa seca .....</b>	<b>52</b>
<b>Concentración y extracción de nutrientes en plantas de miniclavel.....</b>	<b>54</b>
<b>Correlación entre la concentración de nutrientes .....</b>	<b>62</b>
<b>Descripción de N, P, K, Ca y Mg en sustrato y solución lixiviada .....</b>	<b>64</b>
<b>Descripción de parámetros químicos pH, CE, CIC y relación C:N en sustrato .....</b>	<b>68</b>
<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>79</b>



## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Componentes del UNLisitrón. Fuente: González et al. (2017).....	38
<b>Figura 2.</b> Vista general de las naves del invernadero tradicional con estructura metálica (a) y de las camas de cultivo construidas para el ensayo, en el lote 5 del CAM. ....	44
<b>Figura 3.</b> Diseño del sistema del lisímetro (a), detalle de su montaje en una cama de cultivo (b) y ubicación aleatoria de los equipos en el invernadero (c). ....	46
<b>Figura 4.</b> Curva de ganancia en masa seca en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo de fertirriego tradicional.....	53
<b>Figura 5.</b> Curvas promedio de extracción de N, P y K en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B). ....	59
<b>Figura 6.</b> Curvas promedio de extracción de Ca y Mg en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B). ....	60
<b>Figura 7.</b> Curvas promedio de extracción de elementos menores en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B).....	61
<b>Figura 8.</b> Comportamiento de macroelementos en sustrato y lixiviado a lo largo de un pico de producción de tallos florales en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo del fertirriego tradicional (SL). Porcentaje de nitrógeno en el sustrato (A) y contenido de nitrato en el lixiviado (B); Porcentaje de fósforo en el sustrato (C) y contenido de fosfato en el lixiviado (D); Porcentaje de potasio en el sustrato (E) y contenido de potasio en el lixiviado (F).....	66
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de elementos secundarios en sustrato y lixiviado en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo del fertirriego tradicional (SL). Porcentaje de calcio en el sustrato (A) y contenido de calcio en el lixiviado (B); Porcentaje de magnesio en el sustrato (C) y contenido de magnesio en el lixiviado (D).....	67
<b>Figura 10.</b> Comportamiento de parámetros químicos en el sustrato del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL). pH (A), CE (B), CIC (C), relación C:N (D). ....	70
<b>Figura 11.</b> Acumulación de masa seca y ahorro de agua del sistema productivo en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo de fertirriego tradicional. ....	72
<b>Figura 12.</b> Comportamiento de nitrógeno en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL). ....	72
<b>Figura 13.</b> Comportamiento de potasio en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL). ....	74
<b>Figura 14.</b> Comportamiento de magnesio en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL). ....	76

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los nutrientes minerales según su función bioquímica .....	19
<b>Tabla 2.</b> Valores de la relación C:N en diferentes materiales.....	25
<b>Tabla 3.</b> Capacidad de intercambio catiónico de diferentes tipo de sustratos y constituyentes de sustratos. 27	
<b>Tabla 4.</b> Algunas de las propiedades físicas, químicas y biológicas deseables en cualquier tipo de sustrato para ser utilizado en labores agrícolas.....	30
<b>Tabla 5.</b> Características del clavel miniatura cv. Rony ( <i>Dianthus caryophyllus</i> L.).....	32
<b>Tabla 6.</b> Fórmulas de fertirriego utilizadas en el ensayo con plantas de miniclavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada. ....	48
<b>Tabla 7.</b> Métodos empleados para la determinación nutricional en el sustrato utilizado en el ensayo con plantas de clavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada.....	49
<b>Tabla 8.</b> Métodos empleados para la determinación de nutrientes en tejido foliar en el ensayo con plantas de miniclavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada. ....	50
<b>Tabla 9.</b> Métodos empleados para la determinación de nutrientes en el lixiviado en el ensayo con plantas de clavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada. ....	50
<b>Tabla 10.</b> Ahorro mensual de agua y nutrientes durante un ciclo de cultivo en el sistema de producción de miniclavel cv. Rony con lisímetro de pesada, en comparación con el manejo del fertirriego sin lisímetro de pesada. ....	52
<b>Tabla 11.</b> Promedios de acumulación de masa seca y de concentración de nutrientes en planta completa de miniclavel cv. Rony, comparados entre las mismas semanas para cada tratamiento (manejos de fertirriego con y sin lisímetro de pesada). ....	55
<b>Tabla 12.</b> Promedios de absorción de nutrientes en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustrato y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo del fertirriego tradicional. ....	58
<b>Tabla 13.</b> Correlación en concentración de nutrientes en tejido vegetal de plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada.....	64

## Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m <sup>2</sup>	$\iint dx dy$
C <sub>p</sub>	Calor específico del aire	MJ kg <sup>-1</sup> -°C	C <sub>p</sub> : 0,001013
L	Calor latente de vaporización	MJ kg <sup>-1</sup> -°C	
P	Densidad	g ml <sup>-1</sup>	m/v
D	Drenaje	mm d <sup>-1</sup>	DF
ET	Evapotranspiración	mm d <sup>-1</sup>	DF
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiración del cultivo de referencia	mm d <sup>-1</sup>	
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiración real	mm d <sup>-1</sup>	
H	Calor sensible		
HR <sub>med</sub>	Humedad relativa media	%	DF
HR <sub>mim</sub>	Humedad relativa mínima	%	DF
I	Índice de calor anual		$i_j = (T_{med}/5)^{1,514}$
k <sub>c</sub>	Coficiente de cultivo	1	DF
K <sub>p</sub>	Coficiente del tanque de evapotranspiración	1	
L	Lámina de agua aplicada	mm d <sup>-1</sup>	DF
P <sub>cv</sub>	Acumulación de biomasa	g	DF
R	Lámina de agua aplicada	mm d <sup>-1</sup> a	DF
R <sub>n</sub>	Radiación solar neta	MJ m <sup>-2</sup> -d	DF
T	Temperatura del aire	°C	DF
T <sub>max</sub> , K	Temperatura máxima k	°C	Tmax (°C) + 273,16
T <sub>min</sub> , K	Temperatura mínima k	°C	Tmin(°C) + 273.16
T <sub>med</sub>	Temperatura media del aire	°C	
T <sub>max</sub>	Temperatura máxima del aire, expresada en [°C]	°C	DF
T <sub>min</sub>	Temperatura mínima del aire, expresada en [°C]	°C	DF
U <sub>2</sub>	Velocidad del viento a 2 m de altura	m/s	DF

Abreviatura	Término
CAQ	Cascarilla de arroz quemada
CAM	Centro Agropecuario Marengo
CE	Conductividad Eléctrica
cv.	Cultivar
FAO	Food and Agriculture Organization
ET	Evapotranspiración
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiration de referencia
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiration de cultivo
OMS	Organización Mundial de la Salud
pH	Potencial de hidrogeniones
RAS	Relación Adsorción Sodio



## Introducción

El sector floricultor se consolida como el primer renglón de exportaciones agrícolas no tradicionales de Colombia ya que se encuentra entre los mayores exportadores de flores de corte en América Latina y el segundo productor y exportador mundial (Cámara de Comercio de Bogotá, 2008), con presencia del 15,2% en el mercado global (Asocolflores, 2016). Colombia es el primer proveedor de Estados Unidos, a donde exporta el 76,2% de la producción, colocando en ese mercado dos de cada tres flores vendidas (Cámara de Comercio de Bogotá, 2008); para San Valentín se exportan 500 millones de flores. Se ubica al sector floricultor en el tercer renglón de importancia en las exportaciones nacionales, solo por detrás del petróleo y el café, con ingresos cercanos a los US\$785 millones y 129.000 t en el primer semestre del 2017 (Dinero, 2017). Las flores colombianas llegan a 90 países y las especies más apetecidas corresponden a rosa (22%), clavel (18%), crisantemo (16%) y otras (44%) (Asocolflores, 2016).

La Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores) representa el 75% de las exportaciones totales de flores de Colombia y reúne 272 empresas ubicadas en la sabana de Bogotá. En los últimos años el sector ha sufrido la revaluación del peso, perdiendo competitividad y el surgimiento de rivales fuertes como Ecuador (Dinero, 2017). La superficie de cultivo para la exportación representa aproximadamente 7.000 ha, ubicadas el 72% en Cundinamarca, el 27% en Antioquia y 1% en otras (Asocolflores, 2016).

Según cifras de Asocolflores, el impacto e importancia del sector floricultor permite que 600.000 colombianos dependan de sus exportaciones y se generen 130.000 empleos formales directos e indirectos en el 2015. La población más beneficiada son mujeres trabajadoras del área rural (65%), que en muchos casos son cabeza de hogar (Asocolflores, 2016).

Otras cifras mencionan que pese a la recesión económica, reflejada en el menor crecimiento anual del PIB, PIB agropecuario y PIB cultivos de otros productos agrícolas (incluido flores) desde el 2014, entre los cultivos permanentes las plantas vivas (flores) tiene un crecimiento positivo (DANE, 2017); tuvieron un aumento del

8% en valor y del 3,5% en términos de volumen comparando el primer semestre de 2016 y primero 2017; retornando la confianza entre los empresarios a pesar de ser un negocio frágil a la tasa de cambio (Dinero, 2017). Por otra parte, Cundinamarca contribuye con el 80,5% de la producción nacional, donde se produce principalmente rosa con el 29% de participación, seguida de clavel con 18,1% y la alstroemeria con 6,3% (Asocolflores, 2016).

El negocio de la floricultura ha requerido de diversificación y especialización como en el caso de los claveles que son apetecidos por Alemania, China y Singapur y el mercado Japonés que han ganado gran importancia (Dinero, 2017). De hecho, Colombia es considerada el principal exportador de clavel, según Asocolflores (2016).

Por otro lado, la ubicación ecuatorial de Colombia y de las áreas de cultivo (sabana de Bogotá y la zona de Rionegro, Antioquia), con tierras fértiles y adecuada temperatura (entre 13 y 21°C), sumando a una uniformidad del fotoperiodo ofrece las condiciones adecuadas para que haya producción durante todo el año, haciendo rentable el cultivo de las flores de corte entre otras razones por no ser necesario utilizar sistemas de control climático (calefacción o enfriamiento).

Como consecuencia del aumento progresivo en el área sembrada, también se ha presentado un aumento en el número de enfermedades, como resultado de la continua importación de material de propagación de diversos países del mundo, que en ocasiones ha resultado infestado por varios patógenos (Arbeláez, 2011). Dentro de esas enfermedades, las más importantes son las enfermedades vasculares por las altas pérdidas que ocasionan, por la facilidad de propagación a través de los esquejes, por su alta persistencia en el suelo y por el alto costo de algunas de las medidas de control utilizadas (Arbeláez, 2011).

Aunque se considera al sector floricultor dentro de los más avanzados en tecnología e innovación, debe moverse con variedades patentadas que se encuentren a la moda (Dinero, 2017), pero la incidencia cada vez mayor de *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi*, han popularizado los sistemas sin suelo; siendo la enfermedad con mayor incidencia con el 37,7% en las fincas colombianas (DANE, 2011).

La adopción de tecnologías como el fertirriego han generado estudios sobre la naturaleza de los sustratos, buscando optimizar sus características hidro-físicas, mitigar el impacto ambiental con la disminución del uso de agua y fertilizantes y, en consecuencia, reducir costos. Esta técnica, junto a la de recirculación del drenaje, es una de las estrategias y fortalezas del área ambiental en la floricultura de la sabana de Bogotá (Flórez *et al.*, 2006; González *et al.*, 2006; Parra y Flórez, 2006; Castellanos *et al.*, 2010; Barrientos *et al.*, 2011; Esmeral *et al.*, 2011; Pérez, 2011; Quintero *et al.*, 2011, 2012; Sandoval *et al.*, 2015; Vélez, 2012).

La alta riqueza de recursos hídricos de Colombia ha impedido que exista una conciencia real de la oferta del recurso y restricciones de acceso. Sin el conocimiento del valor estratégico del agua, es prácticamente imposible dimensionar las dificultades que puede tener el país para el abastecimiento hídrico hacia el futuro y el acometimiento de políticas y programas para su manejo sustentable. Este desconocimiento y la falta de conciencia reina en todos los niveles de la población y en especial en la dirección política del país y en los sectores productivos del mismo (Global Water Partnership South América, 2000).

En los últimos años, se han detectado daños ambientales provenientes de actividades agrícolas, como la pérdida de estructura en suelos, alta salinidad por uso indiscriminado de fertilizantes, contaminación de aguas por lixiviación de agroquímicos, inadecuado manejo de plagas y enfermedades, reducción progresiva del rendimiento y alto impacto sobre las fuentes de agua dulce. Por ejemplo, Reyes y Avendaño (2012) señalan que el crecimiento no controlado de la zona urbana, la industrialización, la contaminación del río Bogotá, el aprovechamiento agrícola no planificado, la variación en el régimen de lluvias, el pésimo manejo de desechos y los escasos mecanismos de control ambiental deterioran los suelos de la Sabana de Bogotá.

El actual sistema de cultivo de clavel en sustratos genera impactos ambientales negativos derivados del alto consumo de agua y vertimiento de sales fertilizantes al medio ambiente, por lo que es aconsejable la adopción de nuevas tecnologías que generen mayor eficiencia en el uso de los recursos y menor impacto ambiental.

Los sistemas de cultivo que utilizan técnicas de fertirriego producen pérdidas de agua y fertilización en los lixiviados con niveles del 20 y 50% del total de la solución fertilizante aportada (Schroder *et al.*, 1995). En la sabana de Bogotá se han reportado pérdidas por lixiviación en los cultivos en sustrato de clavel y rosa que emplean fertirriego, en aproximadamente un 30% del total de la solución nutriente utilizada (Flórez *et al.*, 2006).

En Colombia no se conoce registros certificados de prácticas estándar de aplicación de fertirriego proveniente de estudios de consumo de agua y fertilización, por lo que esta práctica podría estar generando sobrecostos por la aplicación rutinaria que se realiza. Tal como lo reporta Alarcón (2000b) los programas de fertilización en flores de corte se realizan con el concepto de concentración, porque no se tienen los conocimientos adecuados acerca de la demanda de la planta por unidad de área y tiempo de desarrollo. Para el manejo de la concentración de la solución nutritiva es importante realizar un diagnóstico basado en el análisis del sustrato, tejido foliar y drenaje, con el fin de hacer las correcciones respectivas en el manejo de los fertilizantes compuestos.

Por otro lado, la práctica de suministro de agua realizada por las empresas de flores en Colombia se calcula de forma empírica y todas las características hidro-físicas de los sustratos, que son necesarias y recomendadas para lograr un manejo apropiado del agua, son subestimadas imperando conocimientos de tanteo que han dado buena rentabilidad para el productor (González *et al.*, 2006). Esto continúa siendo así, porque de alguna manera, los costos de producción inherentes a la aplicación de fertirriego son desconocidos, enmascarados o sencillamente difíciles de obtener a partir de la información proveniente de los productores. Este constituye uno de los elementos para tener en cuenta en futuras investigaciones sobre aplicación de agua en flores de corte.

En líneas generales, se conoce que la aplicación de fertirriego en clavel (Castellanos *et al.*, 2010) y rosa (Barrientos *et al.*, 2011) muestran cifras de costos de fertirriego entre el 5 y 8% de la producción. No se presentan otros costos involucrados como



los relacionados con el uso de mano de obra, tecnología, uso de energía y el mismo costo del agua.

Castellanos *et al.* (2010) señalan que los costos de fertilizantes representan el 15% de los costos totales de producción del clavel. Sin embargo, es muy notorio que estas investigaciones no tienen en cuenta el valor del agua *per se*. Dentro de la estructura de los costos de producción no se consideran los costos de consumo de energía o combustibles para riego, tecnificación de los sistemas de fertirriego, o mano de obra empleada para dichas labores.

A pesar de ser una industria con aproximadamente 50 años de establecimiento en la sabana de Bogotá, todavía no existe una práctica estándar de aplicación de fertirriego proveniente de estudios de consumo de agua, evapotranspiración y fertilización. En general, lo que se utiliza es el conocimiento experto, lo que puede estar generando sobrecostos por la aplicación rutinaria que se realiza.

A pesar de las ventajas competitivas que tiene Colombia en la exportación de clavel, la implementación de nuevas tecnologías es preponderante para maximizar los recursos hídricos y el control de las bondades climáticas para la sostenibilidad del cultivo; es por esto necesario evaluar los alcances y limitaciones que pueden llegar a tener estas técnicas sobre nuestros sistemas de producción.

# Objetivos

## General

Analizar el comportamiento de parámetros nutricionales en plantas de clavel cv Rony sembradas en un sistema del cultivo en sustrato a primer pico de producción, con y sin el uso de lisímetro de pesada.

## Específicos

Determinar la extracción total de nutrientes en plantas de clavel cv Rony sembradas en un sistema del cultivo en sustrato a primer pico de producción, con y sin el uso de lisímetro de pesada.

Generar curvas de absorción de nutrientes en plantas de clavel cv Rony sembradas en un sistema del cultivo en sustrato a primer pico de producción, con y sin el uso de lisímetro de pesada.

Conocer el comportamiento de macroelementos y elementos secundarios en sustrato y lixiviado en plantas de clavel cv Rony sembradas en un sistema del cultivo en sustrato a primer pico de producción, con y sin el uso de lisímetro de pesada.

Analizar el comportamiento de parámetros nutricionales (pH, CE, relación C:N, CIC) en el sustrato del sistema del cultivo en plantas de clavel cv Rony a primer pico de producción, con y sin el uso de lisímetro de pesada.

# Revisión de literatura

## Función de los Nutrientes

Los nutrientes minerales participan en el metabolismo vegetal cumpliendo funciones específicas y esenciales como constituyentes de estructuras orgánicas, activadores de reacciones enzimáticas, portadores de carga y osmorreguladores. Entre sus propiedades se incluyen las funciones descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los nutrientes minerales según su función bioquímica

Nutriente	Función
<b>Grupo 1 Nutrientes que forman compuestos orgánicos</b>	
N	Constituyente de los aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, hexoaminas, entre otros.
S	Componente de la cisteína, cistina y metionina y de las proteínas, Constituyente del ácido lipoico, coenzima A, tiamina pirofosfato, glutatión, biotina, adenosina-5'-fosfosulfato y 3-fosfoadenosina.
<b>Grupo 2 Nutrientes que son importantes en el almacenamiento de energía o en la integridad estructural</b>	
P	Componente del ATP, ácidos nucleicos, nucleótidos, coenzimas, fosfolípidos, ácido fítico.
B	Forma complejos con manitol, mananos, ácido polimanurónico y otros constituyentes de la pared celular, involucrado en la elongación celular y en el metabolismo de los ácidos nucleicos.
Si	Se deposita como silica-gel amorfa en la pared celular, contribuye con las propiedades mecánicas de la pared celular, como la elasticidad y la rigidez.
<b>Grupo 3 Nutrientes que permanecen en forma iónica</b>	
K	Requerido como cofactor por más de 40 enzimas. Principal catión en el establecimiento del turgor celular y en el mantenimiento de la electroneutralidad.

Na	Involucrado en la regeneración del fosfoenolpiruvato en las plantas C4 y CAM. Sustituye al potasio en algunas funciones.
Mg	Requerido por muchas enzimas involucradas en la transferencia de grupos fosfato. Constituyente de la molécula de clorofila.
Ca	Constituyente de la lámina media de la pared celular. Requerido como cofactor por algunas enzimas involucradas en la hidrólisis del ATP y fosfolípidos. Actúa como segundo mensajero en la regulación metabólica.
Mn	Requerido para la actividad de algunas deshidrogenasas, descarboxilasas, quinasas, oxidasas, peroxidasas. Involucrado con otros cationes en la activación de enzimas y en la producción de O <sub>2</sub> en la fotosíntesis.
Cl	Requerido en las reacciones fotosintéticas involucradas en la producción de oxígeno.
<b>Grupo 4</b>	<b>Nutrientes involucrados en la transferencia de electrones</b>
Fe	Constituyente de los citocromos y de las proteínas no hemínicas involucradas en la fotosíntesis, fijación del N <sub>2</sub> , y la respiración.
Cu	Componente de la ácido ascórbico oxidasa, tirosinasa, monoamina oxidasa, uricasa, citocromo oxidasa, fenolasa, lacasa y plastocianina.
Zn	Constituyente de la alcohol deshidrogenasa, glutámico deshidrogenasa, anhidrasa carbónica, entre otras.
Mo	Constituyente de la nitrogenasa, nitrato reductasa, y xantina deshidrogenasa.
Ni	Constituyente de la ureasa. En las bacterias fijadoras de N <sub>2</sub> , constituyente de las hidrogenasas.

---

Fuente: Bonilla (2000); Salisbury y Ross (1992); Epstein y Bloom (2005).

### **Curvas de extracción**

Para propiciar la máxima expresión del potencial productivo de los cultivos es importante generar y aplicar prácticas de manejo, tendientes a aprovechar al máximo los insumos proporcionados. En este contexto, el manejo de la nutrición de las plantas es un aspecto crucial desde el punto de vista fisiológico y económico (Quesada y Bertsch, 2013), pues en la producción agrícola es mandatorio aprovechar al máximo toda la expresión del potencial genético de la plantas. La

fertilización, como parte de la nutrición vegetal, tiene como fin lograr que el aporte de nutrimentos a la planta satisfaga los requerimientos del cultivo. Por su relevancia, a la nutrición se le considera como el factor de producción más importante después de la disponibilidad de agua. La fertilización es un rubro de alto valor económico y no es aceptable desde este punto de vista desbalances nutricionales en la industria de producción en invernaderos tecnificados (Sonneveld y Voogt, 2009).

Los estudios de demanda nutrimental contabilizan los requisitos de cosecha, la extracción total o el consumo de nutrimentos que efectúa un cultivo en particular para completar su ciclo de producción. Las curvas de extracción son parte de estos estudios y permiten el conocimiento de la demanda de nutrimentos de acuerdo con la etapa fenológica de un cultivo; son muy útiles para establecer programas de fertilización ya que permiten un ajuste más preciso con el fin de maximizar la eficiencia de la fertilización en el ciclo del cultivo (Bertsch, 2003), especialmente si se acompaña de la técnica del fertirriego (Sandoval *et al.*, 2007). Con base en las curvas de absorción se han sugerido numerosos programas de fertilización confiables en cultivos de alto valor económico (Bertsch, 2003; Azofeifa y Moreira, 2005). La construcción de las curvas de extracción se lleva a cabo mediante muestreos secuenciales de la biomasa total. Cada muestreo debe ser representativo de una etapa particular en el desarrollo fenológico de la planta, de manera que se pueda definir la cantidad de nutrimentos que ella requiere diariamente durante su ciclo de crecimiento; teóricamente esta es la cantidad mínima de nutrimentos que deben suministrarse al cultivo (Bertsch, 2003).

### **Asimilación de nutrientes en función de parámetros de nutrición mineral**

#### **pH, CE, CIC y Relación C:N**

##### **pH**

El pH es una medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia; mide la actividad de los iones H<sup>+</sup> y se expresa en términos logarítmicos. El significado práctico de la expresión logarítmica del pH es que cada cambio de una unidad en pH representa un cambio de una magnitud diez veces mayor en la acidez o alcalinidad. Su escala cubre un rango de 0 a 14; considerándose neutro un pH de

7,0, ácidos valores por debajo de 7,0 y básicos aquellos que están sobre 7,0. En la mayoría de los suelos productivos el pH fluctúa entre 4,0 y 9,0. Mientras mayor es el H<sup>+</sup> retenido por el complejo de intercambio, mayor será la acidez del suelo.

Las plantas pueden desarrollarse en un amplio rango de pH (4-8) en un medio de crecimiento (sustrato o suelo) sin mostrar desordenes fisiológicos. Sin embargo, el crecimiento es afectado en condiciones extremas de acidez o alcalinidad. El pH del medio influencia la disponibilidad de nutrientes, capacidad de intercambio catiónico y actividad biológica. El pH óptimo para cultivos de plantas ornamentales creciendo en medios sin suelo está en el rango de 5,2 y 6,3; mientras que para hortalizas el rango óptimo está entre 5,5 y 6,8. (Kafkafi y Tarchitzky, 2011). Según Ortega (1997), los rangos de pHs óptimos para el crecimiento de plantas ornamentales está entre 5,5 y 7,5; indicando un pH óptimo para el cultivo de clavel de 6,2. pHs alcalinos (valores superiores a 7,5 - 8) generan problemas de absorción de P, Fe, Mn, B, Zn y Cu; pHs ácidos (valores por debajo de 5) generan problemas de absorción en N, K, Ca, Mg y Mo (Kafkafi y Tarchitzky, 2011).

El valor de pH durante el ciclo de cultivo varía, siendo la principal razón para esta variación la diferencia entre la absorción de aniones y cationes. La absorción de aniones está relacionada directamente con la emisión de HCO<sub>3</sub> u OH por parte de las plantas, mientras la absorción de cationes es relacionada directamente con la emisión de H<sub>3</sub>O; generándose así un aumento o disminución del pH acorde al proceso dominante. Si la absorción de cationes excede la absorción de aniones el pH en la rizosfera decrece y de forma contraria cuando la absorción de aniones supera la absorción de cationes el pH aumentará (Sonneveld y Voogt, 2009). Adicional a esto para cada nutriente se generan procesos diferentes según sus características químicas y relación con el nivel de acidez o alcalinidad del medio, es así como para el caso del nitrógeno la nitrificación y la fijación del nitrógeno atmosférico, solo se produce cuando el pH es superior a 5; y la aminización y amonificación se reducen considerablemente a pH más bajos (Navarro y Navarro, 2003). La solubilidad de las sales amónicas y nítricas es elevada en todo el intervalo de pH que puede presentar el medio (Navarro y Navarro, 2003). Sin embargo, de acuerdo con información recopilada por Nommik (1957), citado por Fageria (2009),

el incremento en el pH aumenta la fijación de  $\text{NH}_4$ . Este efecto se atribuye generalmente a que disminuye la competencia con hidronio cuando el pH se incrementa en un rango de pH de 2,5 a 5,5.

Cuando la absorción de amonio excede la absorción de nitrato, disminuye el pH de la solución, y la absorción de la mayoría de los micronutrientes aumenta; y, cuando la absorción de nitrato excede la de amonio, el pH de la solución del suelo aumenta y disminuye la absorción de la mayoría de los micronutrientes (Fageria, 2009).

La absorción de los iones nitrato y amonio pueden cambiar el pH de la rizosfera hasta en dos unidades hacia la acidez o hacia la alcalinidad en comparación con el pH del suelo (Mengel *et al.*, 2001); este cambio en el pH puede influir en la absorción de otros nutrientes esenciales para las plantas a partir de la solución. De acuerdo con Riley y Barber (1971), citados por Fageria (2009), como consecuencia de la disminución del pH de la rizosfera por amonio, aumenta la fijación de fosfatos. Con pH inferior a 6,5, la disponibilidad del fósforo disminuye debido a que el hierro y el aluminio se encuentran más solubilizados cuanto menor es el pH, provocando la precipitación del fósforo como fosfatos insolubles. Mientras que a pH 6,5, las cantidades de hierro y aluminio solubles son muy pequeñas, por lo que la precipitación se reduce. Entre 6,5 y 7, la utilización de fósforo es máxima; entre tanto, a pH superior a 7,5 el calcio provoca su precipitación y por lo tanto su insolubilidad (Navarro y Navarro, 2003 y Fageria, 2009). Y con pH superior a 8,5, el exceso de sales sódicas contribuye a su solubilización (Navarro y Navarro, 2003).

En cuanto a la solubilidad del potasio y de los compuestos de azufre, al igual que en el caso del nitrógeno, es alta en todos los valores de pH considerados, aunque en condiciones muy ácidas la cantidad de azufre disminuye debido a las pérdidas por lixiviación. Calcio y magnesio son más asimilables a valores de pH elevados; alta acidez provoca su lixiviación, lo cual justifica su menor disponibilidad en estas condiciones (Navarro y Navarro, 2003). Con pH menor a 6, la mayoría del calcio adsorbido sigue siendo intercambiable, pero a medida que el pH aumenta, más cationes divalentes se adsorben específicamente y por lo tanto ya no son intercambiables. La absorción de cationes a pH bajo es menor que a mayores

valores de pH, y la absorción de calcio se deprime más que la absorción de otros cationes (Marschner, 2012).

El pH del suelo no solo está relacionado con la naturaleza de los cationes adsorbidos si no también con las cantidades relativas de cada uno de ellos. A este respecto, es destacable la presencia de  $\text{Na}^+$  el cual se puede considerar como el más activo en lo que se refiere a la alcalinidad; le sigue el  $\text{Ca}^{2+}$ , mientras que el  $\text{Mg}^{2+}$  y el  $\text{K}^+$  presentan menor influencia. Así, los suelos saturados de  $\text{Na}^+$  tienen pHs más altos que cuando lo están por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Navarro y Navarro, 2003).

EL pH en un sistema de cultivo en sustrato varía durante el cultivo, estas variaciones están dadas por el pequeño volumen del sustrato, especialmente cuando se utiliza un sustrato con una capacidad amortiguadora baja. Los sustratos orgánicos tienen una mayor capacidad buffer que los sustratos de minerales inertes (Penningsfeld, 1978, citado por Kafkafi y Tarchitzky, 2011). Cuando el pH de un medio orgánico no está en el nivel apropiado es requerido su ajuste. La piedra caliza molida o el uso de dolomita incrementan el pH en sustratos ácidos, mientras que el sulfuro es usado para disminuir el pH en sustratos alcalinos. Las cantidades a ser aplicadas dependen del valor inicial de pH y el valor final requerido, además de la CIC del medio del sustrato. Los pH neutros o alcalinos en sustratos inertes pueden ser regulados acidificando la solución de fertirriego. La dosis de ácido aplicada a la solución depende de la calidad de agua o específicamente de la concentración de carbonatos y bicarbonatos reportados en el agua de riego (Kafkafi y Tarchitzky, 2011).

### **Relación C:N**

Se suelen utilizar algunos parámetros como indicadores del estado de descomposición de la materia orgánica, estos se denominan parámetros de madurez y, a su vez, pueden ser de carácter químico: relación carbono/nitrógeno, (C:N), o de carácter biológico: técnicas respirométricas (Burés, 1997).

La relación C:N se usa tradicionalmente como un índice del origen, del grado de madurez y de la estabilidad de la materia orgánica, este parámetro decrece a medida que se descompone la materia orgánica, generando valores en un rango de



5 a 30 (Chen e Inbar, 1985; de Kafkafi y Tarchitzky, 2011). Tomando valores por debajo de 20 cuando ya el material es relativamente estable ante procesos de descomposición (Terés, 2001).

La descomposición microbiana de materiales con altas relaciones C:N inducen fijación de N por los microorganismos, decreciendo el N disponible para las plantas en el medio de crecimiento (Terés, 2001).

Diferentes medios de crecimiento tienen diferentes relaciones C:N, como es mostrado en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de la relación C:N en diferentes materiales.

Material	C:N
Corteza fresca	75- 110
Corteza de madera compostada	30-40
Turba	50
Hojasca de pino	25
paja de cereal	100
Cascarilla de arroz	95
Champiñonaza	40
Restos de poda	75
Caña de maíz	150
Fibra de coco	80

Fuente: Kafkafi y Tarchitzky (2011); Quintero *et al.* (2011); Fonteno (1999).

Cuanto más bajo es el valor del cociente más mineralizado está el material, Ansorena (1994), citado por Quintero *et al.*, 2011 propone los siguientes intervalos para caracterizar el material: <20 bueno; 20-25 aceptable; 25-30 deficiente >30 malo.

### **Capacidad de intercambio catiónico - CIC**

La CIC es la cantidad total de cationes intercambiables que un material particular puede adsorber a un pH determinado. Esta propiedad juega un papel muy importante en la reserva de nutrientes disponible para la planta, ya que los iones

adsorbidos por el medio son protegidos de procesos de pérdidas como la lixiviación. La CIC es expresada en términos de meq por unidad de peso, esta medida en sustrato de tipo orgánico varía de acuerdo con el pH del medio, madurez del mismo y tamaño de partícula, y se emplea como base para calcular la saturación de las bases (Kafkafi y Tarchitzky, 2011).

La CIC de las sustancias húmicas en un medio de crecimiento orgánico se incrementa en  $0,3 \text{ meq g}^{-1}$  cuando el pH de la solución incrementa una unidad; mientras que en sustratos inorgánicos, el incremento en la CIC es de  $0,044$ . Dependiendo de la utilización del sustrato así debe ser su capacidad para retener nutrientes. Cuando se usa fertirrigación continua (aplicación de nutrientes cada vez que se riegue), la CIC debe ser nula o un máximo de  $20 \text{ meq } 100\text{g}^{-1}$  puesto que se debe evitar una acumulación de sales. Cuando se usan sustratos inertes, la nutrición de la planta debe aportarse por completo a través de la solución nutritiva, lo que trae consigo la posibilidad de un control preciso sobre la nutrición mineral, según especie, momento fenológico o características climáticas. Estos controles se llevan a cabo realizando análisis químico de la solución de drenaje o de la solución extraída del sustrato, comparándola con la aplicada inicialmente y estableciendo diferencias que determinen cuales son los nutrientes que la planta va tomando, con lo que se puede ajustar la solución nutritiva a los requerimientos de la planta, teniendo seguridad de que el sustrato no está reteniendo ningún tipo de nutriente que altere resultados (Abad, 1998).

Para Ansorena (1994), la capacidad de retención de nutrientes, medida a través de la CIC, dependerá fundamentalmente del contenido y composición de la materia orgánica y arcilla de la fase sólida, aunque otros aditivos naturales (vermiculita, zeolitas, lignito, entre otros.) también contribuyen a la misma. Si bien las plantas pueden cultivarse satisfactoriamente en un intervalo amplio de CIC, y salvo alguna excepción (como fertirrigación), generalmente el manejo es más fácil cuando el sustrato tiene un cierto valor de CIC.

Sonneveld y Voogt (2009) resumieron los valores de CIC de diferentes materiales utilizados en la siembra de cultivos sobre sustrato, como se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3.** Capacidad de intercambio catiónico de diferentes tipo de sustratos y constituyentes de sustratos.

<b>Material</b>	<b>CIC (mmol kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Referencia</b>
Humus	2000	Bunt (1988)
Turba	560–1580	Lamaire (1995); Lamaire (1998); Puustjärvi (1977)
Polvo de Fibra de Coco	350–600	Evans <i>et al.</i> (1996); Verhagen (1999)
Aserrín	100	Jokova <i>et al.</i> (1997)
Compost (fresco)	270–1080	Jokova <i>et al.</i> (1997); Lamaire (1998) Chen <i>et al.</i> (1989); Jokova <i>et al.</i> (1997);
Compost (estable)	640–1810	Lamaire (1998)
Arcilla	100–300	RHP (2007)
Vermiculita	390–530	Van der Mark (2008)
Perlita	10–70	Bunt (1988); Gizas <i>et al.</i> , (2001); Lamaire (1995)
Zeolita	400–1200	Stamatakis (2001); Maloupa (2002)
Toba	70–600	Silber <i>et al.</i> (1994)
Piedra Pomez	60–80	Gizas <i>et al.</i> (2001)
Lana de Roca	0	Lamaire (1995)

Fuente: Sonneveld y Voogt, 2009.

La CIC entre materiales muestra grandes diferencias y también se reportan rangos muy amplios para cada material. Esto puede ser explicado por factores relacionados con el método de determinación aplicado, el grado de madurez, el estado hídrico, el tamaño de partícula y el pH del sustrato en el momento de la evaluación (Kafkafi y Tarchitzky, 2011).

### **Conductividad Eléctrica - CE**

La CE expresa de una manera aproximada la concentración de sales ionizadas en el agua de riego, en la solución, en extracto de pasta de suelo o en sustratos saturados (Cabrera *et al.*, 2017).

Las sales son compuestos que se forman de una reacción química entre ácidos y bases que disocian en una solución acuosa. Todos los nutrientes del suelo que estén disponibles para absorción reciben el nombre de sales solubles, ((Abad (1993), citado por Abad *et al.* (2005)). Y el concepto salinidad hace referencia a la presencia de cantidades excesivas de sales solubles, donde los iones Na, Ca, Mg, Cl y SO<sub>4</sub> son los principales involucrados (Ulloa *et al.*, 2006).

Los aniones de la sal (por ejemplo Cl<sup>-</sup>) y los cationes (por ejemplo Na<sup>+</sup>) presentan en los líquidos las partículas que se difunden libremente y son la causa de su efecto osmótico (Ulloa *et al.*, 2006). La concentración total de sales genera un potencial osmótico en el medio, relacionado con la concentración iónica en la fase líquida (Burés, 1997).

Marschner (2012) afirma que en áreas salinas la planta enfrenta tres problemas: a) el déficit de agua (“estrés por sequía”) que sucede por el potencial hídrico negativo (más negativo que la rizósfera); b) la toxicidad iónica asociada con la toma excesiva de Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, especialmente; y c) el desbalance de los nutrientes minerales por la supresión en su toma o transporte en el tallo y la desigual distribución principalmente del Ca<sup>2+</sup> en la planta.

Para Grattan y Grieve (1999) y Cabareño *et al.* (2004) el exceso de salinidad en el suelo puede afectar 1) la disponibilidad de nutrientes, 2) la toma de nutrientes y/o su distribución dentro de la planta y 3) el aumento de los requerimientos internos de un nutriente por parte de la planta a través de una inactivación fisiológica.

Farnham *et al.* (1985), citado por Cabrera *et al.* (2017), mencionan que los tres iones más fitotóxicos en medios de crecimiento salino son Cl, Na y B. A pesar de que el Cl es requerido por la planta, altas concentraciones del mismo generan daños por toxicidad asociada a quemaduras en las hojas, necrosis marginal, abscisión y menor ganancia de biomasa, además del antagonismo en absorción con el nitrógeno nítrico, provocando deficiencias de nitrógeno y pérdida en velocidad de crecimiento (Marschner, 2012).

Según Ulloa *et al.* (2006), la causa primaria del daño por sales es la excesiva toma de Na<sup>+</sup> (toxicidad), más que el estrés hídrico. Este ion además de generar un efecto

fitotóxico tiene un efecto antagónico sobre el ion K debido a la similitud en el radio iónico hidratado de estos dos elementos, lo que hace difícil la discriminación para las proteínas transportadoras en el proceso de absorción (Marschner, 2012).

Para el caso del boro, aún siendo nutriente mineral esencial para el desarrollo de las plantas, su presencia en concentraciones altas en agua de riego con altos niveles de salinidad puede ser altamente tóxico para muchas especies ornamentales, provocando una acelerada absorción radicular en días calurosos y una posterior necrosis de los tejidos marginales. Adicional a esto tiene un efecto antagónico con el ion calcio (Marschner, 2012).

La forma en que responden las plantas a la salinidad varía en función de su edad, condiciones ambientales, manejo del cultivo y características de la especie. Las plantas que se desarrollan en medios ácidos tienen diversas composiciones iónicas y diferentes concentraciones de sales disueltas en solución; lo que varía según cambios en la fuente de agua, drenaje, evapotranspiración, y disponibilidad de solutos; además de la calidad de los fertilizantes, cantidad y frecuencia utilizada en el aporte de los mismos (Terés, 2001).

### **Generalidades de los sustratos**

Un sustrato es todo material sólido distinto del suelo, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular de la planta, desempeñando, un papel de soporte para la planta. El sustrato puede intervenir o no en el complejo proceso de la nutrición mineral de la planta (Ansorena, 1994).

Los sistemas que, sin utilizar el suelo, en su lugar usan un medio inerte, tal como grava, arena, turba, vermiculita, piedra pómez o aserrín, a los cuales se les añade una solución con los nutrientes esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo normal de la planta, se denominan cultivos sin suelo (CSS) o cultivos en sustratos (Alarcón, 2000b).

Los sustratos en la agricultura Colombiana anteriormente eran usados en su mayoría en cultivos de hortalizas, sin embargo en los cultivos de flores en el país se comenzó a implementar como una práctica cultural física para disminuir la presencia

del patógeno *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* causante de la marchitez vascular en el cultivo del clavel estándar y mini clavel. Otras de las razones para el uso de sustratos en flores, es que la utilización de sustratos permite manejar en cierto grado las entradas (fertirriego) y las salidas (lixiviados) del sistema, e identificar los posibles nutrientes retenidos por el sustrato y por la planta como parte de su nutrición, teniendo un mayor control con lo que se esperaba mejorar la calidad y los rendimientos. El cultivo en sustrato constituye una alternativa económicamente viable para controlar este tipo de problemas fitosanitarios (Quintero *et al.*, 2011). Para poder considerar como adecuado un sustrato tanto orgánico como mineral, según Burés (1997), deben cumplir con las características descritas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Algunas de las propiedades físicas, químicas y biológicas deseables en cualquier tipo de sustrato para ser utilizado en labores agrícolas.

Propiedades físicas	Propiedades químicas	Propiedades biológicas
1. Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible 2. Granulometría permite un volumen de aire entre 15 y 35% y de agua entre 20 y 60% en relación con el volumen total 3. Suficiente suministro de aire 4. Baja densidad aparente (entre 0,7-01 g cm <sup>-3</sup> ) 5. Porosidad alta entre el 80-85% y una densidad real entre 2,5-3 g cm <sup>-3</sup> 6. Estructura estable, que impida la contracción	1. Baja o apreciable CIC, dependiendo de que la fertirrigación se aplique permanente o de modo intermitente 2. Suficiente nivel de nutrientes asimilables 3. Baja salinidad 4. Elevada capacidad tampón, capacidad para mantener constante pH 5. Mínima velocidad de descomposición	1. Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos y sustancias fitotóxicas 2. Reproductividad-disponibilidad 3. Fácil de mezclar 4. Fácil de desinfectar- estabilidad frente a la desinfección 5. Resistencia cambios externos físicos, químicos y ambientales

Fuente: Burés (1997).

No obstante algunas de estas propiedades pueden variar dependiendo del uso del sustrato y del cultivo. Según Burés (1997), para garantizar el éxito de un cultivo sin suelo, el sustrato debe mantener sus propiedades físicas, químicas y biológicas en el tiempo o mejorarlas con el fin de establecer un manejo adecuado del cultivo. Además, los materiales del sustrato deben ser seleccionados teniendo en cuenta su disponibilidad, costo, facilidad de manejo, capacidad para ser reciclados,

optimización del manejo de agua y nutrientes, e impacto sobre el medio ambiente al momento de ser desechados.

Como uno de los sustratos de cultivo más comunes se utiliza la cascarilla de arroz, directamente, o tras sufrir un proceso de descomposición o quemado. La cascarilla de arroz tostada es considerada un buen material en su uso como sustrato (Papafotiou *et al.*, 2001), ya sea sola o mezclada con otros subproductos o compost (Guerrini y Trigueiro, 2004; Yahya *et al.*, 2009). Este material resulta ser un sustrato económico comparado con turba, lana de roca o perlita; y disponible, por ser un subproducto de la industria arrocera (Quintero *et al.*, 2006). A pesar de estas ventajas, y de ser el sustrato más comúnmente utilizado en Colombia, su manejo resulta complejo, en razón a que no se conoce lo suficiente sobre como varían sus propiedades a lo largo del ciclo de cultivo de clavel, en las condiciones de la Sabana de Bogotá. No obstante, se han venido realizando investigaciones enfocadas a la mejora del manejo de este sustrato (Quintero *et al.*, 2006; Quintero *et al.*, 2012).

En Colombia también se puede reutilizar la cascarilla tostada que ya ha salido de las camas de cultivo, tras un proceso de esterilización. Adicionalmente, existen métodos que buscan mejorar las propiedades de este material. En Corea del Sur se obtiene cascarilla expandida al someterla a altas temperatura y presión para hacer que explote o se expanda (Quintero *et al.*, 2012).

### **Generalidades del cultivo del clavel**


El clavel estándar y el clavel miniatura son una de las principales flores de corte dentro del comercio mundial. En la actualidad, Estados Unidos es el principal cliente de este tipo de flor y Colombia dedica más de 1.050 ha a este cultivo, es el principal productor y proveedor mundial (Dinero, 2017). La principal razón del liderazgo de Colombia es el alto requerimiento de mano de obra por parte del cultivo lo que ha generado su abandono en Holanda, California, España e Italia.

Los principales municipios productores de clavel se ubican en la Sabana de Bogotá: Madrid (125 ha), Funza (109 ha) y El Rosal (73 ha). La mayoría de la producción se exporta con un 99,8% en clavel y 85,3% para miniclavel (DANE, 2011). En miniclavel o spray se destaca por su importancia económica el cultivar Rony, al ser prácticamente el único color rojo que se cultiva actualmente.

El cultivo de miniclavel en Colombia se siembra en contenedores con sustrato y el fertirriego se realiza por goteo. La aplicación eficiente de fertirriego es necesaria para optimizar el consumo de agua y nutrientes. En el miniclavel se usa fertirriego haciendo riegos con bajos volúmenes (periodos cortos de tiempo de 2 a 8, minutos) y frecuentes, llamados pulsos de riego (Flórez *et al.*, 2006; Quintero *et al.*, 2011, 2012; Vélez, 2012; Sandoval *et al.*, 2015). En los cultivos de flores el costo del fertirriego representa alrededor del 5% de los costos de producción (Perfetti *et al.*, 2012).

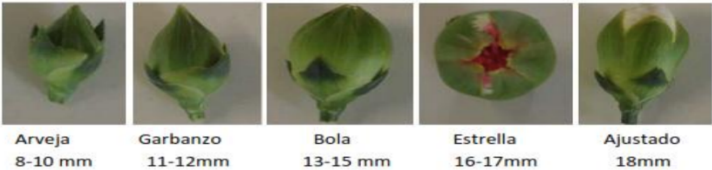
En la Tabla 5 se presenta un resumen de los principales características del clavel miniatura (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Rony. Para más detalles sobre el manejo del cultivo de clavel en un sistema de cultivo sin suelo se puede consultar a Flórez *et al.* (2006).

**Tabla 5.** Características del clavel miniatura cv. Rony (*Dianthus caryophyllus* L.).

 <p>Tallo floral. Fuente: Flores Aurora (2015)</p>		
Carácter	Características	Fuente
<b>Taxonomía</b>	Reino: Plantae Phyllum: Angiospermas Clase: Dicotiledóneas Subclase: Archiclamideas Orden: Centrospermales Familia: Caryophyllaceae Género: Dianthus	Larson (1992)



<p><b>Morfología</b></p>	<p>Base: leñosa con tallos (80 cm) altura</p> <p>Hojas: lineares, planas y blandas, acuminadas y glaucas, base envainada</p> <p>Flores: en grupos de 1-5 (olorosas)</p> <p>Epicaliz: 4 o 6 brácteas anchas acuminadas</p> <p>Cáliz: 2,5 – 3,0 cm longitud, dientes triangulares</p> <p>Pétalos: dentados de forma irregular, no barbados, 1,0-1,5 cm de longitud, color rosado-púrpura, especies silvestres</p>	<p>Arreaza (2000)</p>
<p><b>Eco-fisiología</b></p>	<p>Origen mediterráneo, planta fotoperiódica de día largo y termoperiódica</p> <p>El fotoperiodo y la intensidad luminosa influyen en la longitud del tallo, como sobre la ramificación y el ritmo de crecimiento</p> <p>La producción de yemas florales depende de la intensidad de la luz y longitud del día (altas temperaturas)</p> <p>Tasa de desarrollo del botón floral relacionada con la temperatura (mínimo 8°C y máximo 25°C)</p> <p>Temperatura diurna entre 15-22°C y una temperatura nocturna (10 – 13°C)</p> <p>El porcentaje de humedad relativa óptima es de 60-80%</p> <p>Densidad de siembra: 35-45 plantas/m<sup>2</sup> con una producción de 200 tallos florales por m<sup>2</sup></p> <p>El pinch o despunte (sencillo, medio y doble) se hace entre la semana 4-6 y brotes laterales de las hojas inferiores (5 cm de largo)</p> <p>Periodo de crecimiento vegetativo, elongación y desarrollo de botones florales conlleva segunda floración (segunda cosecha)</p>	<p>Baudoin (2002)</p> <p>Arreaza (2000)</p> <p>Vélez (2012)</p> <p>Newman (1999)</p>
<p><b>Prácticas culturales</b></p>	<p>Siembra (semana 0)</p> <p>Pinzado (semana 4)</p> <p>Elongación (semana 13-20)</p> <p>Desbotone (semana 16-26)</p> <p>1a cosecha (semana 26-28)</p>	<p>Arreaza (2000).</p>

	2a cosecha (semana 44-60)	
<b>Agua de riego</b>	Factor determinante: la salinidad CE máxima es de 1,5 dS/m. Entre 2 y 3 dS/m, la producción se ve afectada puede generar problemas de toxicidad. Necesidades de agua 1.000 - 1.700 L/m <sup>2</sup> -año. Los volúmenes de riego pueden alcanzar los 150 L d <sup>-1</sup> en una cama de 30 m (15 m <sup>2</sup> ).	Quintero <i>et al.</i> (2011, 2012) Vélez (2012) Sandoval <i>et al.</i> (2015).
<b>Producción</b>	Propagación: esquejes de brotes (almacenados a 0,5-1°C) Plantación Despunte y desbotonado (se aumenta el riego, fertilización, fumigación y control de maleza) Corte de flor Poscosecha	Arreaza (2000).
<b>Fertilización</b>	Riego de 200 - 40 -180 de NPK, fraccionado en cuatro partes: antes de plantación, inicio de la elongación del tallo, inicio del brote del botón y en el botón.	Flórez <i>et al.</i> (2006)
<b>Estados de desarrollo del botón floral</b>	 <p>Arveja 8-10 mm    Garbanzo 11-12mm    Bola 13-15 mm    Estrella 16-17mm    Ajustado 18mm</p>	Flores Aurora (2015).

## Evapotranspiración de los cultivos

La evaporación y la transpiración son físicamente procesos similares. La evaporación es la conversión de agua a vapor y su subsecuente transferencia desde el suelo (sustrato) o agua superficial a la atmosfera; la transpiración es la evaporación desde la superficie de las plantas. La evapotranspiración (ET) es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación de una superficie evaporante (suelos, lagos, ríos, mares) y la transpiración de la planta (Allen *et al.*, 1998). Es muy complicado medir la evaporación separadamente de la transpiración en un suelo en donde estén

creciendo las plantas. Es por ello que normalmente se menciona el proceso combinado, es decir, evapotranspiración (ET). Droogers (2002) señala que la ET como componente del balance hídrico se constituye en un parámetro transcendental en la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos, así como en la programación de riego de los cultivos. Las unidades de medición de la ET son  $\text{mm día}^{-1}$  o  $\text{mm mes}^{-1}$  (equivalentes a  $\text{L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) o  $\text{L m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$  ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ mes}^{-1}$ )). Los mismos autores señalan que para que ocurran los procesos de evaporación y transpiración, se deben cumplir algunas condiciones:

- debe existir una fuente de energía sobre la superficie evaporante o transpirante. Un suministro de energía que provea el calor latente de evaporación. La fuente de energía es la radiación solar;
- debe existir un flujo de agua desde la superficie evaporante o transpirante. Una forma de transportar el vapor de agua lejos de la superficie evaporante. Ello lo garantizan el viento y los gradientes de humedad entre la superficie y el aire circundante;
- debe existir un suministro de humedad a la superficie evaporante, es decir, a través de la vegetación desde el suelo o directamente desde la superficie del suelo o del agua,

Los factores que intervienen en la ET están relacionados con las condiciones climáticas (radiación solar, flujo de calor, viento, humedad relativa y temperatura), y la relación del sistema suelo-planta-atmosfera. Los factores de clima proporcionan la energía necesaria para vaporizar el agua y extraer el vapor desde una superficie evaporante (suelo o vegetación) (Allen *et al.*, 1998; Baille, 1996; Brown, 2000).

Desde finales de la década de los años 40 se han desarrollado numerosos métodos que permiten estimar la ET en cultivos. Iniciando con los menos tecnológicos como los métodos basados en ecuaciones, cuyos valores son datos climáticos y evaporación de un cultivo de referencia, para calcular las necesidades hídricas de una plantación específica (Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006), fórmula de radiación de la FAO (Nandagiri y Koor, 2006) o evaporímetros Anderson (Messing *et al.*, 1998)), cuyos resultados en cuanto a evapotranspiración no son considerados

valores reales de un cultivo, sino aproximaciones a un comportamiento hídrico según condiciones climáticas, con las cuales es posible tomar decisiones sobre el manejo del agua, siendo métodos económicos y prácticos en campo (Casanova *et al.*, 2009). Sin embargo, tienden a considerar principios de forma generalizada, sin considerar de manera específica las características y la eficiencia del sistema suelo-planta-agua-clima a evaluar. Lo que si hacen los métodos de medición directa, por medio de la utilización de dispositivos que permiten estimar in situ el balance de masas del agua del suelo y de los solutos solubles y no solubles que son aplicados para el aprovechamiento de las raíces de cultivo (Gu, 2014; Gonzáles, 2017). Estos dispositivos reciben por nombre Lisímetros.

### **Lisímetros en la agricultura**

Gracias al interés por entender la forma en que las plantas usan el agua, se han generado variedad de herramientas, cuyo principio es la caracterización del balance hídrico generado entre la oferta de agua a las plantas, la absorción de la misma y el proceso de salida del sistema por evapotranspiración usando lisímetros como herramienta indicadora. Todo encaminado hacia la generación de eficiencia y economía en el uso del recurso hídrico en los procesos de producción agrícola, cuyo fin es ofertar el agua requerida en los tiempos requeridos, según la especie y variedad cultivada, ya sea en condiciones óptimas o en condiciones adversas de cultivo.

Los lisímetros han sido usados por muchos años para medir y estudiar el uso del agua en plantas, desarrollando coeficientes de cultivo y una estimación de evapotranspiración según etapa fenológica, todo esto con el objetivo de realizar programaciones de riego acordes a los requerimientos hídricos. Este equipo provee una medida directa de la cantidad de agua usada en evaporación y transpiración por aislamiento y monitoreo continuo de un área de cultivo (Fisher, 2012). Las mediciones son realizadas en el sitio del cultivo con las condiciones reinantes, sobre especies y variedades de interés según localidad, lo que lo convierte en un método directo de medición (Rodríguez y Pire, 2008).

Sánchez (1992) define el lisímetro como un recipiente cerrado lateralmente con un drenaje, donde se establece un cultivo de interés y se monitorea la variación del agua con respecto al tiempo mediante un balance hidrológico. Para determinar el incremento en la reserva de agua del suelo utilizable por las plantas, se pueden emplear los métodos de medición de humedad del suelo o medición del peso del medio de cultivo.

Según la forma de medición de la evapotranspiración existen dos tipos básicos de lisímetro: de no pesaje (gravimétricos o volumétricos), utilizados para el análisis químico de las aguas de drenaje, sin embargo en los volumétricos puede estimarse la evapotranspiración del cultivo al medir los cambios de humedad en el suelo por medio de sonda de neutrones o transductor de presiones; y de pesaje, utilizados para fines agrícolas (Poss *et al.*, 2004).

Los lisímetros volumétricos miden la evapotranspiración de manera indirecta, resolviendo la ecuación de balance hídrico en el suelo (Tuñón, 2000), la cual queda resumida de la siguiente manera:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio en contenido de humedad del suelo } (\Delta\theta)$$

Las entradas que pueden ser medidas son la precipitación (P), el riego (R), la escorrentía de entrada (Ei), el aporte por capilaridad (Ac).

Las salidas que pueden ser medidas son escorrentía de salida (Es) y percolación profunda (Pp).

El cambio en el contenido de la humedad del suelo ( $\Delta\theta$ ) puede ser negativo o positivo en función de si el suelo esta ganando o perdiendo humedad.

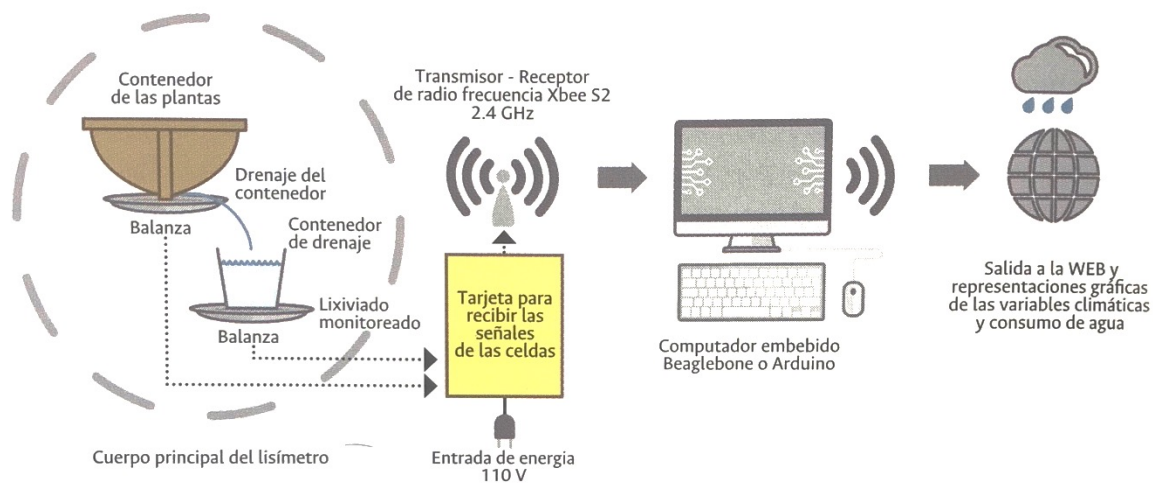
De esta forma la ecuación completa para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo monitoreado es de la siguiente forma:

$$\text{ET (mm): } [P + R + E_i + A_c] - [P_p + E_s] \pm (\Delta\theta * Pr)$$

Pr es la profundidad del suelo analizado.

Según el sistema de cultivo monitoreado será posible desprestigiar algunas variables en la ecuación según corresponda. Por ejemplo, un sistema desarrollado para cultivos en invernadero no calcularía precipitación, escorrentía y aporte por capilaridad (en sustratos), quedando las variables riego, contenido de humedad a través del perfil y drenaje interno o percolación profunda. Para mayor detalle consultar a González *et al.* (2017).

Por su parte los lisímetros de pesada generalmente tienen un sistema hidráulico o una celda de carga conectada a un sistema electrónico que permiten obtener la pérdida de peso del contenedor, midiendo directamente la evapotranspiración del cultivo (González *et al.*, 2017). Como es el caso del sistema UNLisitrón, equipo utilizado como base tecnológica del presente trabajo. Cuyos componentes se ilustran en la Figura 1.



**Figura 1.** Componentes del UNLisitrón. Fuente: González et al. (2017).

Este equipo cuenta con contenedor para plantas, contenedor para drenaje, cada uno con sus respectivas básculas y celdas de carga para cada contenedor, las cuales reportan de forma inalámbrica los datos a la tarjeta receptora, que a su vez reporta los datos al computador embebido conectado a la web. Haciendo posible la consulta de la información en tiempo real.

De esta misma forma se han desarrollado estudios en variados tipos de cultivo con diferentes tipos de lisímetros de pesada, los cuales han sido diseñados según las características del sistema en evaluación. Fisher (2012) describe el diseño de su lisímetro para medición de evapotranspiración en cultivo de algodón, en cuatro partes principales: un tanque interno, un tanque externo, un sistema de drenaje y las células de carga ensambladas. El tanque interno contiene un volumen de suelo y vegetación proveniente del campo; el tanque externo aísla el tanque interno de las condiciones de campo y provee una base para sostener las células de carga; los dos tanques son fabricados con láminas de acero en forma de U. Por su parte, el sistema de drenaje está instalado para evacuar los excesos de agua acumulados en el tanque interno.

El dispositivo de Fischer fue diseñado para evaluar la evapotranspiración en cultivos a campo abierto, monitoreando constantemente los cambios de peso del suelo y el cultivo, siendo este el mismo principio de los trabajos realizados en cultivos bajo invernadero creciendo sobre suelo, tal y como lo presenta Baptista y colaboradores (2005), quien diseñó un lisímetro de pesada para modelar la evapotranspiración de un cultivo de tomate con las siguientes características: Longitud de 1m, ancho de 0,8m, profundidad de 0,4m, construido y puesto en el centro del invernadero, en cuyo interior se sembraron cuatro plantas. El lisímetro fue cubierto con una película plástica en la superficie para evitar la influencia de condiciones climáticas en las mediciones.

El drenaje del agua fue descargado a través de un tubo conectado entre el lisímetro y un pluviómetro para realizar las medidas correspondientes al volumen drenado. La humedad del suelo fue medida con cuatro tensiómetros: dos dentro del lisímetro y dos fuera del lisímetro, tomando medidas con una frecuencia de 10 minutos por medio de un registrador de datos (Delta T-Devices). El agua del Lisímetro fue medida cada hora.

Con base en las medidas tomadas, se realizó el cálculo de la evapotranspiración, como se muestra a continuación:

$$EVT = I_r - D_r - \Delta S_{mc}$$

Donde,  $I_r$  es el agua suplida por el sistema de irrigación,  $D_r$  la cantidad de agua drenada y  $\Delta S_{mc}$  es la variación del contenido de humedad del suelo, todo expresado en  $L\ m^{-2}$  ( $mm\ H_2O$ ).

Por otro lado, la implementación de lisímetros en cultivos sin suelo creciendo en invernadero también ha sido reportada. Los trabajos realizados por Meijer *et al.* (1985) demostraron la eficiencia y alta precisión de esta herramienta para calcular la evapotranspiración de un cultivo de tomate sembrado en sustrato. El sustrato es utilizado por las características del equipo, debido a que su diseño consta de dos brazos, los cuales generan las medidas de peso por balance de presiones entre ellos. El brazo izquierdo se encarga de soportar un peso de referencia cuyo valor corresponde al peso inicial del brazo derecho, y el brazo derecho sostiene el sustrato con las plantas de cultivo sembradas en su interior. De esta forma, la variación en el peso de referencia es generado por dinámica hídrica y crecimiento del cultivo.

Diseños con menos complejidad han sido reportados para cultivos en invernadero sembrados en turba, tal y como es reportado por Medrano *et al.* (2005) para el cultivo de pepino, cuyo objetivo fue establecer la evapotranspiración en condiciones de baja y alta radiación. Para esto, diseñó un lisímetro con estructura metálica compuesta de un colector de drenaje puesto debajo del sustrato (perlita), sosteniendo un máximo de seis plantas. La estructura fue puesta sobre una balanza electrónica ( $150kg \pm 1\ g$ ) que trabajó bajo el principio de compensación de células de carga. La balanza fue puesta a una profundidad de 70 cm aislada térmicamente. El equipo fue puesto en la mitad de una fila de plantas de 20 m con cobertura plástica en la superficie de la turba. Los datos de peso fueron grabados cada 10 minutos con el programa BalanceLink mediante un registrador de datos.



Otro diseño más simple fue reportado por Casanova *et al.* (2009) en el cultivo de lechuga, los investigadores utilizaron mesones cubiertos con plástico, sobre los cuales instalaron 10 cilindros conectados a recipientes para la medición del agua percolada. Sobre los mesones fue puesta la turba y las plantas. La medición del volumen de drenaje se realizó cada día antes de calcular el volumen de riego propio del día, reponiendo las pérdidas calculadas.

La evapotranspiración fue calculada con la siguiente ecuación:

$$ET = \frac{I - (\Delta W + D)}{\Delta t}$$

Donde:

I: Agua aportada por irrigación

$\Delta w$ : Agua almacenada por el sustrato

D: Agua drenada

La versatilidad demostrada en el diseño de herramientas también contempla equipos instalados entre sistemas de alta tecnología, cuyo objetivo es irrigar un cultivo de forma automatizada, teniendo en cuenta los datos de consumo de agua en tiempo real. De esta forma lo presenta Beeson (2011), quien diseñó un contenedor de sustrato en forma de tripode o cuatripode colgado de una célula de carga, suspendido de una estructura de soporte. El tamaño de la estructura de soporte depende del tamaño de las plantas, generando la posibilidad de utilizar este dispositivo tanto en plantas pequeñas, como en árboles jóvenes según los objetivos a desarrollar.

Cada célula de carga es conectada a un registrador de datos referencia, la diferencia entre ambos registradores es el número de células que es posible

conectar, siendo 6 u 8 células respectivamente. Estos registradores son conectados a un circuito unido a un controlador, el cual controla las válvulas de riego según la configuración generada.

De esta forma es posible implementar un sistema por medio del cual se genere un completo análisis de la evapotranspiración de un cultivo durante su ciclo de desarrollo y, adicionalmente, generar aportes de agua según las necesidades hídricas de las plantas, por medio de sistemas de riego automatizados que respondan a los datos generados por lisímetros en tiempo real, manejo que genera alta eficiencia y economía en el uso del recurso hídrico.

# **Materiales y métodos**

## **Ubicación**

El ensayo se realizó en el lote 5 (4,7 ha) del Centro Agropecuario Marengo (CAM) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado a una altitud de 2543 msnm en la zona sur occidente de la sabana de Bogotá (Km 14 vía Bogotá - Mosquera), cuyas coordenadas geográficas corresponden a 74°12' Oeste y 4°72' Norte. La zona se ubica en la cuenca media alta del río Bogotá, con características de zona de vida correspondiente a bosque seco montano bajo (Bsmb), con promedios de temperatura y humedad relativa de 13,1°C y 80,7%, respectivamente; brillo solar diario medio 4,6 h, velocidad del viento 1,7 m s<sup>-1</sup> y precipitación anual media de 680 mm (CAM, 2010). Está en el área de captación del distrito de riego La Ramada, costado oriental de la sabana, limitando por el occidente con el Río Subachoque, el cual lo separa del distrito de Bojacá; al norte con la vía La Mesa - Funza y las ciénagas de Tres Esquinas y Gualí, y al oriente y el sur con el río Bogotá.

El ensayo se ubicó en una nave con dimensiones de 6,8 x 50 m, para un total de 340 m<sup>2</sup> de invernadero tradicional con estructura metálica, con ventilación lateral y cenital pasiva. Se contó con un tanque de 8 m<sup>3</sup> de capacidad de almacenamiento como fuente de agua, y sistemas de filtrado y fertirrigación.

## **Montaje de infraestructura**

En el lote 5 del CAM se iniciaron las obras de preparación del terreno, construcción de las camas de cultivo, y adecuación y montaje de las naves de invernadero. Para la preparación del terreno se utilizó un tractor con arado de disco y dos pases de rastra en un área de suelo de 50 x 42 m de ancho (2080 m<sup>2</sup>); para las camas de cultivo se contrató a la empresa Alma Ltda; y, por último, se adecuaron dos naves de 6,8 x 50 m (340 m<sup>2</sup>) de invernadero tradicional con estructura metálica y ventilación lateral y central pasiva (Figura 2a). El plástico para la cubierta del invernadero fue donado por la empresa Ciplas S.A.

Dentro de estas naves se construyeron 12 camas en madera, a doble contenedor (0,25 m de ancho y 0,15 m de profundidad cada uno), levantadas a 0,4 m del suelo, con 15 m de largo por 0,7 m de ancho (Figura 2b).

Se instaló una caja de control la cual distribuyó electricidad a las seis bombas utilizadas en el proyecto, en la que se permite el encendido de forma automática o manual. A su vez, se adecuó una toma eléctrica para conectar los lisímetros de pesada.

a



b



**Figura 2.** Vista general de las naves del invernadero tradicional con estructura metálica (a) y de las camas de cultivo construidas para el ensayo, en el lote 5 del CAM.

## **Instalación sensores climáticos e información meteorológica**

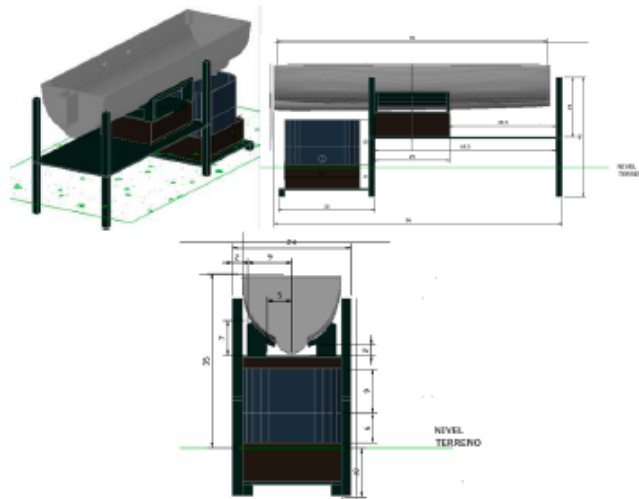
Para medir temperatura y humedad relativa dentro del invernadero se dispuso un data logger (marca Log Tag Analyzer).

### **Ubicación de lisímetros “UNlisitrón”**

Se realizó la instalación de los respectivos lisímetros en tres camas del cultivo, como se muestra en la Figura 3c. El lisímetro “UNlisitrón” consiste de un contenedor que tiene agujeros y desnivel de 1% para salida del lixiviado; con dimensiones de 1 m de largo por 0,25 m de ancho y 0,15 m de profundidad. Cuenta con un recipiente recolector de lixiviado con tapa de 0,25 m de lado por lado y 0,15 m de alto. La estructura está realizada en fibra de vidrio, para evitar su oxidación y reducir el peso al utilizarlo. El contenedor fue cubierto con una geomembrana de 0,5 m<sup>2</sup> (1,0 x 0,5 m), para poder aplicar el sustrato y evitar que los agujeros de drenaje de lixiviados se taponaran al llenarlo y aplicar el fertirriego.

En tres camas se adecuó 1 m del contenedor para la ubicación del lisímetro y su recipiente contenedor. Cada uno cuenta con una balanza que mide el volumen aplicado y drenado. La balanza del lisímetro pesa hasta 10 kg de fertilizante aplicado y la balanza del recipiente de drenaje pesa hasta 4 kg de volumen drenado. Para la correcta instalación del equipo se niveló el suelo y se colocó una base en hierro de 1 m de largo por 0,3 m de ancho. Los detalles del diseño e instalación del lisímetro se muestran en las ilustraciones 3a y 3b, respectivamente.

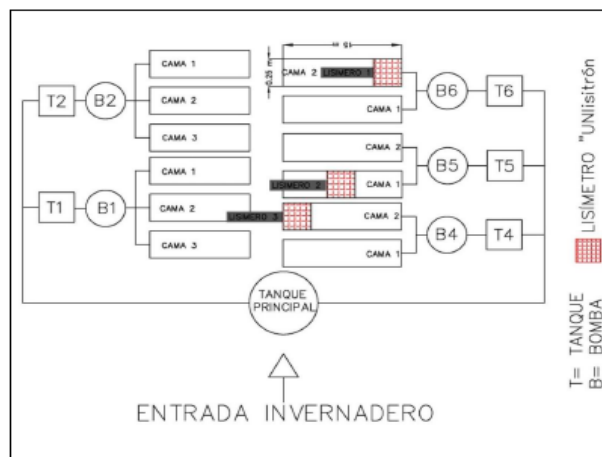
a



b



c



**Figura 3.** Diseño del sistema del lisímetro (a), detalle de su montaje en una cama de cultivo (b) y ubicación aleatoria de los equipos en el invernadero (c).

## **Instalación del sistema de riego**

Se utilizó agua proveniente del distrito de riego La Ramada previamente filtrada en la planta de tratamiento de agua del CAM, bombeada desde el cabezal de control hasta el tanque de almacenamiento de 8 m<sup>3</sup>, ubicado en el invernadero del ensayo. De esta forma se facilitó el almacenamiento y se garantizó el suministro de agua. A partir de dicho tanque, el agua cruda se envió a los tanques de preparación de la solución fertilizante presentes en cada una de las bombas alimentadoras del fertirriego de todo el experimento.

El diseño experimental condujo a la instalación de un sistema de bombeo independiente para cada una de las camas del experimento. Cada sistema fue operado con un programador automático de riego (controlador) tipo jardín. En el proyecto se utilizaron cuatro bombas de 1/2 HP, distribuidas de la siguiente forma: tres de ellas se adecuaron con sus respectivos accesorios para que cada una aporte el riego de dos camas de cultivo, a través de controladores de riego, según la información obtenida del lisímetro de pesada; la cuarta bomba se acondicionó para la cama testigo. Una quinta motobomba (1/3 HP) se utilizó para impulsar el agua del tanque de reserva a los tanques de mezcla y para la manguera con poma para hidratación del cultivo.

## **Material vegetal**

Se utilizaron esquejes con raíz de miniclavel cv. Rony, de color rojo, suministrados por la empresa Queens Flowers. Se sembraron 360 esquejes por cama, para una densidad de siembra de 24,7 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero. El sustrato utilizado para la siembra fue una mezcla de cascarilla de arroz reutilizada, cascarilla nueva y compost de residuos vegetales en porcentajes de 60, 30 y 10, respectivamente. Este sustrato fue donado por la empresa C.I. Florval.

Durante las dos primeras semanas de siembra se regó con agua y, en seguida, se aplicó la fórmula de fertirrigación comercial para la fase vegetativa hasta la semana 16 de cultivo; posteriormente, se realizó el cambio de fórmula de fertirriego para la fase productiva, empleándose el sistema de riego por goteo instalado.

## Fertirriego

La distribución del sistema de riego correspondió a dos líneas de goteo de 16 mm por cama, con goteros tipo autocompensado y caudal de  $1,1 \text{ L h}^{-1}$ , incorporados cada 15 cm. La Tabla 6 presenta la fórmula del programa de fertilización usada en el proyecto. Las soluciones fertilizantes fueron suministradas por la compañía Brenntag Colombia S.A.

**Tabla 6.** Fórmulas de fertirriego utilizadas en el ensayo con plantas de miniclavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada.

Elemento	Formula vegetativa (mg L <sup>-1</sup> )	Fórmula reproductiva (mg L <sup>-1</sup> )	Fuente
N	220	165	K (NO <sub>3</sub> ); Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; 5Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ; NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>
P	30	25	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ; CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> *H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
K	130	190	KNO <sub>3</sub>
Ca	120	120	5Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Mg	40	40	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Fe	3	2.5	EDTA Fe 13%; EDDHSA Fe 13%
Zn	0,5	1	EDTA Zn 15%
Cu	1	1	EDTA Cu 15%
B	2	1,5	Na <sub>2</sub> B <sub>8</sub> O <sub>13</sub>
Mo	0,1	0,1	Molibdato de amonio

La frecuencia de riego fue menor a un día, en función de los pulsos de riego aplicados, con volumen diferencial en el suministro de agua dependiendo de la semana de desarrollo del cultivo. A partir de la semana cinco, después de la siembra, hasta la semana 14, el promedio de solución nutritiva suministrado fue de 60 L/cama/día; en el periodo comprendido entre la semana 15 a 26 se incrementó a 80 L/cama/día y se finalizó con un promedio de 50 L/cama/día.

### VARIABLES EVALUADAS

Análisis de tejido en planta completa en las siguientes etapas del ciclo de cultivo: semana de siembra (semana 0), dos semanas después de pinch (semana 7), Transición de vegetativo a reproductivo (semana 14), pico de desbotone (semana



21) y punto de corte (semana 28); para un total de 30 muestreos durante el ciclo (5 muestreos \* 2 tratamientos \* 3 repeticiones). A su vez, se realizó medición de masa seca en planta completa y caracterización química de sustrato y de solución drenada en las mismas fechas.

### **Análisis de laboratorio**

Para el análisis de tejido foliar y sustrato después del muestreo se realizó un presecado a 65°C por una hora, se molió y posteriormente se secó a 105°C por una hora, finalmente se pesaron 0,1 g de muestra para el análisis. El método empleado para la determinación de nitrógeno en tejido foliar y sustrato fue nitrógeno total por Micro-kjeldahl.

Para las muestras de lixiviado, previo al análisis se realizó una dilución según la CE de la muestra, para que esta cumpliera con el protocolo del equipo de laboratorio. Para la determinación de nitratos se utilizó cromatografía de aniones.

Los métodos utilizados en la caracterización química de sustratos, lixiviados y tejido se describen en las Tablas 7, 8 y 9, respectivamente.

**Tabla 7.** Métodos empleados para la determinación nutricional en el sustrato utilizado en el ensayo con plantas de clavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada.

<b>Variable</b>	<b>Método de análisis</b>
N (nitrógeno total)	Micro-kjeldahl, valoración volumétrica
F (fósforo total)	Calcinación de la muestra a 475°C, valoración colorimétrica con vanadato y molibdato de amonio
Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn totales	Calcinación de la muestra a 475°C, espectrofotometría de absorción atómica
B (total)	Calcinación de la muestra, valoración colorimétrica con Azometina-H
pH	Potenciómetro, determinación en el extracto de saturación (relación peso :volumen 1:5)
CE	Lectura en conductímetro a 25°C en el extracto de saturación
CIC	Desplazamiento del NH intercambiado con NaCl 1M, valoración volumétrica

**Tabla 8.** Métodos empleados para la determinación de nutrientes en tejido foliar en el ensayo con plantas de miniclavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada.

Variable	Método de análisis
N (nitrógeno total)	Micro-kjeldahl, valoración volumétrica
F (fósforo total)	Calcinación de la muestra a 475°C, valoración colorimétrica con vanadato y molibdato de amonio
Ca, K, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn totales	Calcinación de la muestra a 475°C, espectrofotometría de absorción atómica
B (total)	Calcinación de la muestra, valoración colorimétrica con Azometina-H

**Tabla 9.** Métodos empleados para la determinación de nutrientes en el lixiviado en el ensayo con plantas de clavel cv. Rony, con y sin el uso del lisímetro de pesada.

Variable	Método de análisis
pH	Potenciómetro
F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sup>2-</sup> , NO <sup>3-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cromatografía de aniones
CE	Lectura en conductímetro a 25°C

### Cálculo de absorción de nutrientes durante el ciclo

Para realizar el cálculo de la cantidad de nutrientes absorbidos por una hectárea de cultivo a primer ciclo de producción en el sistema de producción de clavel cv Rony, se utilizaron las ecuaciones citadas por Bertsch (2003):

#### Elementos mayores y secundarios

$$\frac{kg \text{ Nut}}{Ha} = \frac{PS \left( \frac{kg}{Ha} \right) * \text{Nut \%}}{100}$$

#### Elementos menores

$$\frac{g \text{ Nut}}{Ha} = \frac{PS \left( \frac{kg}{Ha} \right) * \text{Nut} \left( \frac{mg}{kg} \right)}{1000}$$

## **Diseño experimental y análisis estadístico**

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con dos tratamientos (cama sin lisímetro - testigo comercial; y cama con lisímetro), con tres repeticiones, considerando una cama como repetición.

Para los resultados de las variables medidas se realizaron las pruebas de verificación de supuestos para análisis paramétricos y el análisis de varianza, usando el software estadístico SAS 9,0. Para las variables que mostraron evidencia de diferencias significativas, se aplicó una prueba de t-tukey al 5% de probabilidad.

## Resultados y discusión

Teniendo como referencia la dinámica del proceso de ahorro en fertirriego ilustrada en la tabla 10, se presentan los resultados obtenidos de nutrientes en tejido, sustrato y solución lixiviada en los sistemas de cultivo de miniclavel cv. Rony, con y sin lisímetro de pesada.

**Tabla 10.** Ahorro mensual de agua y nutrientes durante un ciclo de cultivo en el sistema de producción de miniclavel cv. Rony con lisímetro de pesada, en comparación con el manejo del fertirriego sin lisímetro de pesada.

<b>Semanas después de siembra</b>	<b>0 a 4</b>	<b>5 a 8</b>	<b>9 a 12</b>	<b>13 a 16</b>	<b>17 a 20</b>	<b>21 a 24</b>	<b>25 a 28</b>
Sin Lisímetro (L m <sup>-2</sup> )	36,76	59,56	80,54	79,30	45,22	48,73	48,47
Con Lisímetro (L m <sup>-2</sup> )	63,03	54,85	55,50	57,84	40,12	42,90	47,08
Ahorro de agua (%)	0	8	31	27	11	12	3

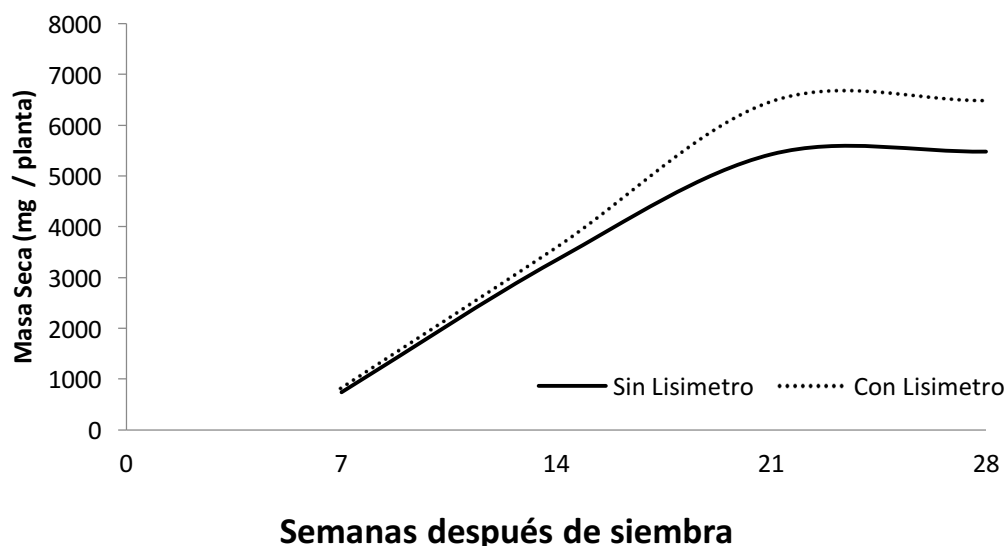
Con base en la información de la Tabla 10 se obtiene un ahorro promedio de agua y nutrientes del 13,2% para las 28 semanas de ciclo productivo. De los porcentajes de drenaje de 36,6% para el manejo sin lisímetro y de 26,8% para el manejo con lisímetro obtenidos durante el ciclo de cultivo se observa una disminución de 9,8% en el aporte de lixiviados con potencial contaminante al sistema suelo-subsuelo.

### Descripción de la caracterización química del tejido

#### Curva de ganancia en masa seca

En la Figura 4 se observa una tendencia de mayor acumulación de masa seca de la planta creciendo en el tratamiento monitoreado con lisímetro, en comparación con el manejo del fertirriego tradicional, sin diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre tratamientos. El resultado observado en el tratamiento sin lisímetro para ganancia de masa seca es acorde al comportamiento observado por Kelso *et al.* (2013) y López (2009), quienes presentaron una curva para clavel estándar sembrado sobre diferentes tipos de sustratos, mostrando que a las 25 semanas de cultivo el peso de la planta se encuentra en un rango entre 5 y 6 g en cada uno de los sustratos

evaluados. En cuanto al tratamiento con lisímetro, se evidencia una diferencia aproximada de 1 g de la semana 21 a la semana 28 frente al tratamiento sin lisímetro.



**Figura 4.** Curva de ganancia en masa seca en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo de fertirriego tradicional.

La diferencia en ganancia de masa seca entre los dos tratamientos podría deberse a la acidificación del sustrato en el tratamiento sin lisímetro, comparado con el tratamiento con lisímetro en las semanas 21 y 28, lo que podría generar un efecto negativo sobre la fotosíntesis y, por ende, menor síntesis, acumulación y translocación de fotoasimilados, tal y como lo afirma Dat *et al.* (2004), quienes corroboran que en condiciones de sobreoferta de agua existen cambios en el pH y en el potencial redox del suelo debido a cambio en la dinámica de  $H^+$  y en el balance de cationes, además de la solubilidad de metales pesados y fitotoxicidad por los mismos.

De este comportamiento se podría inferir que el manejo de agua comercial genera estrés a las plantas por aportar más agua de la que requieren, condición que limita crecimiento y acumulación de masa seca (Pezeshki, 2001; Li *et al.*, 2004). Este tipo de respuesta fue observado por Jia *et al.* (2014) y Gu *et al.* (2014), quienes afirman que plantas de trigo creciendo sobre lisímetros presentaron mayor crecimiento y acumulación de masa seca debido al aporte eficiente y preciso de agua y nutrientes, comparado con el manejo tradicional de dichos recursos en un tratamiento sin lisímetro.

### **Concentración y extracción de nutrientes en plantas de miniclavel**

En cuanto a la concentración de nutrientes por parte de la planta, en la Tabla 11 se muestra que se generaron diferencias significativas entre los dos manejos, con lisímetro versus el fertirriego tradicional, para nitrógeno, potasio y magnesio, cuyos valores son significativamente mayores en las plantas creciendo en el tratamiento con lisímetro en las semanas 28, 21-28 y 28, respectivamente. Entre los micronutrientes no se presentaron diferencias estadísticas.

**Tabla 11.** Promedios de acumulación de masa seca y de concentración de nutrientes en planta completa de miniclavel cv. Rony, comparados entre las mismas semanas para cada tratamiento (manejos de fertirriego con y sin lisímetro de pesada).

Tratamiento	Semana	Masa Seca (mg planta <sup>-1</sup> )	N	P	K %	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn mg kg <sup>-1</sup>	Zn	B											
Sin Lisímetro	0	29,5	a <sup>z</sup>	2,21	a	0,35	a	1,55	a	1,13	a	0,44	a	6,87	a	620,00	a	41,60	a	47,77	a	49,73	a
	7	745,6	a	3,60	a	0,70	a	3,34	a	1,58	a	0,51	a	16,80	a	143,67	a	76,43	a	57,47	a	54,63	a
	14	3346,2	a	2,58	a	0,60	a	3,81	a	1,25	a	0,40	a	8,65	a	235,67	a	106,67	a	104,40	a	83,13	a
	21	5425,5	a	2,60	a	0,58	a	3,45	b	1,04	a	0,39	a	8,58	a	254,33	a	94,53	a	91,07	a	57,63	a
	28	5480,7	a	1,82	b	0,62	a	3,52	b	1,23	a	0,34	b	7,07	a	132,00	a	71,40	a	53,43	a	59,70	a
Con Lisímetro	0	35,7	a	2,20	a	0,35	a	1,55	a	1,13	a	0,44	a	6,87	a	620,00	a	41,60	a	47,77	a	49,73	a
	7	819,2	a	3,49	a	0,66	a	3,23	a	1,75	a	0,51	a	16,75	a	149,97	a	77,49	a	59,95	a	57,65	a
	14	3583,8	a	2,47	a	0,50	a	3,73	a	1,43	a	0,44	a	9,31	a	201,67	a	77,60	a	98,93	a	84,23	a
	21	6460,6	a	2,91	a	0,60	a	3,72	a	1,06	a	0,43	a	8,78	a	255,33	a	106,70	a	88,21	a	59,64	a
	28	6479,9	a	2,03	a	0,57	a	3,84	a	1,28	a	0,40	a	7,64	a	123,00	a	56,37	a	46,97	a	62,83	a

<sup>z</sup> Promedios seguidos por la misma letra entre tratamientos no presentan diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

Generando un promedio de las mediciones realizadas con el objetivo de evaluar la concentración de cada uno de los elementos contenidos en tejido, y utilizando como referencia trabajos realizados en los últimos años por el grupo de investigación en Horticultura y otros investigadores (Rodríguez y Flórez, 2004; Amma *et al.*, 2008; Vélez *et al.*, 2014), en clavel sembrado en la sabana de Bogotá; se obtuvo para nitrógeno un promedio de 2,6%, en deficiencia en gran parte de las etapas evaluadas, exceptuando la evaluación realizada en la semana 7, correspondiente a desarrollo vegetativo, el cual reporta un valor máximo de 3,60% clasificado como normal; fósforo con un promedio de 0,55% se encuentra en exceso en la totalidad de las etapas evaluadas, sin embargo existen reportes que mencionan concentraciones entre 0,45% y 0,65% como niveles normales (Pérez, 2011; Hanan, 1998); potasio con un promedio de 3,19% en las etapas evaluadas se encuentra muy cercano al valor óptimo que es 4%; los elementos calcio y magnesio cuyos valores promedio son 1,28% y 0,43%, respectivamente, se encuentran en las cinco etapas evaluadas en un nivel normal.

En el caso de los elementos menores, los promedios generados muestran al elemento Cu en el valor mínimo del rango normal (8 - 30), teniendo dos semanas de deficiencia: cero y 28; el elemento hierro se encuentra en exceso en las cinco semanas evaluadas, con un promedio de 273,6 mg kg<sup>-1</sup>; el elemento manganeso se encuentra en deficiencia en cuatro de las cinco semanas evaluadas, con un promedio de 75,04 mg kg<sup>-1</sup>; Zn presenta un promedio evaluado como normal, presentando en exceso en las semanas 14 y 21; y, por último, el elemento boro presenta un promedio de 61 mg kg<sup>-1</sup>, clasificado como óptimo.

Teniendo como base los resultados de los análisis de tejido vegetal y las determinaciones de masa seca por planta en cada una de las semanas evaluadas es posible calcular los valores de absorción (kg ha<sup>-1</sup>) de cada uno de los elementos evaluados. Dichos valores son calculados a primer pico de producción, obteniendo con ellos la Tabla 12 y las tendencias observadas a través del tiempo en las figuras 5, 6 y 7, para los dos tratamientos con los grupos N, P, K; Ca, Mg; y microelementos.



Es posible observar en los dos tratamientos que la tendencia del nitrógeno es creciente hasta la semana 21, etapa en la cual el botón floral se encuentra en desarrollo; Navarro y Navarro (2003) mencionan que los mayores contenidos de nitrógeno en las plantas se encuentran en los tejidos jóvenes, pero a medida que la planta avanza en edad, la proporción de celulosa aumenta y el porcentaje de nitrógeno disminuye, y se eleva la relación C/N; desarrollándose este proceso en mayor proporción en etapa reproductiva. Concepto relacionado con la dinámica observada para este elemento.

Por su parte, el nutriente fósforo muestra en los dos tratamientos un comportamiento ascendente, lo que coincide con el reporte de Kleiber y Komasa (2008), quienes afirman que en plantas de Anturio el contenido de fósforo en tejidos foliares es ascendente durante todas las etapas evaluadas en su estudio, y que este elemento tiene una relación de acumulación positiva con el crecimiento vegetativo de las plantas, momento en el que se presenta la mayor pendiente de acumulación en tejidos. El nutriente potasio tuvo su mayor incremento en el paso de crecimiento vegetativo a crecimiento reproductivo, observación que coincide con lo reportado por Barrera-Aguilar *et al.* (2012) y Dufour y Guérin (2005), quienes hallaron en plantas de Anturio un aumento en el requerimiento de potasio en la fase de crecimiento reproductivo, cuando hay exportación intensiva hacia botones florales y posteriormente a flores en formación. De igual forma que lo reporta Pérez (2011) posterior a la formación de flor y hasta primer pico se presenta una ligera disminución del elemento en los tejidos de plantas de clavel creciendo sobre diferentes sustratos.

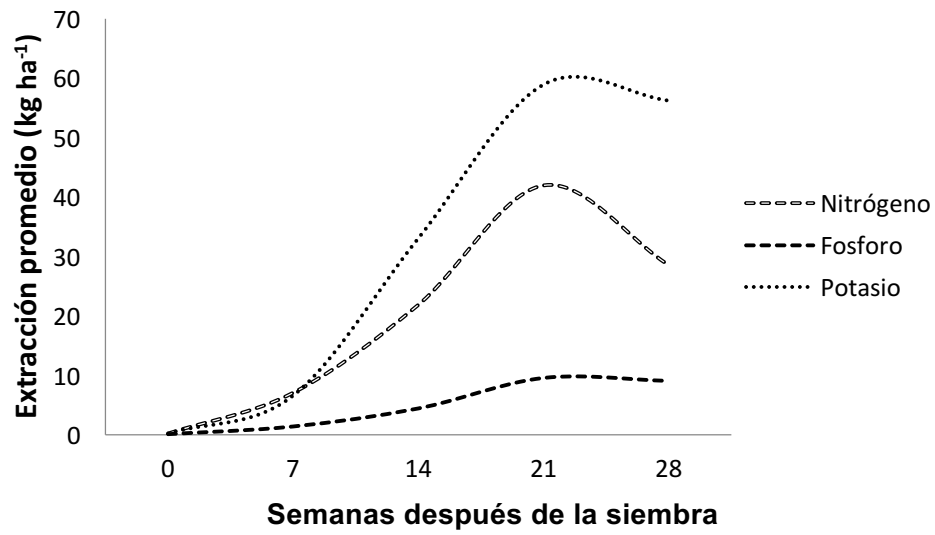
**Tabla 12.** Promedios de absorción de nutrientes en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustrato y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo del fertirriego tradicional.

Tratamiento	Semana	Masa Seca (kg ha <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
			(kg ha <sup>-1</sup> )					(g ha <sup>-1</sup> )				
Sin Lisímetro	0	6,93	0,15	0,02	0,11	0,08	0,03	0,05	4,29	0,29	0,33	0,34
	7	174,80	6,30	1,23	6,01	2,76	0,90	2,94	25,11	13,36	10,05	9,55
	14	784,45	20,24	4,68	29,89	9,81	3,14	6,79	184,87	83,68	89,74	65,21
	21	1271,91	33,11	7,38	43,88	13,19	4,96	10,91	323,49	120,24	115,83	73,30
	28	1284,84	23,38	7,97	45,23	15,76	4,41	9,09	169,60	91,74	68,65	76,70
<b>Total</b>		<b>3522,93</b>	<b>83,19</b>	<b>21,28</b>	<b>125,11</b>	<b>41,59</b>	<b>13,44</b>	<b>29,77</b>	<b>707,36</b>	<b>309,30</b>	<b>284,60</b>	<b>225,12</b>
Con Lisímetro	0	8,36a	0,18	0,03	0,13	0,09	0,04	0,06	5,18	0,35	0,40	0,42
	7	192,04	6,70	1,27	6,20	3,36	0,98	3,22	28,80	14,88	11,51	11,07
	14	840,16	20,75	4,17	31,34	12,04	3,70	7,82	169,43	65,20	83,12	70,77
	21	1514,57	44,07	9,09	56,34	15,45	6,51	13,30	386,71	161,60	133,60	90,33
	28	1519,09	30,84	8,61	58,33	19,49	6,08	11,61	186,85	85,63	71,35	95,45
<b>Total</b>		<b>4074,22</b>	<b>102,55</b>	<b>23,17</b>	<b>152,35</b>	<b>50,44</b>	<b>17,30</b>	<b>36,00</b>	<b>776,98</b>	<b>327,66</b>	<b>299,98</b>	<b>268,03</b>

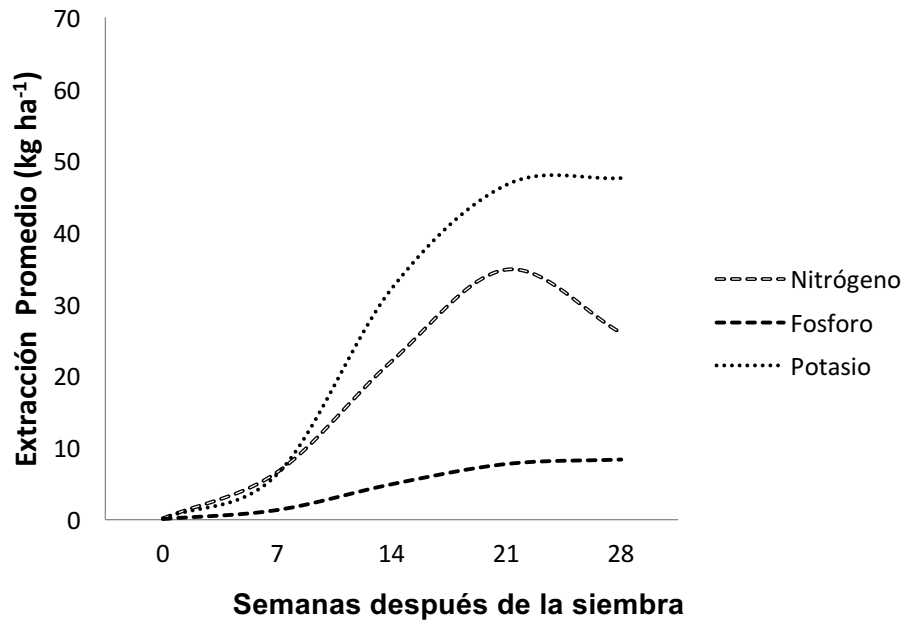
Como se observa en la Figura 6, el elemento calcio tiene en los dos tratamientos un incremento continuo en extracción, lo que indicaría que el valor de su concentración es constante en las diferentes etapas evaluadas, lo que genera una pendiente constante en relación con la ganancia de masa seca del cultivo. Este comportamiento es acorde con lo reportado por Criollo-Aguilar (2012) y Sánchez y Sachica (1987), quienes afirman que el calcio es uno de los elementos que no presenta disminución sobre la concentración en tejidos a medida que se desarrolla la planta.

En cuanto a magnesio, es uno de los elementos que presenta en conjunto con el calcio menor variación en cuanto a su valor de concentración en tejido para los dos tratamientos, generando curvas de extracción estables. Sin embargo, para este estudio, este elemento presenta en los dos tratamientos evaluados una ligera disminución en extracción una vez diferenciada la flor y hasta primer pico de producción. Este comportamiento difiere de los estudios realizados por Pérez (2011) y por Vélez *et al.* (2014a), quienes observaron en plantas de clavel un comportamiento variado en cuanto a la concentración del elemento en tejidos durante las etapas de desarrollo del cultivo.

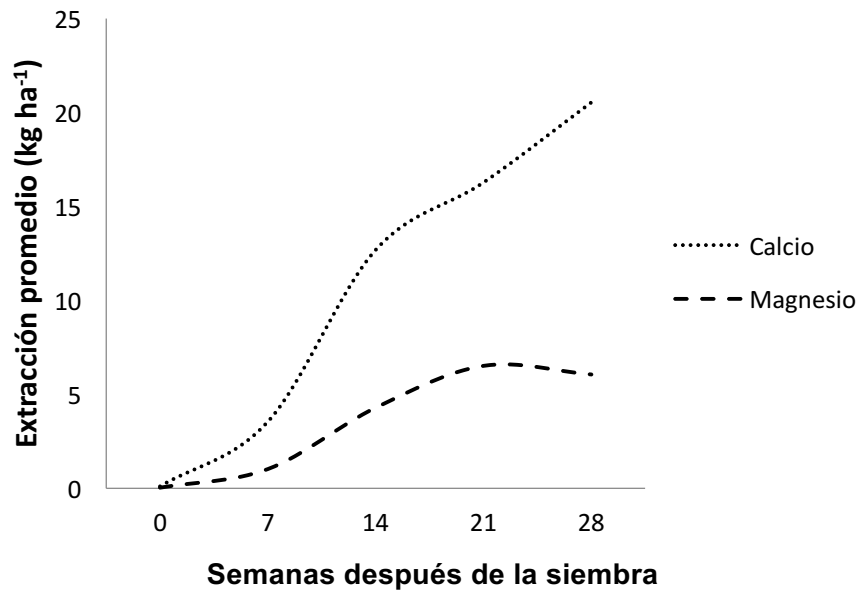
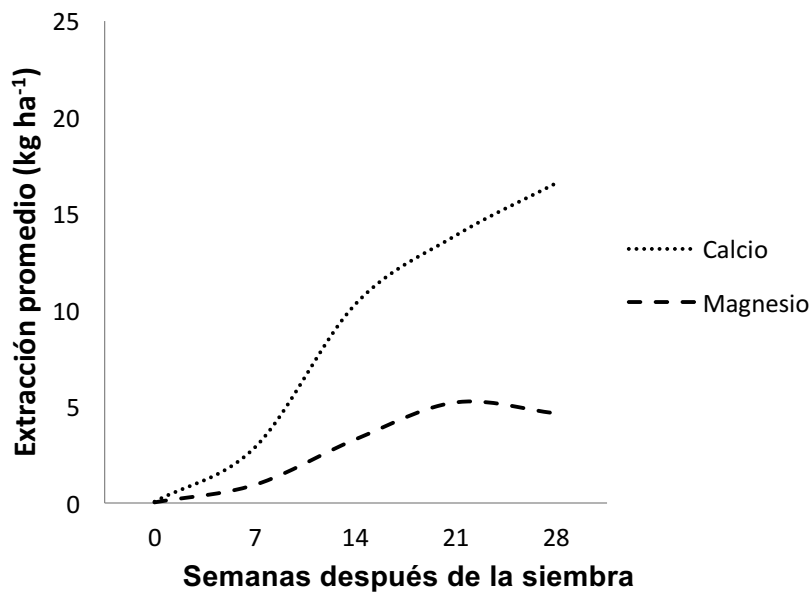
**A**



**B**



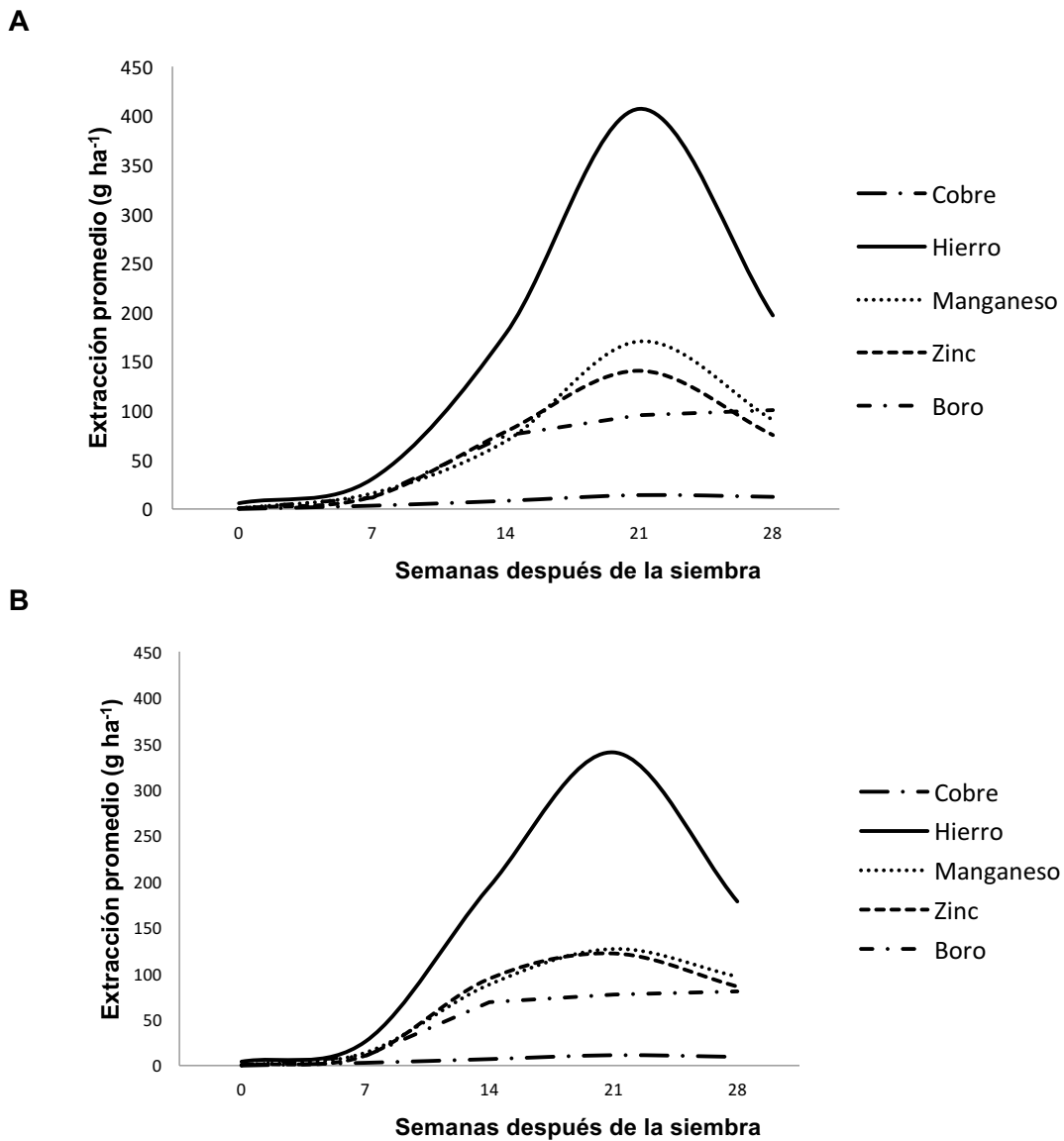
**Figura 5.** Curvas promedio de extracción de N, P y K en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B).

**A****B**

**Figura 6.** Curvas promedio de extracción de Ca y Mg en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B).

Para los dos tratamientos evaluados se verifica el mismo orden de los elementos menores por cantidad demandada por las plantas de cultivo, aunque se presentan diferencias numéricas, con demanda de mayor cantidad de micronutrientes en el tratamiento con lisímetro. El orden por cantidad requerida de mayor a menor es: Fe > Mn > Zn > B > Cu. Esta respuesta difiere de lo obtenido por Vélez (2014) y Cuervo

(2006), quienes reportaron el siguiente orden de demanda de micronutrientes por las plantas de clavel, creciendo sobre cascarilla de arroz quemada:  $Mn > Fe > Zn > B > Cu$ .



**Figura 7.** Curvas promedio de extracción de elementos menores en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (A) y al manejo del fertirriego tradicional (B).

Las diferencias numéricas para extracción de macronutrientes y micronutrientes por hectárea presentadas entre los dos tratamientos, son relacionadas directamente con la acumulación de masa seca en cada uno de ellos.

### **Correlación entre la concentración de nutrientes**

La concentración y dilución de nutrientes en plantas son un fenómeno común, el cual debe ser considerado al interpretar la concentración de los nutrientes en términos de antagonismo o sinergismo durante la absorción, particularmente cuando la concentración del nutriente se encuentra en un rango de deficiencia o toxicidad (Jarrell y Beverly, 1981). Si por ejemplo, la concentración de dos nutrientes está en deficiencia y solo uno de ellos es suplido, causa crecimiento y mayor dilución del nutriente no aportado, generando un alto nivel de deficiencia del mismo (Marschner, 2012).

Todos los elementos minerales obran entre sí y actúan sobre los otros, provocando sinergismo y antagonismos por efecto de la competencia iónica o la interacción en procesos de precipitación. Por ejemplo, los altos niveles de fósforo en el suelo o en la hoja competirán en la asimilación con magnesio, hierro, zinc y cobre (Marschner, 2012).

El antagonismo se presenta cuando el aumento en la concentración de un elemento reduce la absorción de otro. Ejemplos:  $\text{NO}_3^-$  -  $\text{Cl}^-$ , Fe - Mn, Na - Ca,  $\text{NH}_4^+$  - Ca, K - Mg, Ca - Mg. Cuando los iones fijados al complejo coloidal guardan una adecuada proporción, estos antagonismos no suelen presentarse. El sinergismo se presenta cuando el aumento en la concentración de un elemento favorece la absorción de otro. Ejemplos: N - Ca, P - Mo. Puede darse el caso de existir “sinergismos negativos”, donde la carencia de un determinado elemento propicia la deficiencia de otro, como el caso B - Ca, un déficit de boro dificulta la absorción de calcio y viceversa, si bien es cierto, que ante un exceso de uno de ellos, se comportan como elementos antagónicos, dificultándose la normal absorción del otro (Clarkson, 1996; Gutiérrez *et al.*, 2008; Fageria *et al.*, 2010).

En la Tabla 13 se observa que en el tejido vegetal de las plantas de miniclavel hay correlaciones positivas y negativas por encima de 0,6 o de -0,6, respectivamente;

valores seleccionados para analizar un nivel significativo en la correlación. A partir de estos valores se tienen las correlaciones positivas de N con Ca y Cu; P con K y Mn; Ca con Cu; K con Mn y Zn; Mn con Zn y, por último, Zn con B. De otro lado, entre las correlaciones negativas se muestran: P con Fe y K con Fe.

Entre estas correlaciones se destacan por ser las de mayor valor N - Cu y Ca - Cu, con valores de 0,89 y 0,80, respectivamente, además de las correlaciones negativas entre P y Fe y entre K y Fe, con valores de -0,83 y -0,87, respectivamente.

La correlación positiva entre N y Cu presentada en este trabajo coincide con los reportes de Navarro *et al.* (2012) Navarro y Navarro (2003), quienes muestran interacciones positivas de estos dos elementos en los cultivos de trigo y pastos, donde dosis crecientes de nitrógeno generan mayores respuestas en producción al incrementar dosis de Cu en la fertilización.

La relación positiva entre los elementos Ca y Cu encontrada en este trabajo no coincide con los reportes de Alarcón y Urrestarazu (2006) y de Alarcón (2008), quienes afirman que entre estos dos elementos existe un antagonismo leve, en el que alta concentración de uno de ellos limita la absorción y acumulación en el tejido del otro.

Entre las correlaciones negativas más representativas obtenidas en este trabajo se destaca la de P con Fe, con -0,83; relación considerada problemática en la absorción por parte de la planta, debido a que los dos elementos forman fosfatos hidroxilados de hierro, un compuesto insoluble que la planta no está en capacidad de aprovechar (El-Naggar, 2009; Kafkafi y Tarchitzky, 2011). Razón por la cual la presencia de uno disminuye la absorción del otro.

De igual forma, Fe y K presentan una correlación negativa de -0,87, relación entre elementos reportada como antagónica débil (Henao *et al.*, 2006; El-Naggar, 2009; Alarcón, 2000a), y con valores menos negativos por Cuervo (2006). Por otro lado, Pérez (2011) y Gunes *et al.* (1998) reportan correlación positiva de estos dos elementos en tejido vegetal. Esto permite observar que la relación de estos dos elementos es dependiente de las condiciones de manejo más que de la interacción

química y de absorción entre los mismos, pues cada uno de los autores consultados muestra un nivel de interacción diferente.

**Tabla 13.** Correlación en concentración de nutrientes en tejido vegetal de plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada.

<b>Nutriente</b>	N	P	Ca	K	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
N	1									
P	<b>0,55</b>	1								
Ca	<b>0,62</b>	0,42	1							
K	0,22	<b>0,75</b>	0,22	1						
Mg	<b>0,55</b>	-0,01	0,50	-0,09	1					
Cu	<b>0,89</b>	<b>0,58</b>	<b>0,80</b>	0,25	<b>0,52</b>	1				
Fe	-0,26	<b>-0,83</b>	-0,44	<b>-0,87</b>	0,07	-0,41	1			
Mn	0,41	<b>0,65</b>	0,03	<b>0,70</b>	-0,10	0,21	-0,49	1		
Zn	0,17	0,29	-0,23	<b>0,60</b>	-0,11	-0,09	-0,26	<b>0,68</b>	1	
B	-0,05	0,08	-0,03	0,48	-0,02	-0,07	-0,24	0,25	<b>0,65</b>	1

### **Descripción de N, P, K, Ca y Mg en sustrato y solución lixiviada**

El comportamiento de los macroelementos N y K en el sustrato y el lixiviado a lo largo del pico de producción de tallos florales en las plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas sobre sustratos (Figura 8) presentan diferencias significativas. Para N en la semana 28 es posible observar un menor contenido en el tratamiento sin lisímetro en el análisis de sustrato, y en la semana 21 mayor contenido en el lixiviado para este mismo tratamiento, lo que estaría indicando mayores pérdidas de dicho elemento. Para el caso de K es posible observar en semana 28 mayor contenido en el análisis de sustrato en el tratamiento sin lisímetro y mayor contenido en la semana 21 y 28 en el lixiviado para este mismo tratamiento, lo que podría indicar acumulación en sustrato por dificultad en el ingreso y mayores pérdidas del elemento. Para los dos casos, N y K, las diferencias estadísticas están precedidas de diferencias numéricas que inician su tendencia a partir de la semana 14, semana posterior al ahorro más representativo de fertirriego en el tratamiento con riego monitoreado por lisímetro. De forma independiente del tratamiento se destaca que



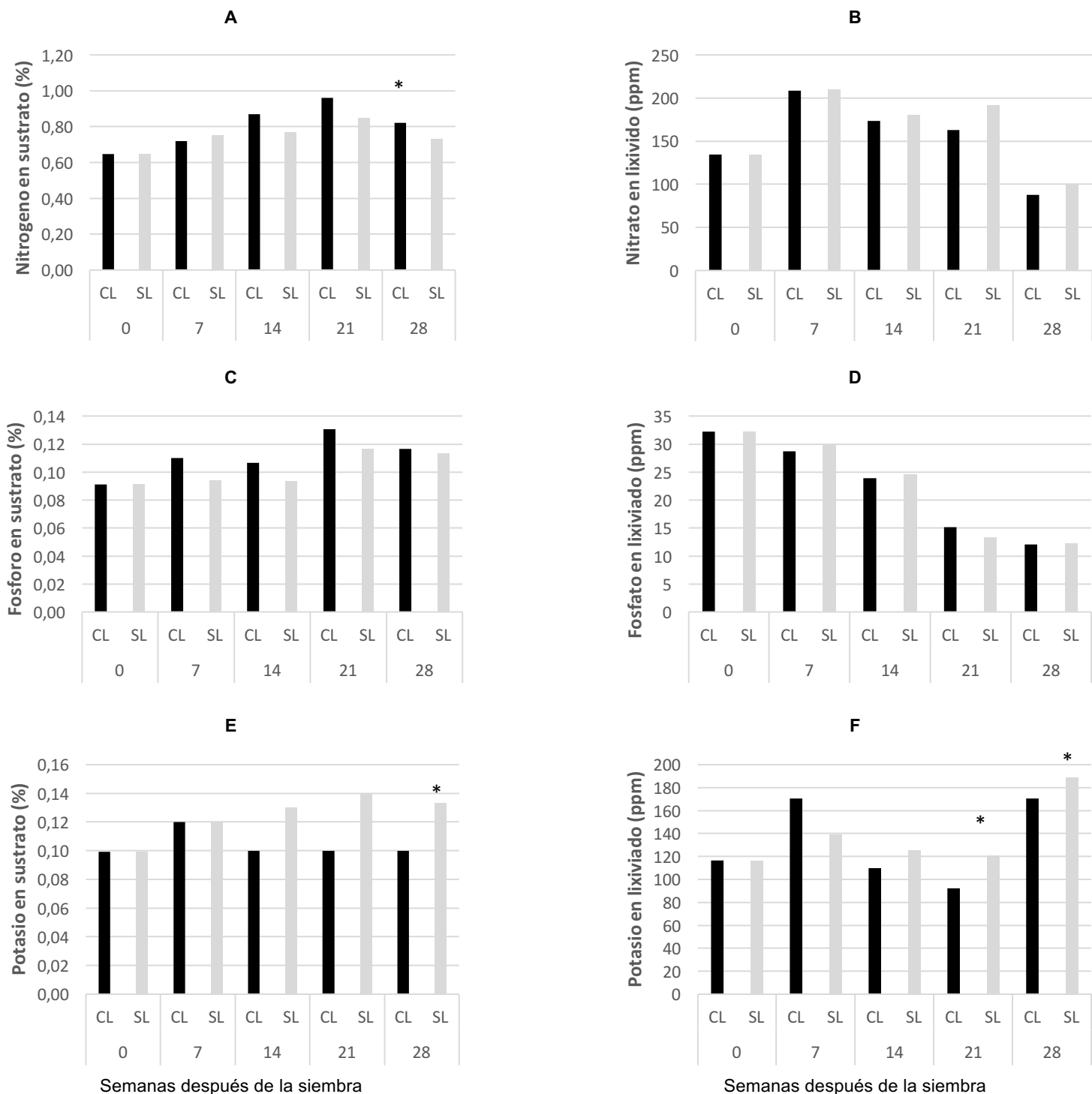
la concentración de nitrato en los lixiviados alcanza un nivel máximo de  $210 \text{ mg L}^{-1}$ , reafirmando el potencial contaminante de las fórmulas de fertirriego utilizadas en la producción de clavel (Avila *et al.*, 2002).

Para magnesio (Figura 9) se encontró que el contenido de este elemento en el sustrato del tratamiento de fertirriego tradicional, es decir manejo sin lisímetro, fue significativamente mayor al contenido de este nutriente en el sustrato donde crecieron las plantas de clavel sometidas al tratamiento con fertirriego apoyado en el lisímetro de pesada.

Los nutrientes que no presentaron diferencias estadísticas ni en sustrato ni en lixiviado son fósforo y calcio.

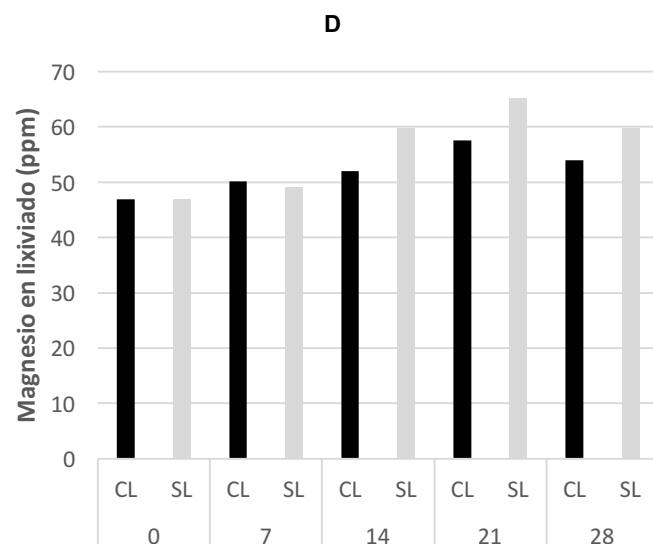
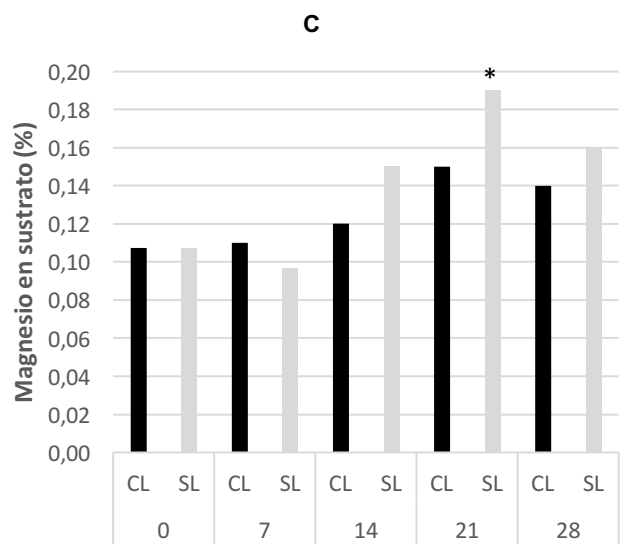
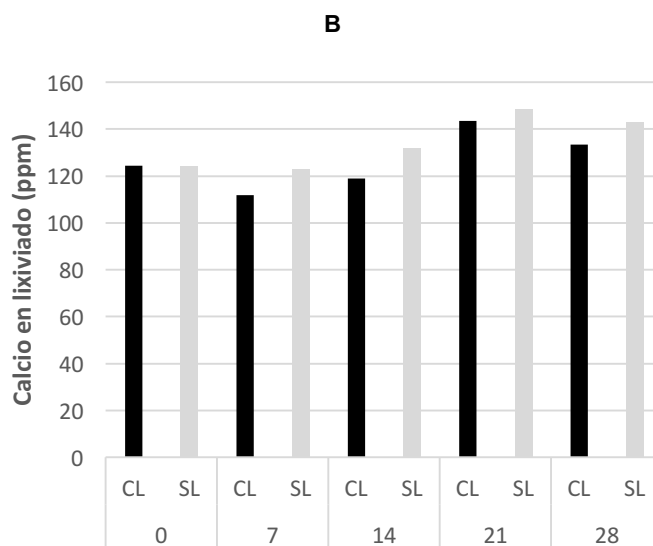
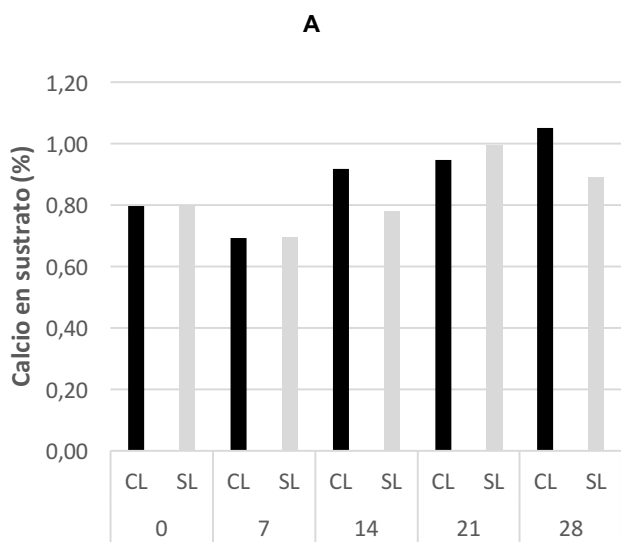
Es posible observar en ambos tratamientos una tendencia creciente en la acumulación de los dos elementos en el sustrato durante el proceso de desarrollo de las plantas (Figura 8c y Figura 9a). Similitud que no se presenta en el lixiviado, pues como es posible observar, el fósforo (Figura 8d) a diferencia del calcio muestra una tendencia decreciente a partir de la semana 14, lo que podría estar relacionado con un proceso de acumulación en tejido en constante crecimiento pese al cambio de la cantidad aportada del nutriente en la fórmula de fertirriego, cambio que representa una disminución del 20% en el aporte a partir de la semana 14. De esta forma se tendría constante demanda por la planta, disminución del aporte en el fertirriego y menores pérdidas en lixiviado.

Para calcio en lixiviado es posible observar en la figura 9b mayor estabilidad en el comportamiento de la variable al pasar las semanas, lo que podría estar relacionado con la estabilidad del nutriente en la fórmula de fertirriego pese al cambio de crecimiento vegetativo a reproductivo.



**Figura 8.** Comportamiento de macroelementos en sustrato y lixiviado a lo largo de un pico de producción de tallos florales en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo del fertirriego tradicional (SL). Porcentaje de nitrógeno en el sustrato (A) y contenido de nitrato en el lixiviado (B); Porcentaje de fósforo en el sustrato (C) y contenido de fosfato en el lixiviado (D); Porcentaje de potasio en el sustrato (E) y contenido de potasio en el lixiviado (F).

\* representa diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).



Semanas después de la siembra

Semanas después de la siembra

**Figura 9.** Comportamiento de elementos secundarios en sustrato y lixiviado en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo del fertirriego tradicional (SL). Porcentaje de calcio en el sustrato (A) y contenido de calcio en el lixiviado (B); Porcentaje de magnesio en el sustrato (C) y contenido de magnesio en el lixiviado (D).

\* representa diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $P \leq 0,05$ ).

### **Descripción de parámetros químicos pH, CE, CIC y relación C:N en sustrato**

En la Figura 10 se muestra que la variable pH en el sustrato se mantuvo en el rango normalmente utilizado, entre 6 y 7, en los programas de nutrición mineral en plantas hortícolas. Observaciones reportadas por Arreaza (2000), coinciden con lo reportado para el sustrato en cuanto al pH se refiere, ya que este autor afirma que la cascarilla de arroz tiende a generar pH con tendencia al rango básico, al menos durante el primer año de uso. Es de destacar el valor significativamente inferior en la semana 28 en el tratamiento de manejo tradicional del fertirriego en comparación con el tratamiento con apoyo de lisímetro.

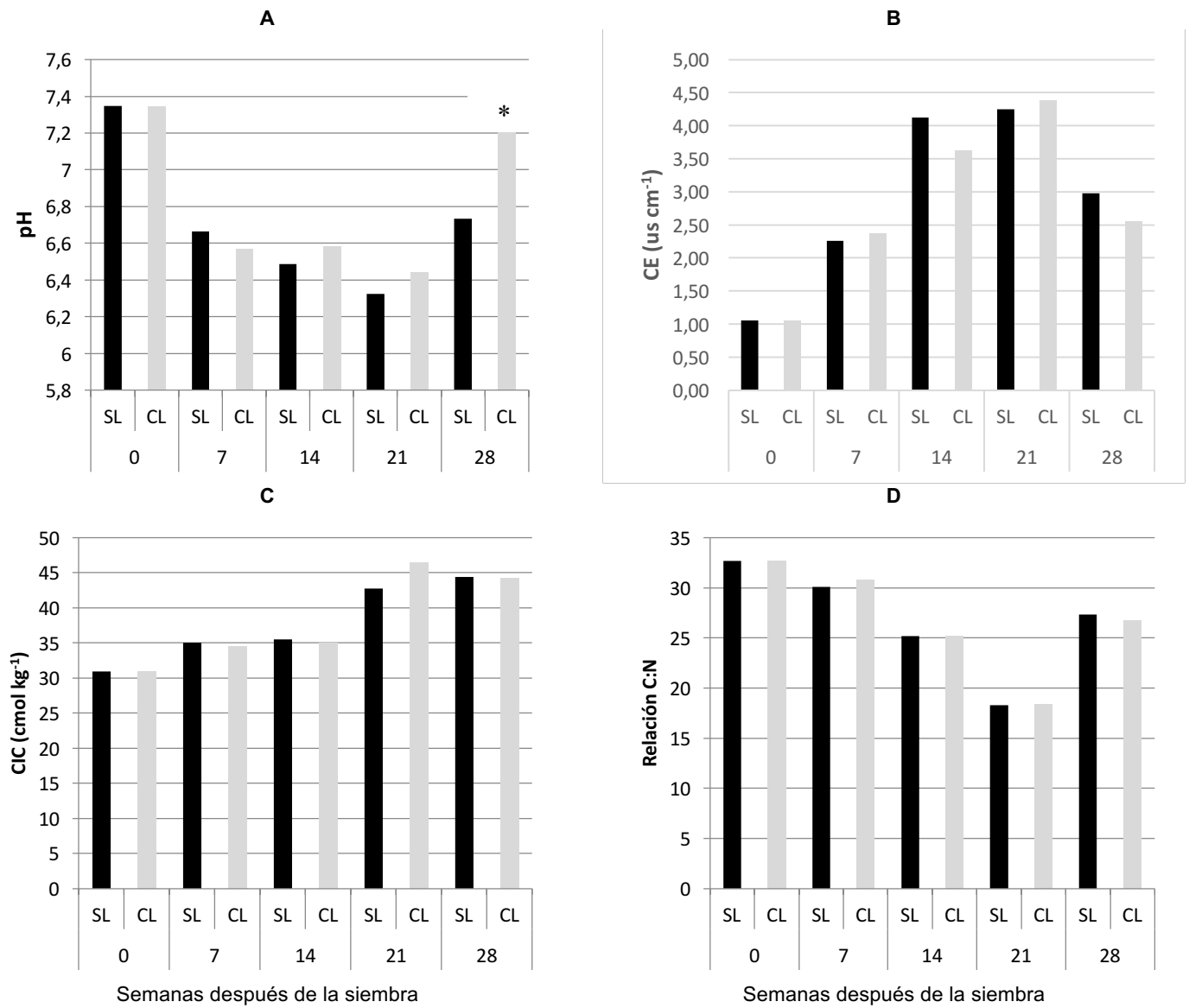
En la CE, sin presentarse diferencias estadísticas, es posible observar que los valores reportados para las semanas 0, 7 y 28 coinciden con los reportes de Dasgan y Ekici (2005) para sistema de fertirriego en tomate y con los reportes de Vélez (2014), para clavel en cascarilla de arroz quemada, siendo estos los valores normales para sistemas de fertirriego.

Por otro lado es posible observar que los valores reportados en las semanas 14 y 21 exceden a  $3 \mu\text{S cm}^{-1}$ , valor máximo reportado como nivel de tolerancia a la salinidad por plantas de clavel (Western Fertilizer Handbook, 2010), encontrándose estos entre 3,62 y  $4,39 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Estos valores coinciden con los meses de mayor temperatura durante el periodo evaluado, generando la posibilidad de relacionar la pérdida de agua en los sustratos por evapotranspiración y el ascenso de sales a la superficie del medio.

Por su parte la CIC, de manera independiente de los tratamientos aumenta con el avance del cultivo sin presentar diferencias estadísticas (Figura 10C), presentando valores entre 30 y  $45 \text{ cmol kg}^{-1}$ , valores reportados para sustratos de cascarilla de arroz quemada (Vélez *et al.*, 2014) y considerados como bajos por Martínez y Roca (2011), coincidiendo con Calderón y Ceballos (2003), quien afirma que la cascarilla de arroz tiene un valor bajo de CIC debido al tamaño de las partículas que la componen.

Por último, la relación C:N evaluada en este trabajo no generó diferencias estadísticas y presentó rangos entre 18 y 33, generando un comportamiento en

descenso desde la semana 0 a la semana 21. Abad *et al.* (2005) mencionan que en materiales orgánicos una relación C:N entre 20 y 40 es considerada como óptima para el cultivo en sustrato. Sin embargo, Quintero (2009) indica que la relación C:N no es suficiente para considerar un material orgánico como estabilizado, puesto que parte del carbono y del nitrógeno puedan estar en formas no descomponibles, como el carbono formando parte de algunas ligninas o el nitrógeno en forma de queratinas u otras proteínas, además de existir fijación del nitrógeno por algunas bacterias.



**Figura 10.** Comportamiento de parámetros químicos en el sustrato del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL). pH (A), CE (B), CIC (C), relación C:N (D).

\* representa diferencias significativas según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

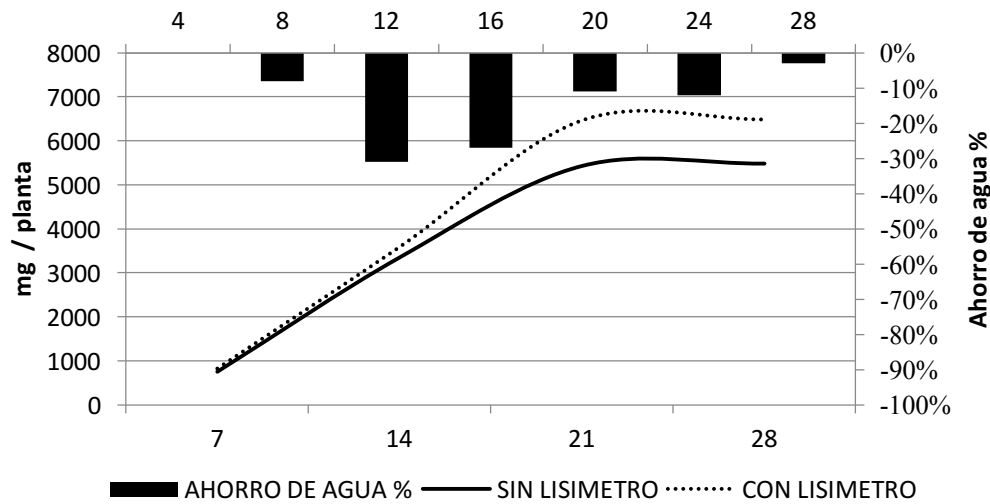
## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con base en los resultados obtenidos y presentados en el apartado anterior, se plantean como base para la discusión las siguientes afirmaciones:

- El sistema de lisímetro generó 13,2% menos de aporte hídrico en las 28 semanas del ciclo de cultivo.
- Existe una diferencia numérica en acumulación de masa seca cuya tendencia se empieza a definir en la semana 14 del ciclo de cultivo, momento en el cual se generó el ahorro más representativo de agua en el sistema con lisímetro.
- En los nutrientes nitrógeno, potasio y magnesio se reportaron diferencias estadísticas en cuanto a la acumulación en tejido, lo cual tiene una relación directa con el comportamiento de estos nutrientes en sustrato y en lixiviado.
- Entre los parámetros nutricionales, el pH del sustrato representa el cambio más relevante entre tratamientos. En el sistema de manejo convencional se encontró una tendencia de acidificación al avanzar las semanas de cultivo.

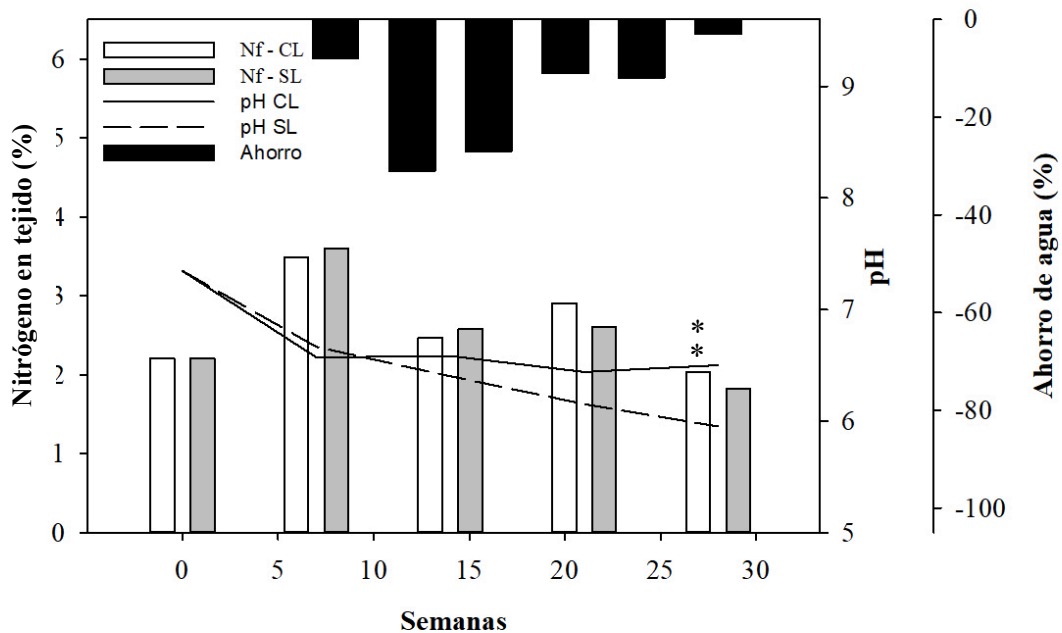
Cada una de las afirmaciones anteriores tiene componentes que se relacionan entre sí, generando interacciones que se presentan en las Figuras 11, 12, 13 y 14.

En la Figura 11 se observa la interacción entre ahorro de agua en el tratamiento con lisímetro y la tendencia de acumulación de masa seca para cada uno de los dos tratamientos. Teniendo en cuenta estas dos variables podría inferirse que la diferencia numérica en ganancia de masa seca entre los dos tratamientos estaría relacionada con sobreoferta de agua en el tratamiento sin lisímetro. Lo que genera, según Dat *et al.* (2004), cambios en el pH y en el potencial redox del sustrato, debido a cambio en la dinámica de hidrogeniones y en el balance de cationes, además de la solubilidad de metales pesados y fitotoxicidad por los mismos. Razón por la cual, tiene sentido revisar la interacción ahorro de fertirriego, pH en sustrato y dinámica de nutrientes en tejido, haciendo énfasis en N, K y Mg, por ser los que presentaron diferencias significativas en su acumulación.



**Figura 11.** Acumulación de masa seca y ahorro de agua del sistema productivo en plantas de miniclavel cv. Rony cultivadas en sustratos y sometidas a manejo del fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada y al manejo de fertirriego tradicional.

En la Figura 12 se aprecia el cambio en la tendencia del pH, al comparar los dos tratamientos, generándose acidificación en el tratamiento de manejo convencional, lo cual sucede en mayor proporción a medida que se aporta más agua en el sistema, tendencia que refuerza la afirmación de Dat *et al.* (2004).



**Figura 12.** Comportamiento de nitrógeno en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL).



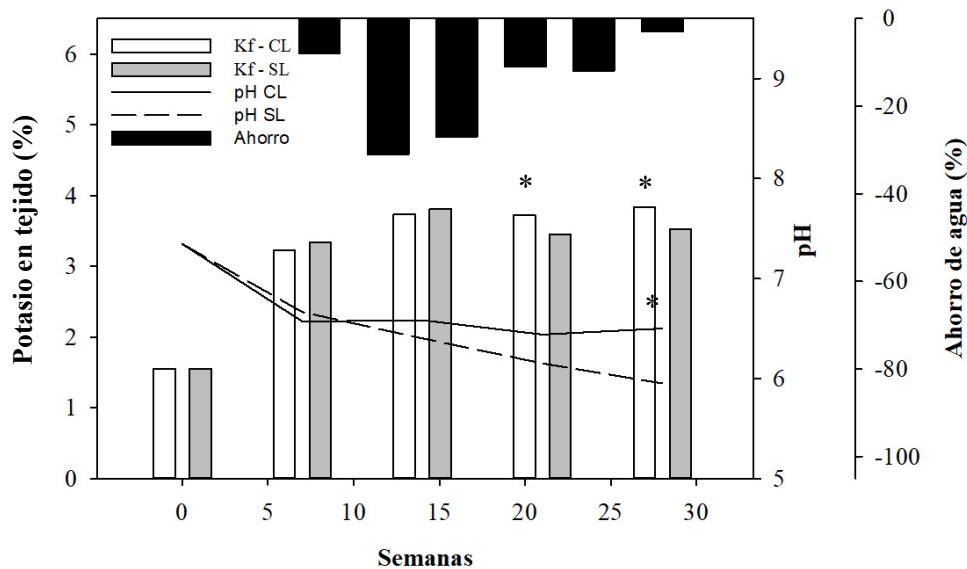
Según Sonneveld y Voogt (2009) el valor de pH durante el ciclo de cultivo varía siendo la principal razón para esta variación la diferencia entre la absorción de aniones y cationes. La absorción de aniones está relacionada directamente con la emisión de  $\text{HCO}_3$  u  $\text{OH}$  por parte de la planta, mientras la absorción de cationes es relacionada directamente con la emisión de  $\text{H}_3\text{O}$ ; generándose así un aumento o disminución del pH acorde al proceso dominante. Si la absorción de cationes excede la absorción de aniones el pH en la rizosfera decrece y, de forma contraria, cuando la absorción de aniones supera la absorción de cationes, el pH aumentará.

A medida que el pH es más ácido en el sustrato del tratamiento sin lisímetro se acumula menor proporción de nitrógeno en el tejido, en comparación con el tratamiento con lisímetro; alcanzando diferencia significativa para esta variable en la semana 28. Esto está relacionado directamente con menos cantidad de nitrógeno en el sustrato y mayor contenido de nitrato en el lixiviado, datos reportados en las Figuras 8a y 8b, que se hacen significativamente diferentes en las semanas 28 y 21, respectivamente.

Teniendo en cuenta que el manejo de nitrógeno se realizó en una relación nítrico : amoniacal 80:20 y que acorde con lo citado por Bloom *et al.* (1992) y por Carpenter *et al.* (1998) el nitrógeno nítrico es altamente soluble, muy móvil en suelo y no es retenido por las cargas negativas de los coloides, es posible inferir que el exceso de agua en el tratamiento sin lisímetro generó pérdidas de esta forma del elemento. La cual constituye la fuente más eficiente en toma, almacenamiento y translocación en la planta (Marschner, 2012); generando acumulación de nitrógeno amoniacal y mayor toma de la misma por parte de las raíces, lo que tiene un impacto directo en la acidificación del sustrato. Bar *et al.* (2009) demostraron que cambios en la relación nítrico amoniacal de 75:25 a 50:50 impacta el pH de la rizosfera de 8 a 4, con un efecto directo en el crecimiento de la planta. Esto es explicado por Claussen y Lenz (1999), al evaluar el comportamiento de plantas de fresa con fertilización nítrica o amoniacal, concluyendo que el aumento en la oferta de nitrógeno amoniacal disminuye la fotosíntesis neta impactando la acumulación de masa seca. En resumen, el exceso de agua genera pérdidas de nitrógeno nítrico, mayor

proporción de nitrógeno amoniacal disponible para las raíces, acidificación del medio, menor contenido de nitrógeno en tejidos y menor acumulación de masa seca en la planta.

De manera análoga, se revisó la dinámica de potasio en los dos tratamientos (Figura 13). En donde, se constatan diferencias estadísticas en la acumulación del nutriente en tejido en las semanas 21 y 28, con menor acumulación en el tratamiento sin lisímetro. Respuesta relacionada con la pérdida de nitrógeno nítrico en el sustrato, cambio en la relación  $\text{NO}_3:\text{NH}_4$  y competencia directa  $\text{NH}_4\text{-K}$  por ingreso a la planta; competencia en la que los dos nutrientes comparten transportadores y canales de ingreso en membranas radiculares y en la que la prioridad la tiene el nitrógeno amoniacal, tal como explicado en Floor *et al.* (2010). Ellos demostraron dicha afirmación en plantas de arabidopsis y cebada, concluyendo que los flujos netos de  $\text{K}^+$  y  $\text{NH}_4^+$  se correlacionaron negativamente, al igual que sus concentraciones tisulares, lo que sugiere la existencia de competencia directa durante la absorción.

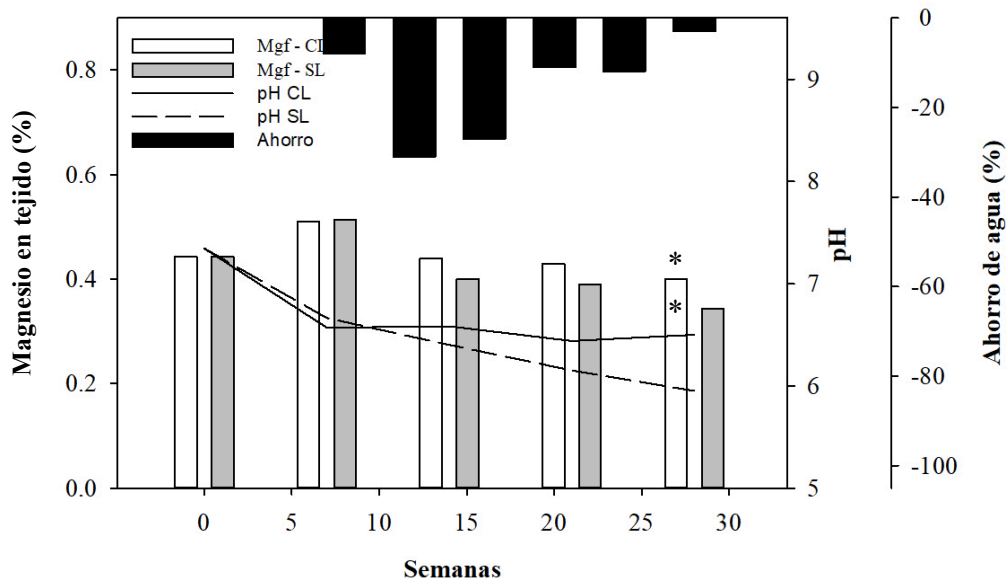


**Figura 13.** Comportamiento de potasio en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL).

Dicha competencia también es demostrada por Bar *et al.* (2009), quienes evaluaron la acumulación de nutrientes en tejido al variar las relaciones nitrato-amonio-urea en un cultivo de rosa creciendo sobre sustrato. En el estudio se afirma que la mejor relación nitrato amonio para la absorción de potasio es 88:12; a partir de la cual, la acumulación del potasio en tejidos se afecta hasta en un 50% en la relación nitrato amonio 50:50, afectando los componentes de rendimiento en un 49%. De igual manera, el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (IPNI) publicó, en su boletín Better crops (1998), trabajos en tomate y maíz en los que demuestra que la exposición por cuatro días a una fuente de nitrógeno netamente amoniacal impacta la acumulación de potasio en ambos cultivos, en estado de crecimiento vegetativo. Los niveles normales de este elemento se recuperan a una vez se retoma el aporte de nitrógeno nítrico en la oferta nutricional.

Según los datos para el nutriente potasio en tejido, sustrato y lixiviado en los dos tratamientos evaluados, un valor menor de concentración en tejido no estaría relacionado con pérdidas por lixiviación. Por el contrario, el tratamiento sin lisímetro muestra estadísticamente menor absorción del nutriente y mayor contenido en el sustrato, lo cual confirmaría limitantes en absorción por antagonismos y no por pérdidas en el sistema.

En el pH del sustrato a partir de la semana 7 se evidencia una tendencia decreciente en el tratamiento sin lisímetro. Así mismo, para este tratamiento, a partir de la semana 14 se observa una tendencia de disminución en la concentración de magnesio en el tejido. Estas diferencias numéricas para ambas variables se tornan estadísticamente diferentes en la semana 28 (Figura 14).



**Figura 14.** Comportamiento de magnesio en tejido, pH del sustrato y ahorro de agua del sistema productivo para plantas de miniclavel cv Rony, sometidas a manejo de fertirriego con apoyo de lisímetro de pesada (CL) y al manejo de fertirriego tradicional (SL).

Las dinámicas de magnesio y potasio en sustrato y lixiviado son similares, con tendencia a mayores contenidos en el tratamiento sin lisímetro durante las semanas 14, 21 y 28. En particular, la concentración de magnesio en el sustrato se muestra significativamente mayor en la semana 21 para el manejo convencional (sin lisímetro), en comparación con el tratamiento con lisímetro.

Considerando lo argumentado sobre el cambio en la relación  $\text{NO}_3:\text{NH}_4$  generado por la lixiviación de la fuente nítrica y teniendo en cuenta lo reportado por Lasa *et al.* (2000), quienes demostraron que el nitrógeno amoniacal genera menores contenidos de magnesio en plantas de girasol cultivadas en un sistema hidropónico, es posible inferir un antagonismo similar al del potasio. Para ellos, en las plantas tratadas con  $\text{NH}_4$  se afecta la cantidad de magnesio en tejido, la cantidad de masa seca, área foliar, fotosíntesis neta, y conductancia estomática; procesos cuyo funcionamiento se restauran al tratar las plantas con dosis crecientes de magnesio en la solución del fertirriego. Este impacto en los procesos mencionados está relacionado con la limitación generada sobre el proceso de carga de floema y

traslocación de asimilados por deficiencia de magnesio, lo que desencadena una sobre concentración de azúcares en las hojas fuente con la limitación de su transporte a otros órganos, impactando el proceso de crecimiento y ganancia de masa seca en la planta (Kakmak y Kirkby, 2008; Fischer y Bremer, 1993).

## Conclusiones

Las plantas de miniclavel cv Ronny cultivadas en sustrato con fertirriego monitoreado con el sistema de lisímetro de pesada, mostraron una tendencia de acumulación de masa seca de un gramo por planta más que las plantas creciendo en el tratamiento de fertirriego tradicional.

Las curvas de absorción de nutrientes obtenidas para primer pico de producción (28 semanas) en el tratamiento con Lisímetro indican una demanda por hectárea de 102,5 kg de nitrógeno; 23,15 kg de fósforo; 152,35 kg de potasio; 50,44 kg de calcio; 17,9 kg de magnesio; 36 g de cobre; 776,6 g de hierro; 327,6 g de manganeso; 291,58 g de zinc y 268,03 g de boro.

El uso del lisímetro frente al sistema tradicional generó un ahorro de 13,2% en agua y nutrientes, sin afectar el desarrollo de la planta evaluada, mostrando significativamente mayor eficiencia en absorción de nitrógeno, potasio y magnesio, al encontrarse estos en mayor concentración en la planta y con menos pérdidas por lixiviación.

La variable pH se muestra afectada ante el cambio de volumen de agua y nutrientes aportados al sistema. Lo que está relacionado directamente con el comportamiento de los nutrientes en solución y la forma como la planta los toma en su proceso de absorción.

## Bibliografía

Abad, M. 1998. Características y propiedades de los sustratos orgánicos para cultivos sin suelo. Métodos de caracterización. En: Osorio, N. y Orozco, F. (Eds.). Residuos orgánicos: Aprovechamiento agrícola como abono y sustrato. 2a. ed. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. pp. 150-155.

Abad, M., Noguera, P. y Carrion, C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: Cadahía, C. (ed.). Fertirrigación Cultivos Hortícolas, Frutales y Ornamentales. Tercera edición. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. pp. 299-354.

Alarcón, V. 2000a. Nutrición mineral: elementos esenciales y dinámica en el sistema suelo - planta. En: Alarcón V. (Ed.). Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Cartagena, España. Universidad Politécnica de Cartagena. pp. 109-129.

Alarcón, V. 2000b. Introducción a los Cultivos sin suelo, sistemas y sustratos. En: Alarcón, V. (Ed).Tecnología para cultivos de alto rendimiento. Cartagena, España. Universidad Politécnica de Cartagena. pp. 25-33.

Alarcón, V. y Urrestarazu, M. 2006. Cultivo en fibra de coco. En: Alarcón, V. (Ed). Compendio de horticultura 17: Cultivos sin suelo. Madrid. Ediciones de Horticultura. pp. 117-130.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.

Amma, A., Del Pardo, C., Ciaponi, M., Diaz, J. y Celie, J. 2008. Producción de clavel en sistema sin suelo. Cultivo en sustrato. Congreso de Floricultura y Plantas Ornamentales. Corrientes: IV Jornadas Nacionales de Floricultura.

Ansorena, J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ansorena, J. (Ed). Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. pp. 85-90.

Arbeláez, T. 2011. Las enfermedades vasculares del clavel en Colombia y en el mundo. *Agronomía Colombiana*; 10(1):12-18.

Arreaza, P. 2000. Técnicas básicas del cultivo del clavel. En: Pizano de Márquez, M. (Ed.). Clavel (*Dianthus caryophyllus*). Bogotá: Ediciones Hortitecnia .pp.15-40.

Asocolflores, 2016. Cifras estadísticas. En: "<http://www.asocolflores.org/>" <http://www.asocolflores.org/>; consultado: 21 de Junio de 2017.

Avila, J., Canul, R. y Sansores, A. 2002. Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería* 6(3): 73-81.

Azofeifa, A. y Moreira, M. 2005. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile dulce (*Capsicum annuum* CV. UCR 589) en Alajuela, Costa Rica. *Agron. Costarricense* 29(3): 77-84.

Baptista, F., Bailey, B. Meneses, J. 2005. Measuring and modelling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a mediterranean greenhouse. *Acta Hort.* (ISHS) 691(9):313-320.

Baille, M. 1996. Principle and methods for predicting crop water requirement in greenhouse environments. *Cahiers options méditerranéennes* 31(3): 177-187.

Bar, B., Mattson, N., Lieth H. 2009. Effects of NH<sub>4</sub>:NO<sub>3</sub>:urea ratio on cut roses yield, leaf nutrients content and proton efflux by roots in closed hydroponic system. *Scientia Horticulturae* 122:(9) 610–619.



Barrera-Aguilar, E., Valdez, L., Castillo, A., Ibarra, L., Rodríguez, R. y Alia, I. 2012. La nutrición potásica afecta el crecimiento y fotosíntesis en *Lilium* cultivado en turba ácida. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 45(3): 111-122.

Barrientos, F., Alvarado, M. y Flórez, V. 2011. Cálculo de costos de producción de rosas de corte en invernadero en la sabana de Bogotá. En: Flórez, R. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 15-36.

Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. Bertsch, F. (Ed). San José de Costa Rica. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. pp. 35-45.

Beeson J. 2011. Suspension Lysimeter Systems for Quantifying Water Use and Modulating Water Stress for Crops Grown in Organic Substrates. *Agricultural Water Management*, 98(7): 967-976.

Biocomercio Andino. 2013. Análisis sectorial: flores tropicales y follajes 2012-2013. En: HYPERLINK "<http://biocomercioandino.org/>" <http://biocomercioandino.org/>; consulta: agosto, 2017.

Bloom, A. Sukrapanna, S. y Warner, R. 1992. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley. *Plant Physiol.* 99(4):1294-1301.

Bonilla, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales.. En: Azcón-Bieto, J. y Tálon, M. (Eds). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Madrid. McGaw Hill, pp. 83-97.

Brown, P. 2000. Basics of evaporation and evapotranspiration. Turf irrigation management series, No. 1. Tucson, Arizona. The University of Arizona College of Agriculture. Cooperative Extension. pp. 1-4

Burés, S. 1997. Sustratos. Madrid. Ediciones Agrotécnicas, S. L. pp. 190-211.

CAM. 2010. Generalidades Centro Agropecuario Marengo. En: Universidad Nacional de Colombia, "<http://www.marengo.unal.edu.co/GENERALIDADES.pdf>"<http://www.marengo.unal.edu.co/GENERALIDADES.pdf>; consultado: marzo de 2018.

Cámara de Comercio de Bogotá. 2008. Plan estratégico exportador para la región 2007-2019 Bogotá-Cundinamarca. Sector de las flores. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá. pp. 24-36.

Cabareño, F., Martínez, V. y Carvajal, M. 2004. Does calcium determine water uptake under saline conditions in pepper plants, or is it water flux which determines calcium uptake? *Plant Science*.166: 443 – 450

Cabrera, R., Solis A.R., Cuervo W. 2017. Tolerancia y manejo de salinidad, pH y alcalinidad en el cultivo de flores. En: Flórez R. (Ed.). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 63-73.

Cakmak I. and Kirkby E. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum* 133(9): 692–704.

Calderón S. y Cevallos, F. 2003. Los Sustratos. En: [http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los\\_Sustratos.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm). Consultado: diciembre 2017.

Carpenter, S., Caraco, N., Correll, D., Howarth, R., Sharpley, A. y Smith, V. 1998. "Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen", *Ecol. Applic.*, 8(5): 558-568.

Casanova, M., Messing, I., Joel, A. y Cañete, A. 2009. Métodos de estimación de la evapotranspiración de un cultivo de lechuga en condiciones de invernadero, zona central de Chile. *Chilean J. Agric. Res.* 69(1): 60-70.

Castellanos, O., Fonseca, S., Buriticá, S. 2010. Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de flores y follajes en Colombia con énfasis en clavel. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Giro Editores Ltda. pp. 98-110.

Claussen, W. y Lenz, F. 1999. Effect of ammonium or nitrate nutrition on net photosynthesis, growth, and activity of the enzymes nitrate reductase and glutamine synthetase in blueberry, raspberry and strawberry. *Plant Soil* 208(5): 95–102.

Criollo-Aguilar, M. 2012. Evaluación de la eficacia de tres fuentes de calcio con tres dosis de aplicación para prevenir el rompimiento de nudos y cáliz partido en la producción de Clavel de corte (*Dianthus caryophyllus*), variedad Domingo, bajo Invernadero. Ecuador. Escuela superior politécnica de Chimborazo. pp 53-66.

Cuervo, W. 2006. Determinación de la biomasa, extracción y distribución de nutrientes en clavel estándar cv. Nelson cultivado en sustratos a segundo pico de cosecha. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp. 45-65.

Dat, J., Capelli, N., Folzer, H., Bourgeade, P. y Badot, P. 2004. Sensing and signalling during plant flooding. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42(4):273-282.

Dasgan, H. y Ekici, B. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of tomato plants. *Acta Horticulturae*, 697(5):399-408

Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. 2011. Informe de resultados: Censo de fincas productoras de flores en 28 municipios de la Sabana

de Bogotá. "<https://www.dane.gov.co/>" <https://www.dane.gov.co/>; consulta: enero 2018.

Dinero, 2017. Flores colombianas retoman liderazgo en mercados extranjeros. En: <https://www.dinero.com/edicion-impres/negocios/articulo/sector-floricultor-de-colombia-en-mercados-extranjeros/245744>.<https://www.dinero.com/edicion-impres/negocios/articulo/sector-floricultor-de-colombia-en-mercados-extranjeros/245744>; consulta: diciembre, 2017.

Droogers, P. 2002. Reference evapotranspiration comparison between FAO Climwat and IWMI Climate Atlas. *Irrigation and drainage system*. 16(4):33-45.

Dufour, L. y Guérin, V. 2005. Nutrient solution effects on the development and yield of *Anthurium andreanum* Lind. in tropical soilless conditions. *Scientia Horticulturae* 105(10): 269-282.

Epstein, E. and Bloom, A. 2005. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. 2da edición. Sunderland, Masachusets: Sinauer Associates, Inc. pp. 44-46.

Esmeral, Y., González, C., y Flórez, V. 2011. Evapotranspiración en plantas de rosa cv. Charlotte en condiciones de invernadero en la sabana de Bogotá. En Flórez, V. (Ed). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. pp. 109-26.

Fisher D. 2012. Simple weighing lysimeters for measuring evapotranspiration and developing crop coefficients. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3):35-43.

Fageria, N.K. 2009. The use of nutrients in crop plants. Boca Raton, FL. Taylor & Francis Group. pp. 90-211.

Baudoin, W. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Roma. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. pp. 6-15.

Fischer, E. y Bremer, E. 1993. Influence of magnesium deficiency on rates of leaf expansion, starch and sucrose accumulation, and net assimilation in *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia Plantarum*, 89(2):271-276.

Flórez, V., Parra, R., Rodríguez, S. y Nieto C. 2006. Características y fundamentos del proyecto “Producción más limpia de rosa y clavel con dos técnicas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá”. En: Flórez, V., Fernandes, A., Miranda, D., Chaves, C., Guzman, P. (Eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá: Unibiblos. pp. 3-40.

Flórez, V., Miranda, D., Chaves, B., Chaparro, L., Cárdenas, C. y Farías, A. 2006. Parámetros considerados en el análisis de crecimiento en rosa y clavel en los sistemas de cultivo en suelo y en sustrato. En: Flórez, V., Fernandes, A., Miranda, D., Chaves, C., Guzman, P. (Eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá: Unibiblos. pp. 50-65.

Floor, T., Tracey, A., Pai, P., Hegelund, J., Shabala, S., Schjoerring, J. and Jahn, T. 2010. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and Arabidopsis roots: molecular mechanisms and physiological consequences. *Journal of Experimental Botany*. 61(9):2303–2315.

Flores Aurora, 2015. Mini Clavel. En [www.floresaurora.com/#!mini-carnations/c1wul](http://www.floresaurora.com/#!mini-carnations/c1wul)>. Consulta: febrero de 2018.

Fonteno, D. 1999. Sustratos: Tipos y propiedades físicas/químicas,. En: Reed, D. (Ed). Agua, sustratos y nutrición en los cultivos de flores bajo invernadero. Ball Publishing y Ediciones Hortitecna Ltda. pp: 93-122

Grattan, S., and Grieve, C. 1992 Mineral element acquisition and growth response of plants in saline environments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 38(4):275-300

Global Water Partnership South América. 2000. Informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia. Bogotá. Agua para el siglo XXI para América del Sur. De la visión a la acción. Bogotá. CEPAL. pp. 25-45.

González, C., Murillo, M., Quintero, F. y Meneses V. 2006. Determinación de algunas propiedades hidrofísicas de los sustratos. En: Flórez, V., Fernandes, A., Miranda, D., Chaves, C., Guzman, P. (Eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá. Unibiblos. pp. 427-448

González, C. , Quintero, B., Flórez, V., Quintero, C. 2017. Lisímetros volumétricos. En: Flórez, V. (Ed). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Bogotá: Unibiblos. pp. 133-164.

Gu, L., Liu, P., Shao, L., Wang J., Dong, S., Zhao, B., Bing, H., Zhang, J. and Zhao, B. 2014. A lysimeters study of Chinese wheat and maize varieties. *Soil and Tillage Research*, 144(3):133-140.

Guerrini, I. y Trigueiro, R. 2004. Physical and chemical attributes of substrates composed of biosolids and carbonized rice chaff. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(6):1069-1076.

Gunes, A., Alpaslan, M. and Inal, A. 1998. Critical nutrient concentrations and antagonistic and synergistic relationships among the nutrients of NFT-grown young tomato plants. *Journal of Plant Nutrition*, 21(10):2035-3047.

Quesada, R. y Bertsch, F. 2013. Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17 Terra Latinoamericana. En:

<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57327411001>> ISSN. Consulta: Febrero 2018.

Jia, X., Shao, L., Liu, P., Zhao, B., Gu, L., Dong, S., Bing, S.H., Zhang, J. and Zhao, B. 2014. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions. *Agricultural Water Management*, 137(3):92-103.

Kafkafi, U. and Tarchitzky, J. 2011. Fertigation. A tool for efficient fertilizer and water management. Paris: IFA and IPI. pp 55-101.

Kelso, B., H.-A., Bâ, K.-M., Sánchez M., S. y Reyes L., D. 2013. Automatización de un lisímetro de pesada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3(4) 807-811.

Kleiber, T. and Komosa, A. 2008. Comparison dynamics of N, P, K contents in different anthurium cultivars (*Anthurium cultorum* Birdsey) grown in expanded clay. *Acta Sci. Pol.* 7(2) 77-88.

Larson, R. 1992. Introduction to Floriculture: Larson, R. (Ed). Introduction to Floriculture. North Carolina. Editorial Academic Press. pp. 45-53.

Lasa, B., Frechilla, S., Aleu, M., González M. B., Lamsfus, C. y Aparicio T. 2000. Effects of low and high levels of magnesium on the response of sunflower plants grown with ammonium and nitrate. *Plant and Soil*. 225(2): 167 – 174

Li, S., Pezeshki, S.R., and Goodwin, S. 2004. Effects of soil moisture regimes on photosynthesis and growth in cattail (*Typha latifolia*). *Acta Oecologica*, 25(1):17-22.

López, M. 2009. Modelación matemática del crecimiento de clavel estándar cv. Delphi cultivado en sustratos. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, sede Bogotá. pp. 23-45.

Medrano, E., Lorenzo, P., Sanchez, M. and Montero, J. 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumbe-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae* 105(2):163-175.

Meijer, J., Bot, G., Stanghellini, C. and Udink, A. 1985. Development and application of a sensitive, high precision weighing lysimeter for use in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 32(4), 321-336.

Messing, I., Afors, M., Radkvist, K. and Lewan, E. 1998. Influence of shelterbelt type on potential evaporation in an arid environment. *Arid Soil Res. Rehab.* 12(2):123-138.

Marschner, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Marschner, P. (Ed). Mineral nutrition of higher plants 3th. ed. Amsterdam. Elsevier. pp. 234-279.

Martínez, P., Roca, D., 2011. Sustratos para el cultivo sin suelo. Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá. Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-78.

Mengel, K., Kirkby, E., Kosegarten, H. y Appel, T. 2001. Principles of plant nutrition. 5<sup>a</sup> ed. Dordrech. Kluwer Academic Publishers. pp. 435-446.

Nandagiri, L. and Koor, G., 2006. Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of indian climates. *J Irrig Drain Eng.* 132(3):238-249.

Navarro, B. y Navarro, G. 2003. Química agrícola. 2da ed. Madrid: Mundi-Prensa. pp. 142-159.



Newman, S. (1999). Efectos del clima en la fisiología de la floración. Clima, fisiología y producción de cultivos bajo invernadero. Bogotá. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales. pp. 27-34.

Ortega, R. 1997. Fertirrigación en cultivos de flores. En: Silva M. (Ed). Fertirrigación. Bogotá. Sociedad Colombiana de Ciencia del Suelo. pp. 136-147

Poss, J., Ruseel, W., Shouse, P., Austin, R., Grattan, S., Grieve, C., Lieth, J. and Zeng, L. 2004. A Volumetric lysimeter system (VLS): an alternative to weighing lysimeters for plant-water relations studios. *Computers and Electronics in Agriculture*. 43(2):55-68.

Papafotiou, M., Chronopoulos, J., Kargas, G., Voreakou, M., Leodaritis, N., Lagogiani, O. and Gazi, S. 2001. Cotton gin trash compost and rice hulls as growing medium components for ornamentals. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 76(4):431-435.

Parra, R. y Flórez, V., 2006. Reutilización de lixiviados en sistemas de producción de rosa en sustrato. En: Flórez, V., Fernandes, A., Miranda, D., Chaves, C., Guzman, P. (Eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura Colombiana. Bogotá. Unibiblos. pp 463-478.

Pérez, J. 2011. Análisis de crecimiento y comportamiento de los nutrientes en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) variedad Delphi en un sistema de cultivo en sustrato en la sabana de Bogotá. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. pp. 67-78

Perfetti, J., Escobar, D., Castro, F., Cuervo, B., Rodríguez, M., Vargas, J. 2012. Costos de producción de doce productos agropecuarios. Bogotá. Fedesarrollo. pp. 12-32.

Pezeshki, S. 2001. Wetland plant responses to soil flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 46(3):299-312.

Quintero, M., González, C. y Flórez, V. 2006. Physical and hydraulic properties of four substrates used in the cut flower industry in Colombia. *Acta horticulturae*. 718:499-506.

Quintero, M., González, C. y Guzmán P. 2011. Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En: Flórez, V. (Ed). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 79-108.

Quintero, M., González, C., Florez, V. and Guzmán, J.M. 2009. Physical evaluation of four substrates for cut-rose crops. *Acta hortic*. 843:349-358

Quintero, M., Guzmán, J. y Valenzuela, J. 2012. Evaluación de sustratos alternativos para el cultivo de miniclavel (*Dianthus caryophyllus* L.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 6(1), 76-87.

Reyes G. y Avendaño P. 2012. Estudio ambiental sobre el riesgo ecológico que representa el plomo presente en el suelo. *Rev. Esc. Adm. Neg* 72(2):66-75.

Rodríguez, M. y Flórez, V. 2004. Elementos esenciales y beneficiosos. En: Guzmán, J. y López, J. (Eds). Fertiriego: tecnologías y programación en agroplasticultura. Madrid. CYTED. pp. 25-35.

Rodríguez, R. y Pire, R. 2008. Evapotranspiración diaria del tomate determinada mediante un lisímetro de pesada. *Agronomía Trop*. 58(1):73-76.

Salisbury, F. y Ross, C. 1992. Plant physiology. 4<sup>th</sup> ed. Belmont. Wadsworth Publishing. pp. 198-215.

Sánchez, M. 1992. Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Cuadernos Técnicos Sociedad Española de Geomorfología. Rome. United Nations, FAO. pp. 3:36.

Sandoval, M., Sánchez, P. y Alcántar G. 2007. Principios de la hidroponía y del fertirriego. En: Alcántar, G. y Trejo, L. (Eds). Nutrición de cultivos. México, D. F. Mundi Prensa y Colegio de Postgraduados. pp. 373-438.

Sandoval, L., González, C. y Flórez V. 2015. Consumo de agua en tiempo real en el cultivo de miniclavel en la Sabana de Bogotá. Floricultura Colombiana. 6:23-26.

Sonneveld, C. and Voogt, W. 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. Dordrecht. Springer Science + Business. 431p.

Ulloa N., Vargas N., Miranda D., y Fisher G. 2006. Efecto de la salinidad sobre los parámetros de desarrollo en especies hortícolas cultivadas en sistemas sin suelo. En: Flórez V., Fernández M., Miranda D., Chaves B., y Guzman J. (Eds). Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp 53-75.

Tuñón C. 2000. Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las practicas agrícolas. Tesis doctoral. Departamento de ciencias experimentales. Universitat Jaume I Castellon. 367p.

Vélez, N. 2012. Comportamiento de macronutrientes en un sistema de cultivo sin suelo. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp 38-54.

Vélez, N., Melo, S. y Flórez, V. 2014a. Comportamiento de Ca, Mg y S en un sistema de cultivo sin suelo para clavel. *Revista Chapingo*. Serie Horticultura 20(2):171-185.

Vélez, N., Flórez, V. Flórez, A. 2014b. Comportamiento de variables químicas en un sistema de cultivo sin suelo para clavel en la Sabana de Bogotá. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, Medellín 67(2):7281-7290.

Western plant health Association, W.P.H., 2010. Western fertilizer handbook. California. 9<sup>th</sup>. ed. Waveland Press. 343p.

Yahya, A., Anieza, S., Rosli, B. y Ahmad, L. 2009. Chemical and physical characteristics of cocopeat-based media mixtures and their effects on the growth and development of celosia cristata. *Amer. J. Agric. Biol. Sci.* 4(1):63-71.