



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Sistema para la recirculación automática de drenajes en el cultivo de rosa**

**William Javier Cuervo Bejarano**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, D.C. Colombia

2019



# **Sistema para la recirculación automática de drenajes en el cultivo de rosa**

**William Javier Cuervo Bejarano**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ciencias Agrarias con énfasis  
en Fisiología de Cultivos**

Director:

Ph.D. Víctor J. Flórez R.

Codirectora:

Ph.D. Sandra Esperanza Melo

Línea de Investigación:

Fisiología de cultivos

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en horticultura

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, D.C. Colombia

2019



## **Agradecimientos**

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colciencias, Asocolflores y Ceniflores por el financiamiento, así como a Suata Plants S.A., Productos Químicos Andinos S.A. Brenntag Colombia S.A. y Bayer Crop Science S.A., proveedores de insumos y materiales.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, cuyos laboratorios, profesores y administrativos contribuyeron al desarrollo de este trabajo de grado. Especial agradecimiento a los profesores Víctor J. Flórez R., Sandra E. Melo M., Bernardo Chaves C. y Carlos A. González M. por el acompañamiento científico de esta investigación.



## Resumen

En Colombia, desde hace más de 15 años se utilizan mezclas de sustratos como la cascarilla de arroz quemada (CAQ) y la fibra de coco (FC) para el cultivo de flores de corte. Se aplican volúmenes de fertirriego que aseguren drenajes de cerca del 30 % que pueden contaminar aguas y suelos. Las características físicas y químicas de los drenajes permitirían la reutilización realizando ajustes, pero se requiere de un sistema automatizado. Se construyó un sistema automático para el reciclaje de drenajes (SARD) en un cultivo de rosa cv. 'Charlotte' establecido en mezclas 100 CAQ, 65 CAQ:35 FC y 35 CAQ:65 FC con 0, 50 y 100 % de reciclaje drenajes (RD) y se evaluaron pH y conductividad eléctrica (CE), desde la poda hasta ocho semanas después (SDP), y los contenidos de S, Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en drenajes, sustratos y tejido foliar en las 0, 5 y 8 SDP. El SARD demostró ser capaz de manejar tiempos y movimientos de acuerdo con los valores consignados. En 1, 2 y 3 SDP la CE fue significativamente mayor al reciclar la solución en 35 CAQ y 65 CAQ y en 7 y 8 SDP lo fue para 100 CAQ y 65 CAQ. En 6 SDP hubo efecto significativo de 50 y 100 % RD independiente del sustrato. El pH fue significativamente menor entre 0 y 4 SDP para 100 CAQ sin reciclaje. En drenajes, en 0 SDP los sustratos con mayores contenidos de FC y 100 % RD tuvieron significativamente mayores concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Na<sup>+</sup>, y 8 SDP sucedió lo contrario, mientras que para Cl<sup>-</sup> las concentraciones fueron significativamente menores en 50 y 100 % RD, independiente del tipo de mezcla de sustratos. En sustratos solo hubo efecto significativo del porcentaje de reciclaje en el contenido de Na<sup>+</sup>. Este comportamiento puede estar relacionado con las características de los sustratos en términos de adsorción y desorción de iones influenciadas por la actividad de microorganismos.

**Palabras clave:** Sustratos, reciclaje, flor de corte, sodio, cloruro, azufre.

## Abstract

In Colombia, in cut flower cropping systems, for about 15 years burnt rice husk (BRH) and coconut fiber (CF) have been used as a rooting medium, requiring leaching fractions up to 30 %; however, leachates could contaminate water and soils. Leachates' physical and chemical characteristics could allow their reuse and recycling, adjusting some variables first. In a rose crop cv. 'Charlotte' established in the substrates mixes (100 BRH, 65 BRH:35 CF y 35 BRH:65 CF) an automatic drainage recycling system (ADRS) capable to recycle 0, 50, and 100 % (DR) of the drained solution was constructed. Solution pH, electrical conductivity (EC) from pruning to 8 weeks after (WAP), and S, Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> in, substrates, and leaf tissue in 0, 5, and 8 were analyzed to estimate the effect of substrates and recycling percentage. ADRS was capable to execute operations according to input target values. During 1, 2, and 3 WAP EC was significantly higher in 35 BRH and 65 BRH with 50 and 100 DR; and similarly in 7 and 8 WAP with 100 BRH and 65 BRH. In 6 WAP EC only was significant with complete or partial DR. pH was significantly lower between 0 and 4 WAP for 100 BRH without recycling. In drainages, in 0 WAP for mixes composed by CF, and 100 % RD, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Na<sup>+</sup> contents were significantly higher, and conversely in 8 WAP. Cl<sup>-</sup> concentration, regardless of the substrate, was lower in 50 and 100 % RD. No effects were detected in leaf tissues or substrates, except the Na<sup>+</sup> concentration in substrates. These findings could be related to the substrate's ion adsorption and desorption as an influence of microorganisms and chemical breakdown.

**Keywords:** Substrates, recycling, cut flowers, sodium, chloride, sulfur.

# Contenido

Contenido	Pág.
<b>1. Capítulo 1. Diseño y construcción de un modelo del sistema automático de reciclaje de drenajes para el cultivo de rosa.....</b>	<b>3</b>
1.1 Resumen.....	3
1.2 Introducción.....	4
1.2.1 Sistemas de cultivo sin suelo.....	4
1.2.2 Reciclaje de drenajes.....	5
1.2.3 Sistema de filtración. Control de patógenos.....	7
1.2.4 Automatización y control para un sistema de reciclaje de drenajes.....	8
1.3 Materiales y métodos.....	15
1.3.1 Ubicación.....	15
1.3.2 Invernaderos y camas de cultivo.....	15
1.3.3 Fórmulas de fertirriego.....	16
1.3.4 Sistema para la aplicación de fertirriego.....	16
1.3.5 Sustratos para el establecimiento de las plantas.....	16
1.3.6 Infraestructura y obras civiles.....	17
1.3.7 Tratamientos y diseño experimental.....	17
1.4 Resultados.....	19
1.4.1 Sistema automático para el reciclaje de drenajes (SARD).....	19
<b>2. Capítulo 2. Evaluación del funcionamiento del sistema de acuerdo con la conductividad eléctrica y pH de la solución drenada.....</b>	<b>35</b>
2.1 Resumen.....	35
2.2 Introducción.....	36
2.3 Materiales y métodos.....	38
2.3.1 Ubicación.....	38
2.3.2 Material vegetal y manejo del cultivo.....	38
2.3.3 Tratamientos y diseño experimental.....	39
2.3.4 Variables respuesta y análisis estadístico.....	40
2.4 Resultados y discusión.....	41
<b>3. Capítulo 3. Evaluación del comportamiento del sistema de reciclaje en términos de Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y S.....</b>	<b>46</b>
3.1 Resumen.....	46
3.2 Introducción.....	47
3.3 Materiales y métodos.....	50
3.3.1 Ubicación.....	50
3.3.2 Material vegetal y manejo del cultivo.....	50

3.3.3	Tratamientos y diseño experimental .....	51
3.3.4	Variables respuesta y análisis estadístico .....	53
3.4	Resultados y discusión .....	53
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>61</b>
4.1	Conclusiones .....	61
4.2	Recomendaciones .....	63

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1-1:</b> Sistemas de cultivo con reciclaje de drenajes de tipo cerrado, utilizados en la agricultura europea.....	6
<b>Figura 1-1-2:</b> Configuración básica para los sistemas de cultivo sin suelo. A. Sistema de tipo abierto o de drenaje libre. B. Sistema de tipo cerrado; involucra la captación, filtrado, desinfección y tratamiento de la solución fertilizante drenada, con la finalidad de reciclarla al cultivo. ....	10
<b>Figura 1-1-3:</b> Sistemas para la preparación de la solución de fertirriego con base en CE y pH objetivo. La adición de soluciones y ácido, la adquisición de señales de los sensores y la activación de válvulas y electrobombas se realiza a través de un PLC o DAQ. A. Inyección en línea de los fertilizantes líquidos y el con base en algunas características químicas del agua procedente del reservorio. B. Preparación de la mezcla de solución fertilizante en un contenedor para luego ser aplicada al cultivo. ....	12
<b>Figura 1-1-4:</b> Sistema de inyección de fertilizantes líquidos a la línea de riego mediante la succión generada por un Venturi. ....	13
<b>Figura 1-1-5:</b> Controlador lógico programable para la automatización y control aplicada a los sistemas de riego y manejo del microclima en invernadero. ....	14
<b>Figura 1-1-6:</b> Diagrama funcional de un sistema de adquisición de datos basado en un PC. Adaptado de Park y MacKay (2003). ....	15
<b>Figura 1-1-7:</b> Adecuación de canaletas para la recolección de drenajes baja cada cama de cultivo. Se observan los contenedores de 20 L en los cuales es captada la solución drenada. ....	18
<b>Figura 1-1-8:</b> En este diagrama se destacan las tres fases del reciclaje, los sensores y activadores utilizados: SV, Sensor de volumen; EV, electroválvula; EB, electrobomba; FA, filtro de anillos; UV, lámpara de radiación UV. Los tanques son simbolizados por rectángulos, donde: <i>dTR</i> , drenajes del tratamiento <i>T</i> (en este ejemplo 3, con tres repeticiones) de la especie <i>R</i> (Rosa); <i>rTR</i> , tanque de recomposición, preparación de solución nueva y de monitoreo de variables; <i>aTR</i> , tanque de almacenamiento de solución nutritiva. Lix, solución lixiviada.....	21
<b>Figura 1-1-9:</b> Medición del volumen de solución nutritiva en un tanque a través de un sensor de nivel por ultrasonido. ....	24
<b>Figura 1-1-10:</b> Vista de los paneles de control del sistema automático de drenajes en los cultivos de clavel y rosa. A. Primera versión del software de control; reciclaba y recomponía la solución drenada cuando se requería. B. Segunda versión del software de control que reciclaba la solución hasta agotarla. ....	29

<b>Figura 2-1:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica y del pH en los drenajes para el sistema de cultivo de rosa en tres sustratos y con tres porcentajes de reciclaje de drenajes. A. Tendencia creciente de la CE con respecto a las semanas después de poda y B. Comportamiento del pH a lo largo del periodo de evaluación.....	44
<b>Figura 3-1:</b> Contenidos de azufre para cada uno de los estadios evaluados en A. Drenajes, $\text{SO}_4^{-2}$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); B. Sustratos y C. Tejido, S ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). .....	56
<b>Figura 3-2:</b> Contenidos de sodio para cada uno de los estadios evaluados en A. Drenajes, $\text{Na}^+$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); B. Sustratos y C. Tejido ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). .....	57
<b>Figura 3-3:</b> Contenidos de cloruro para cada uno de los estadios evaluados en A. Drenajes ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). .....	58

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1-1:</b> Propiedades químicas del agua de reservorio empleada durante el ensayo de campo. ....	16
<b>Tabla 1-1-2:</b> Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes. ....	18
<b>Tabla 2-1:</b> Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo.....	40
<b>Tabla 2-2:</b> Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes. ....	40
<b>Tabla 2-3:</b> Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de CE ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ) $\pm$ DS para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes SARD. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a $p<0,05$ .....	45
<b>Tabla 2-4:</b> Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de pH $\pm$ DS para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes SARD. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a $p<0,05$ .....	45
<b>Tabla 3-1:</b> Clasificación de elementos en la solución nutritiva de acuerdo con su tasa de absorción.....	48
<b>Tabla 3-2:</b> Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo.....	52
<b>Tabla 3-3:</b> Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes. ....	52



## Introducción

La producción agrícola demanda cantidades considerables de fertilizantes y productos para la protección de cultivos con el fin de incrementar los rendimientos. Entre 2017 y 2018 el consumo de fertilizantes alcanzó un estimado de 187 millones de toneladas, donde la mayor tasa de crecimiento en la demanda se presentó en África, Europa del este y Asia central y Latinoamérica (IFA, 2018). La fertilización de cultivos se realiza con un nivel de exceso para compensar las pérdidas de fertilizantes por deriva, lixiviación o volatilización y permitir que las plantas absorban lo requerido (Good y Beatty, 2011). Sin embargo, estas pérdidas reducen la eficiencia económica e incrementan la contaminación de suelos, cuerpos de agua y atmósfera (Khan *et al.*, 2017; Savci, 2012).

Alternativas como los sistemas de cultivo sin suelo (CSS) se han implementado en zonas donde los suelos presentan limitaciones químicas, físicas o sanitarias. En este tipo de sistemas se utilizan como sustituto del suelo materiales orgánicos o inorgánicos o mezclas de estos, de distintas características físicas y químicas; la fertilización comúnmente se aplica en solución vía fertirriego, lo que permite el mayor aprovechamiento del agua y de los nutrientes aplicados a las plantas. Para facilitar el flujo de solución nutritiva en el medio rizosférico y reducir la salinización del sustrato (Sonneveld y van den Bos, 1995) se aplica un volumen de solución que asegure un porcentaje de drenaje entre el 30 y 50 % (Lieth y Oki, 2008), por ende, este exceso se drenará fuera del sistema (sistema a solución perdida), lo que significa que la solución excedente irá a parar al suelo o cuerpos de agua contaminándolos con excesos de iones como nitrato, fosfato, sulfato. Por lo que lo ideal es reciclar una fracción o la totalidad de los drenajes (sistemas semicerrados), lo que permite ahorrar entre el 40 y el 50 % de fertilizantes y agua y reducir los costos operativos y ambientales (Chabite *et al.*, 2017; Putra y Yuliando, 2015; Carrillo-López *et al.*, 2012), aunque esta práctica es más eficiente que los sistemas a solución perdida, si la solución reciclada no es monitoreada en términos de las concentraciones de elementos, generará problemas nutricionales en los cultivos. Eventualmente, la solución reciclada, dadas sus condiciones químicas, tendrá que ser drenada fuera del sistema, pero será un volumen menor comparado con un sistema de solución perdida.

Para mitigar el impacto contaminante tanto de sistemas a solución perdida o semicerrados, en algunos países de la Unión Europea se han declarado directivas que buscan controlar las emisiones de iones contaminantes a las fuentes de agua, entre ellos, el nitrato (European Commission, 2018; Marfá *et al.*, 2000). Estas normas para el control de los drenajes se elaboraron con la finalidad de incentivar a los productores a recircular las soluciones drenadas en los distintos cultivos sembrados en invernadero. Este es el caso de los países bajos donde la contaminación, especialmente de las aguas superficiales, obliga por ley a partir del año 2000, al reciclaje de la solución nutritiva en el 100 % de las superficies cultivadas (Gieling *et al.*, 1997 y van Os, 1999).

Colombia es el mayor exportador de flores a América del Norte y Japón y cuenta con un área productiva de cerca de 8400 ha donde se destacan productos como los pompones, los claveles y las rosas (MADR, 2019); de esta manera, el cultivo de flores de corte es uno de los principales contribuyentes al producto interno bruto agropecuario, y, además, en 2018 participó con cerca del 16 % del mercado mundial (OEC, 2020).

En el país el clavel se ha cultivado en sustratos orgánicos desde la década de los 1980s, a razón de la incidencia de patógenos limitantes como *Fusarium oxysporum* f. sp. *dianthi* (Fod), *Phialophora cinerescens* (Wollenw.) van Beyma y *Rhizoctonia solani* Kuhn (Patiño, 2000; Garcés de Granada *et al.*, 1997) y más recientemente los cultivos de rosa, al obtener mayores producciones y menores incidencias de plagas y patógenos (van Os, 2019), pero, al utilizar un CSS a solución perdida se afecta negativamente el ecosistema. A pesar del estímulo a adoptar buenas prácticas agrícolas (Florverde<sup>®</sup>, 2018) en el país existen pocos estudios sobre el establecimiento de un CSS con reciclaje de drenajes y sobre el comportamiento de la solución reciclada en términos de algunos iones de importancia ambiental y nutricional para los cultivos.

Por lo anterior, en el marco del macroproyecto “Producción más limpia de rosa y clavel en sistemas de cultivo sin suelo en la Sabana de Bogotá”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural - MADR, se diseñó, construyó e implementó un sistema automático para el reciclaje de drenajes y se estudió el comportamiento de algunas variables determinantes en un sistema de cultivo en sustratos con reciclaje de drenajes para clavel y rosa. Esto, con la finalidad de proveer herramientas para apoyar la toma de decisiones en el manejo del fertirriego, proponer medidas y prácticas de producción más limpia y reducir los consumos de agua y fertilizantes.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar, construir y poner en marcha un sistema automático para el reciclaje de drenajes en el cultivo de rosa bajo cubierta en condiciones de la Sabana de Bogotá.

### **Objetivos específicos**

1. Diseñar y construir un sistema automático de reciclaje de drenajes para el cultivo de rosa.
2. Evaluar el funcionamiento del sistema de acuerdo con las variables conductividad eléctrica y pH de la solución drenada.
3. Evaluar el comportamiento del sistema de reciclaje en términos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y S.



# **1. Capítulo 1. Diseño y construcción de un modelo del sistema automático de reciclaje de drenajes para el cultivo de rosa**

## **1.1 Resumen**

En los sistemas de cultivo sin suelo es posible recuperar, evaluar y reaplicar la solución excedente drenada. En el país, esta práctica no es implementada de manera correcta, pues generalmente, los drenajes son conducidos hacia el reservorio de agua, misma que es utilizada para preparar la mezcla de fertirriego, lo que significa que debería variarse la fórmula de nutrición en cada evento de riego. Para el cultivo de rosa, desde hace cerca de diez años se han venido implementado la siembra en sustratos como la cascarilla de arroz quemada y la fibra de coco, y aunque se han realizado avances en la caracterización física y química de estos sustratos, no se verifica el uso de un sistema para el reciclaje de drenajes. Para tal fin, se diseñó y construyó un sistema de reciclaje de drenajes que permitiera captar, filtrar y evaluar la solución drenada en términos del volumen, pH, conductividad eléctrica y concentración de sodio, cloruro y sulfato, para posteriormente volverla a aplicar en el mismo cultivo, además, de preparar solución nueva cada vez que se requiriera. El sistema de reciclaje se estableció para un cultivo de rosa cv. 'Charlotte' sembrado en mezclas de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco y se consideraron tres diferentes porcentajes de reciclaje (0, 50 y 100 %). Se diseñaron algoritmos que permitieran evaluar los valores críticos de las variables medidas y se tomaran decisiones automáticamente cada vez que no se satisficían los valores adecuados conforme con el manejo de los sistemas comerciales. A pesar de ser un prototipo experimental, el sistema fue capaz de manejar adecuadamente la solución reciclada permitiendo recopilar datos fundamentales para la evaluación del sistema y sus posteriores ajustes. Es necesario explorar en equipos robustos y de menor costo para de esta manera masificar este tipo de tecnologías en el país.

## 1.2 Introducción

La implementación de un CSS de tipo semicerrado reduce el uso del agua, fertilizantes y productos para el control fitosanitario y por tanto los costos de producción, así como los costos ambientales derivados de las malas prácticas que podrían acarrear multas ambientales (Mateo-Sagasta, 2017). El reciclaje de drenajes solo es posible en sistemas CSS ya que permiten la captación de los drenajes más fácilmente y con menos contaminación por partículas. Para el funcionamiento del reciclaje de drenajes se requiere de un sistema de automatización y control cuyos equipos y elementos deben ser apropiados para funcionar en las condiciones variables de humedad, temperatura, salinidad y presión hidráulica. Es fundamental el manejo de la calidad de la solución a ser reciclada en términos de CE, pH, concentración de iones, los volúmenes y eventos de riego, los cuales deberán ser controlados por el sistema automático, basado en características y exigencias propias de la especie de interés (Gorbe y Calatayud, 2010).

### 1.2.1 Sistemas de cultivo sin suelo

Los sistemas de cultivo sin suelo utilizan materiales orgánicos o inorgánicos para proveer un medio de anclaje y aporte nutricional a las especies allí sembradas. Entre los sustratos inorgánicos sintéticos mayormente empleados se encuentran la perlita, la lana de roca y la zeolita (Papadopoulus *et al.*, 2008), estos son ampliamente utilizados en Europa y rara vez en sistemas de producción agrícola bajo cubierta a nivel local. Por otro lado, los materiales orgánicos más comunes para ser utilizados como medios de crecimiento son la turba, el compost y los residuos agroindustriales como la fibra de coco (Xiong *et al.*, 2017), la cascarilla de arroz, el mesocarpo del fruto de palma de aceite (Madrigal-Valverde y Garbanzo-León, 2018). La selección y uso de los sustratos está en función de la disponibilidad y los costos, y, más importante aún, de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de cada material en específico, ya que, al reaccionar con la solución nutritiva en el ambiente radical, sus características variarán en el tiempo y pueden afectar la disponibilidad de nutrientes y retención de agua (Fascella, 2015). Se ha reportado que el rendimiento de especies cultivadas en sistemas sin suelo es mayor en comparación con plantas cultivadas con el sistema tradicional en suelo, lo que hace que esta técnica de cultivo sea de interés como herramienta para incrementar la oferta de especies hortícolas (Tajudeen y Oyenyi, 2018; Raziq, 2007).

Información proveniente de los Países Bajos y Bélgica muestran desechos de agua de cerca de 2000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> (con 20 % de drenaje) y pérdidas de fertilizantes de hasta 5 t ha<sup>-1</sup>/año, para el caso de K y entre 1,2 y 2,7 t ha<sup>-1</sup>/año para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca y S (Breś, 2009 y Marins Peil *et al.*, 1998). Esto claramente demuestra el uso ineficiente de agua y fertilizantes en sistemas de cultivo de tipo abierto donde los drenajes son vertidos al suelo. Por tal razón, en varios países se han implementado normas para el control de los drenajes, obligando a los productores a reciclar las soluciones drenadas en los distintos cultivos sembrados en invernadero. En los países bajos se permiten descargas de solución nutritiva solo si el sodio en la solución del drenaje alcanza concentraciones entre 3 y 8 mM, dependiendo de la especie cultivada. Por ejemplo, solo se descargan los drenajes con concentraciones de sodio mayores que 4 mM y a 8 mM, para rosas y tomate, respectivamente (Baas y van den Berg, 1999).

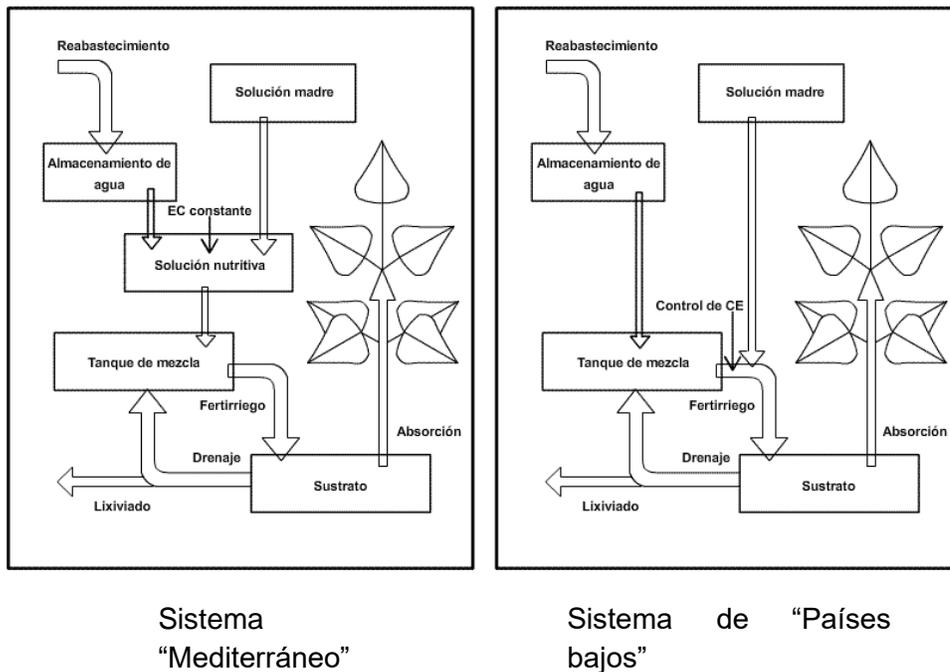
En Colombia desde 1992 se utiliza el cultivo en sustratos en sistema abierto para la producción de flores de corte y específicamente para el cultivo de rosa, desde la década de los 2010. En especial para flores de corte se usan, simples o en mezclas, la cascarilla de arroz, la fibra de coco y el compostaje a base de la biomasa del propio cultivo.

### **1.2.2 Reciclaje de drenajes**

Una de las formas de contrarrestar la contaminación ambiental generada por el sistema de cultivo en sustrato con drenaje libre, es la utilización de técnicas de reciclaje de los drenajes, con lo que se aprovecha su potencial fertilizante. Esto se logra mediante la implementación de un sistema adecuado para captar los drenajes, trasladarlos y tratarlos para su reciclaje.

De acuerdo con Stanghellini y Kempkes (2002), en Europa se utilizan dos tipos de sistemas para el reciclaje de drenajes que se diferencian en la manera en que los fertilizantes son agregados para ser mezclados con el agua de riego. El sistema de los Países Bajos requiere el control en línea de CE y pH, y la inyección automática de los fertilizantes para ajustar a valores predeterminados, mientras que el sistema mediterráneo, apropiado para la operación manual, una cantidad determinada de solución nutritiva es preparada y usada para reponer las pérdidas del sistema hasta que se agote (Figura 1-1).

**Figura 1-1:** Sistemas de cultivo con reciclaje de drenajes de tipo cerrado, utilizados en la agricultura europea.



Adaptado de Stanghellini y Kempkes (2002).

El éxito de los sistemas de cultivo con reciclaje de drenajes dependerá del conocimiento y manejo de la solución nutritiva. La producción en invernadero ofrece la oportunidad de controlar la aplicación de agua a los cultivos, pero, en algunos casos, las aguas utilizadas para riego tienen altas concentraciones de sales, en especial de  $\text{Na}^+$  y de  $\text{Cl}^-$ , iones que al ser poco absorbidos por la mayoría de las plantas pueden afectar el escaso volumen de raíces, característico de los cultivos sin suelo, y reducir la productividad (Rouphael *et al.*, 2017; Rouphael *et al.*, 2012; Sonneveld y van Der Burg, 1991). En el contexto local existen reportes de hasta 10 mM de  $\text{Cl}^-$  en aguas del río Bogotá, uno de los principales cuerpos de agua que alimenta distritos de riego y canales de agua para riego en la Sabana de Bogotá (Ramos, 2009). Esta acumulación se puede prevenir mediante el lavado con la aplicación de agua adicional, lo que lleva a pérdidas considerables de nutrientes (Giuffrida *et al.*, 2003; Sonneveld, 2000). Los efectos negativos de la salinidad con respecto a la calidad en los cultivos de flores de corte son la reducción del diámetro y longitud del tallo y disminución de firmeza y vida en florero (De Kreij y Van Den Berg, 1990); y, en el caso de rosa, la reducción en el crecimiento y daños estéticos que influyen en su comercialización (Cabrera *et al.*, 2009).

De acuerdo con estudios realizados por Martínez y Morard (1999), mediante la implementación del sistema sin suelo con reciclaje apropiado de la solución nutritiva se pueden obtener ahorros hasta de 30 y 50 % en agua y fertilizantes, respectivamente. Por otro lado, Richard *et al.* (2001) en un cultivo de rosa que utilizaba un sistema de reciclaje de drenajes de baja tecnología basado en el control a través de la CE, obtuvieron ahorros del 42 % en agua y del 55 % en nutrientes, sin que se afectara la calidad de las flores cosechadas y para el caso de cultivos de rosa, el reciclaje de drenajes no afecta la productividad ni la calidad de las flores cosechadas (Brun *et al.*, 2002).

En el Centro de investigación Cabrils del IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries) se llevaron a cabo experimentos con clavel y gerbera, con el objetivo de mostrar la confiabilidad técnica y económica de los sistemas sin suelo de tipo cerrado bajo condiciones del Mediterráneo. Para el cultivo de clavel, concluyeron que se pueden producir flores de excelente calidad utilizando agua de características químicas promedio, esto es, con bajas concentraciones de iones que tienden a acumularse como el sodio y el cloruro, maximizando la eficiencia en el uso de agua y nutrientes. En otros estudios realizados en un cultivo de tomate con reciclaje automático, se alcanzaron ahorros de agua del 31,5 % en el fertirriego y porcentajes de ahorro de 31,4 de fósforo, 29,9 de nitrógeno, 29,8 de potasio y 28,2 de calcio (Dhakal *et al.*, 2005).

### **1.2.3 Sistema de filtración. Control de patógenos**

La filtración de la solución drenada a reciclar debe permitir retener sólidos en la solución como residuos de sustrato, de tejido de las plantas y de algunas sustancias exudadas por las raíces, estas últimas, podrían inhibir el crecimiento de las raíces y producir auto-toxicidad (Pramanik *et al.*, 2000).

Uno de los problemas comunes en los sistemas de reciclaje de drenajes son los patógenos que se diseminan en medio líquido, ya que el reciclaje de una solución contaminada favorecería su dispersión a todo el cultivo (Lee y Lee, 2019; Ikeda, 2002; Poncet *et al.*, 2001). Las técnicas de desinfección pasiva, tales como la filtración lenta, mantienen parte de la microflora residente viva; mientras que los métodos activos, como UV, pasteurización y el uso de químicos, reducen las poblaciones de microorganismos benéficos y perjudiciales, por ello, para un uso óptimo, se

deberían preferir las alternativas pasivas y no las técnicas que afecten la flora residente. El uso de métodos microbiológicos es ambientalmente amigable, los microorganismos actúan en todo el sistema, pero se debe conocer más sobre el proceso completo en el medio de crecimiento y en la solución nutritiva (van Os y Alsanius, 2004). Los métodos de ozonización, termo desinfección y UV requieren alta inversión y por esto solo se pueden usar en áreas de producción que justifiquen su costo, igualmente, deben usarse en conjunto con los tradicionales filtros de arena para aumentar su efectividad (Ehret *et al.*, 2001 y Barth, 1999).

Distintas experiencias han verificado la efectividad del filtro de arena de flujo lento (FAFL) (Prenafeta-Boldú *et al.*, 2017; Nakamoto *et al.*, 2014; Hoitink y Krause, 1999) y proponen que el FAFL es un método apropiado para el control de microorganismos presentes en la solución, ya que es un sistema de bajo costo cuya acción radica en el control natural ejercido física y biológicamente (Calvo-Bado *et al.*, 2003). Koohakan *et al.* (2004) encontraron que sistemas de cultivo tales como NFT y DFT (Deep Flow Technique) contenían altas cantidades de *Pythium* spp., comparados con los sistemas basados en sustrato; además, el sistema NFT contenía la población más grande de *Fusarium* spp. con relación a los otros sistemas de cultivo sin suelo.

Uno de los riesgos del uso de sustancias químicas para la desinfección de las soluciones nutritivas son los residuos en la solución drenada, por ejemplo, utilizar compuestos con cloro no es justificable por los riesgos ambientales, de salud y de trazas en la solución a reciclar. Por lo anterior, el uso de métodos químicos para la desinfección no es recomendable y se sugieren métodos físicos como la radiación UV y el SSF. Garibaldi *et al.* (2004) estudiaron la efectividad de estos métodos en la reducción de la incidencia de *Phytophthora cryptogea* en plantas de gerbera cv. 'Goldie' cultivadas en un sistema con reciclaje de drenajes y concluyeron que algunos de los mejores controles eran obtenidos por el FAFL y el sistema de radiación UV. En el caso de rosa, en algunas latitudes se ha detectado como patógeno limitante de su producción a *Fusarium oxysporum* (Barguil *et al.*, 2009) y se ha comprobado la efectividad de su desinfección a través de FAFL y UV (Nosir, 2014).

#### **1.2.4 Automatización y control para un sistema de reciclaje de drenajes**

La agricultura es un mercado potencial para los productos tecnológicos y para que la implementación tecnológica sea exitosa, la investigación debe basarse en la utilización de los

productos. Existe una gran necesidad de las aplicaciones y soluciones innovadoras para permitir que sean efectivas y fructíferas para el productor.

El diseño de un controlador automático para la aplicación de agua y fertilizantes requiere la identificación de las propiedades dinámicas de los diferentes sistemas de cultivo (Gielsing *et al.*, 2000), tales como la fenología de la planta, las condiciones climáticas y las características químicas de la solución y del sustrato (Neto *et al.*, 2014; Romero *et al.*, 2012; Massa *et al.*, 2011). El monitoreo de la solución nutritiva en la rizosfera y de las condiciones de clima en el invernadero permitirá un ajuste eficiente de la solución entrante; que, mediante el control en línea, pueden reducir los altos porcentajes de drenaje (van Straten y Gielsing, 2004).

Lecomte *et al.* (2005) desarrollaron una herramienta de control multivariado en invernadero para el manejar la humedad y la conductividad eléctrica del sustrato, la tasa de drenaje, así como la humedad relativa y temperatura dentro del invernadero; los resultados ofrecen metodologías que contemplan reglas de programación útiles en el control en tiempo real en agricultura protegida. Por otra parte, el modelo dinámico IntelliGrow 2.0 se basa en el control de clima y puede generar ahorros de hasta 40 % en la energía requerida (Markvart *et al.*, 2008).

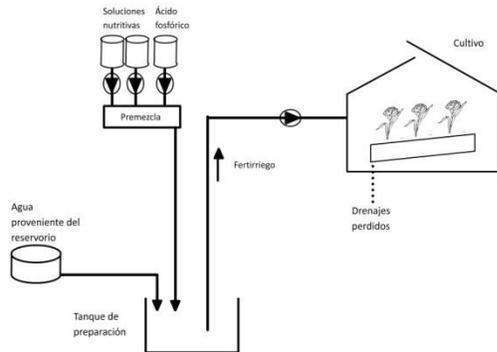
Se han desarrollado varios modelos para la programación del reciclaje y recomposición balanceada de la solución en los cultivos de tipo cerrado (de Koning, 2006; Savvas, 2001; Martinez y Morard, 2000) que configuran sistemas de apoyo para la toma de decisiones que hacen que la fertirrigación sea un proceso eficiente. Estos sistemas se basan en submodelos que incluyen el clima, el balance hídrico, el balance de algunos nutrientes, las características del suelo y el estado de desarrollo del cultivo y cuya implementación ha significado un bajo consumo de nutrientes, la reducción en la acumulación de sodio y cloruro, y el control de la CE, sin afectar la productividad y la calidad (Brajeul, 2006 y Marcelis *et al.* 2006).

## Reciclaje automático

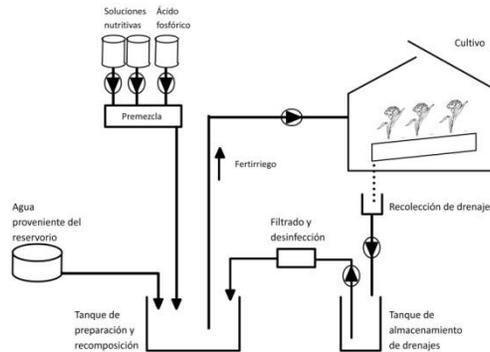
El reciclaje automático de drenajes de soluciones fertilizantes se realiza en sistemas de tipo cerrado o semicerrado, a diferencia de los sistemas abiertos o de drenaje libre en donde los excedentes de la solución fertilizante son vertidos al suelo o a los acuíferos. El uso de sistemas cerrados se considera una BPA (FAO, 2003) por cuanto la solución de nutrientes es almacenada, tratada y reutilizada reduciendo la contaminación del suelo y fuentes de agua. En Colombia la solución fertilizante que sobra es desechada y en algunos casos se regresa a los reservorios de agua (Cuervo *et al.*, 2011). Las Figuras 1-2A y 1-2B, muestran la configuración básica de los sistemas abierto y cerrado.

**Figura 1-2:** Configuración básica para los sistemas de cultivo sin suelo. A. Sistema de tipo abierto o de drenaje libre. B. Sistema de tipo cerrado: involucra la captación, filtrado, desinfección y tratamiento de la solución fertilizante drenada, con la finalidad de reciclarla al cultivo.

### A. Sistema abierto



### B. Sistema cerrado



## Equipos e infraestructura usados en los sistemas abiertos y cerrados

**Fuente de agua:** Puede provenir de una corriente de agua o de un reservorio; en general, en los invernaderos en la sabana de Bogotá la fuente de agua proviene de acuíferos subterráneos, aguas lluvias captadas en reservorios, o de pequeños ríos o quebradas. La calidad del agua para el fertirriego puede ser monitoreada con el uso de sensores de pH, CE,  $\text{Na}^+$ , etc. La información provista por los sensores permite controlar la fórmula de fertilizantes a aplicar al cultivo.

**Sistema de Bombeo:** Generalmente se compone de una bomba centrífuga y un motor comúnmente eléctrico que posee el activador o arrancador que permitirá la automatización a través del sistema de control. El objetivo es proporcionar la cantidad de agua (caudal) y la presión necesaria para aplicar los requerimientos de agua a los cultivos. El diseñador debe tener en cuenta

que la bomba debe ser seleccionada con unas características (curvas de la bomba, caudal-presión) que le permitan aplicar la cantidad de agua necesaria para el cultivo, así como, vencer las pérdidas de presión que se generan en el sistema de filtrado, en las diferentes tuberías y en los accesorios utilizados. La presión que debe llegar al emisor de riego (gotero) es aquella presión media para el funcionamiento del emisor que genera un caudal promedio (Li *et al.*, 2007).

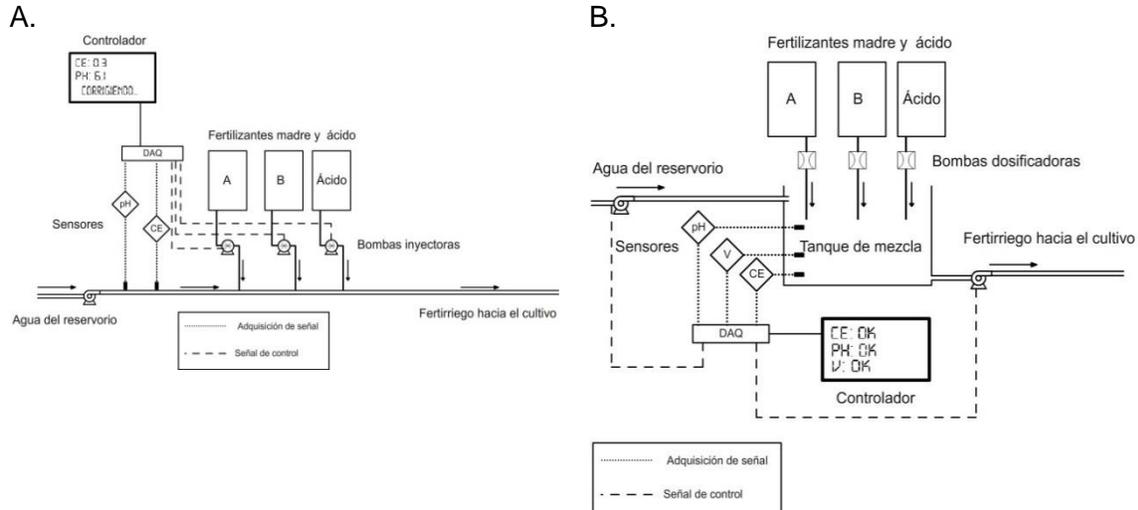
**Sistema de Filtrado:** La configuración de este sistema depende de la calidad de agua utilizada y que es función de la fuente disponible (subterránea, superficial, lluvia, etc.). Las aguas que contengan materiales sólidos en suspensión, partículas minerales o componentes orgánicos, deben ser tratadas antes de entrar al cabezal de control. Los filtros utilizados son hidrociclones que son usados en corrientes superficiales que tienen gran cantidad de material grueso, arenas y gravas pequeñas. Los filtros de malla o de disco se utilizan para retener partículas sólidas no elásticas. Existe una gran variedad de este tipo de filtros, las diferencias entre uno y otro se encuentran en la superficie de la malla, la resistencia a las presiones que se originan cuando el filtro se encuentra saturado de material retenido, la facilidad de lavado, mantenimiento y costo. Los filtros de malla deben ser instalados aguas abajo de los equipos de inyección de fertilizantes, cuando se instala el filtro de arena los filtros de malla deben ubicarse después de éstos (Rodríguez, 2004). Los filtros de arena, generalmente de sílice, son dispositivos utilizados para filtrar el agua que pasa a través de una sección de arena que tiene la propiedad de fijar la materia orgánica y de retener partículas minerales contenidas en el agua a filtrar. Los filtros de arena normalmente van instalados antes del sistema de fertirriego; se aconseja instalarlos en pares para facilitar el retrolavado. Los filtros de anillos combinan los efectos que producen los filtros de malla y de arena. El sistema de filtrado debe tener manómetros para conocer las presiones a la entrada y a la salida de este; estas diferencias de presión, que para un sistema compuesto de filtro de arena y de malla no deben ser mayores que 10-12 mca, son criterios utilizados para realizar el retrolavado manual o automático del sistema de filtrado. El retrolavado automático se realiza previa lectura de los sensores de presión, si la diferencia de presión es mayor que la estipulada en la programación, se envía la señal y se accionan automáticamente un juego de válvulas que permiten los cambios de flujo del agua.

**Sistema de Inyección de Fertilizantes:** Es utilizado para preparar la solución de fertirriego con base en una fórmula fertilizante específica para cada cultivo. Su principio es la inyección de solución fertilizante concentrada a un flujo de agua cruda previamente filtrada. Se requiere de tanques

construidos en un material resistente a la degradación por químicos y a la radiación solar con la finalidad de almacenar la solución fertilizante concentrada. La inyección de fertilizante debe tener una proporción adecuada con el objeto de suministrar los requerimientos nutricionales de la planta.

Este sistema de preparación de fertirriego tiene dos opciones. La primera consiste en inyectar la solución fertilizante concentrada desde unos tanques que la contienen, al caudal de agua que fluye por la tubería. En este esquema la dosificación del fertilizante depende del caudal de la tubería, la concentración de sales en la fórmula fertilizante y el caudal de inyección. La segunda consiste en preparar la mezcla de fertirriego, en un tanque dispuesto en serie con el sistema de riego; una vez se garantice que hay suficiente solución fertilizante para satisfacer la demanda del cultivo, se deriva a las líneas de aplicación en campo (Figura 1-3).

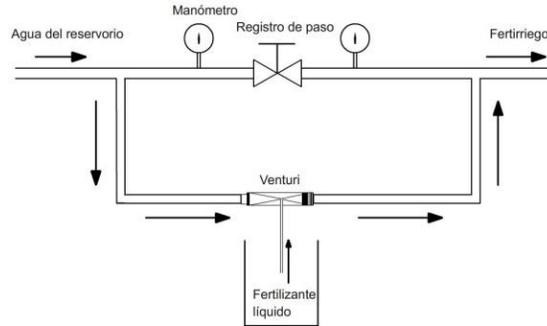
**Figura 1-3:** Sistemas para la preparación de la solución de fertirriego con base en CE y pH objetivo. La adición de soluciones y ácido, la adquisición de señales de los sensores y la activación de válvulas y electrobombas se realiza a través de un PLC o DAQ. A. Inyección en línea de los fertilizantes líquidos con base en algunas características químicas del agua procedente del reservorio. B. Preparación de la mezcla de solución fertilizante en un contenedor para luego ser aplicada al cultivo.



La inyección de fertilizante puede ser activa o pasiva dependiendo si se requiere energía externa para activar los inyectoras. El sistema más utilizado con inyección pasiva es el Venturi, cuyo principio físico de funcionamiento consiste en lograr una caída de presión en un estrechamiento que permite inyectar el fertilizante con presiones pequeñas (Figura 1-4). Dentro de los sistemas

que utilizan inyección activa, se encuentran las bombas inyectoras; existe una amplia gama de estos equipos en el mercado; pueden ser accionados eléctrica o hidráulicamente.

**Figura 1-4:** Sistema de inyección de fertilizantes líquidos a la línea de riego mediante la succión generada por un Venturi.



**Controlador del fertirriego:** El diseño de un controlador para la aplicación de agua y fertilizantes requiere la identificación de las propiedades dinámicas de los sistemas de cultivo (Gieling *et al.*, 2000). Los equipos controladores deberían ser lógicos programables (PLC). En muchas ocasiones solo existen temporizadores<sup>1</sup> para controlar el riego y no controladores activados en función de sensores de humedad del suelo, temperatura, humedad relativa, etc. Un PLC es un controlador especial basado en un microprocesador que usa memoria programable para almacenar instrucciones e implementar funciones lógicas, de secuencia, conteo, temporización y aritméticas, con el objetivo de controlar equipos y procesos (Bolton, 2006). Los PLC generalmente son utilizados en la industria, y puesto que, el mejoramiento de la productividad agrícola requiere de sistemas de automatización y control, su implementación se justifica con el objetivo de aumentar la eficiencia en el control de la aplicación de fertirriego y clima en invernaderos, entre otros (Figura 1-5).

Un controlador de riego permite la activación de los sistemas de bombeo, de inyección de fertilizante, de válvulas reguladoras de presión y de válvulas hidráulicas que se cierran o se abren atendiendo ordenes hidráulicas o neumáticas. Las válvulas a su vez pueden actuar como

<sup>1</sup> Este tipo de controlador funciona con base en el establecimiento de tiempos predeterminados por el usuario para el accionamiento de los diferentes equipos.

reguladoras de presión, limitadoras de caudal, o como válvulas volumétricas. Si se incorporan solenoides a estas, responden a ordenes eléctricas en lugar de hidráulicas, denominándose válvulas solenoides (Pizarro, 1990).

**Figura 1-5:** Controlador lógico programable para la automatización y control aplicada a los sistemas de riego y manejo del microclima en invernadero.



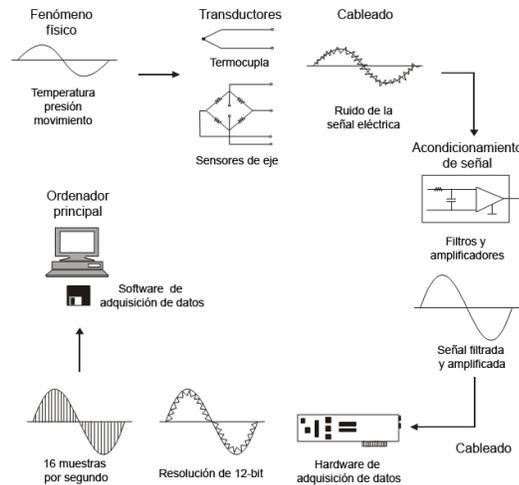
### Adquisición de datos

La adquisición de datos es el proceso por el cual las variables de estado del sistema (temperatura, HR, CE, pH, etc.) que son registradas a través de la señal eléctrica que proporcionan los sensores, son transformadas a sus magnitudes reales en formato digital para el procesamiento, análisis y almacenamiento en un computador. En la mayoría de las aplicaciones, un sistema de adquisición de datos (DAS o DAQ)<sup>2</sup> no solo es diseñado para adquirir datos, sino también para actuar sobre ellos. Por esto, cuando se hace referencia a DAQs, en muchas ocasiones se incluyen aspectos relacionados con el control del sistema completo (Park y MacKay, 2003) (Figura 1-6). El control es el proceso por el cual las señales digitales que controlan el hardware son transformadas a un formato para ser usadas por unidades de control tales como activadores y relevos. Estas unidades controlan un proceso determinado. El sistema de almacenamiento puede constar de un “data-logger”, y la información que almacena posteriormente es descargada a un computador personal (PC) con la finalidad de visualización y procesamiento de la información. En muchas ocasiones el PC se utiliza como controlador y almacenador de información.

---

<sup>2</sup>Siglas conocidas de la palabra en ingles que significa sistema de adquisición de datos (Data Acquisition System or Data AcQuisition).

**Figura 1-6:** Diagrama funcional de un sistema de adquisición de datos basado en un PC. Adaptado de Park y MacKay (2003).



## 1.3 Materiales y métodos

### 1.3.1 Ubicación

El proyecto se realizó en el Centro de Biotecnología Agropecuaria del SENA, ubicado en el municipio de Mosquera (4°41' N, 74°13' O; 2516 msnm), con promedios anuales de temperatura y lluvia de 12,6 °C y 670 mm, respectivamente y con características de zona de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) (Guzmán, 1996).

### 1.3.2 Invernaderos y camas de cultivo

Se dispuso de un invernadero tradicional en madera cubierto con plástico AgrocLEAR® (Productos Químicos Andinos, Colombia) con cinco naves de 65 x 6,8 m cada una, sembradas con rosa cv. 'Charlotte', injertada sobre 'Natal Briar'. El agua empleada para el fertirriego provino de un reservorio de 1042 m<sup>3</sup> de capacidad construido junto al área de invernaderos. El cultivo estaba conformado por 33 camas suspendidas e inclinadas, de 15 x 0,8 m, construidas en madera y guaya de 1/8", en las que se ubicaron materas de 8 L constituyendo una densidad de siembra de 7 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero.

### 1.3.3 Fórmulas de fertirriego

La fórmula fertilizante, en  $\text{mg.L}^{-1}$ , fue 170 de nitrógeno total (15 % de  $\text{NH}_4^+$ ); 35 P; 150 K; 110 Ca; 60 Mg; 82 S; 1 Mn; 0,5 Zn; 0,5 Cu; 3 Fe y 0,5 B y 0,1 Mo. Esta fórmula se preparó conforme a las fórmulas comerciales utilizadas en la región y se ajustó de acuerdo con las características del agua proveniente de un reservorio alimentado con agua lluvia y agua del distrito de riego La Ramada, previamente tratada (Tabla 1-1).

**Tabla 1-1-1:** Propiedades químicas promedio del agua de reservorio empleada durante el ensayo de campo.

pH	CE	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Ca}^{2+}$	K	Mg	$\text{Na}^+$	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	( $\text{dS.m}^{-1}$ )	( $\text{mg.L}^{-1}$ )	$\text{mg.L}^{-1}$													
6,6	0,36	79,18	264,69	92,03	3,32	0,59	0,22	18,9	0,22	12,9	44,1	0,38	0,04	0,01	0,05	0,2

<sup>1</sup> como  $\text{CaCO}_3$ .

### 1.3.4 Sistema para la aplicación de fertirriego

Se construyó una estación de fertirriego donde se ubicaron los equipos necesarios, para que, a través de un sistema de inyección por Venturi, se dosificara el fertilizante líquido concentrado en un flujo de agua (Figura 1-7). La solución diluida resultante se distribuyó a los cultivos a través de redes de mangueras de 16 mm de diámetro con goteros tipo espagueti de  $1 \text{ L.h}^{-1}$ . Los eventos de riego fueron controlados a través de un programador Priva® de acuerdo con la evapotranspiración diaria medida con un tanque evaporímetro clase A.

### 1.3.5 Sustratos para el establecimiento de las plantas

Para el establecimiento de las plantas se utilizaron los sustratos cascarilla de arroz (CAQ), con un grado de quemado entre 70 y 100 %, y fibra de coco lavada (FC) (Tabla 1-1-2), solos o en diferentes mezclas volumétricas porcentuales, así: cascarilla de arroz 100 % (100 CAQ), cascarilla de arroz 65 %:fibra de coco 35 % (65 CAQ) y cascarilla de arroz 35 %:fibra de coco 65 % (35 CAQ). Las relaciones de mezclas correspondieron a los niveles del factor experimental sustrato.

### **1.3.6 Infraestructura y obras civiles**

En términos de infraestructura, el sistema automático de reciclaje de drenajes (SARD) constaba de las siguientes áreas, conforme a lo descrito en Cuervo *et al.* (2011) y Cuervo *et al.* (2012): (1) zona de recolección de drenajes, (2) zona de medición de la calidad química de las soluciones recicladas y (3) zona de almacenamiento de drenajes, para su posterior aplicación al cultivo (Figura 1-8).

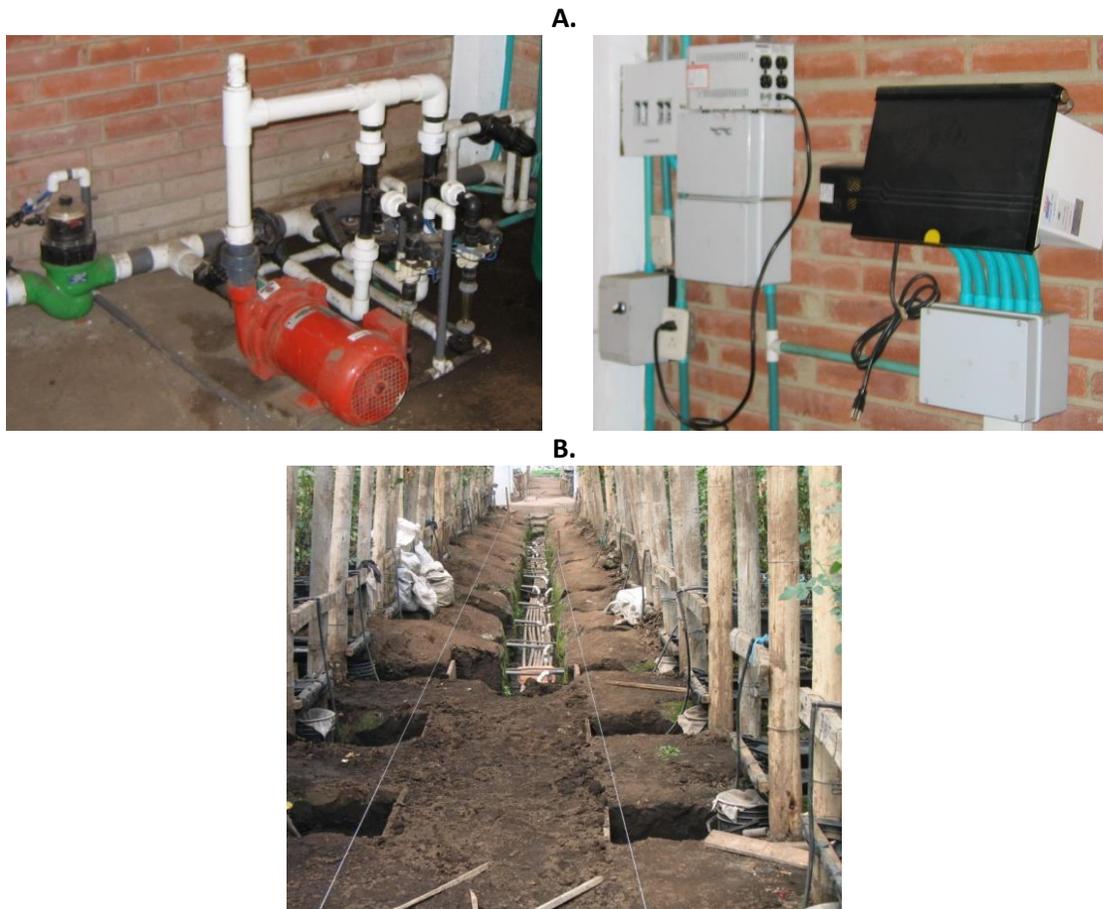
#### **Recolección de drenajes**

Por debajo de cada cama de cultivo se adecuaron películas de plástico color negro calibre 9 a manera de canaletas con 1 % de pendiente para recolectar los drenajes (Figura 1-7). Al inicio de cada cama se ubicó un tanque de 20 L de capacidad el cual recogía y almacenaba los drenajes de cada repetición, donde se medían los volúmenes drenados cada 24 h; posteriormente, se abría un registro y los drenajes se transportaban por gravedad hasta los tanques ubicados en la zona de medición de la calidad química de las soluciones recicladas donde eran evaluadas algunas características de la solución, y se procedía a desechar o no la totalidad o el 50 % de la solución a ser reciclada. Este porcentaje para reciclar constituía el factor Reciclaje con tres niveles 0, 50 y 100 %. Posteriormente, las soluciones eran llevadas hasta la zona de almacenamiento de drenajes para su aplicación al cultivo conforme con los volúmenes diarios establecidos.

### **1.3.7 Tratamientos y diseño experimental**

Los tratamientos se configuraron como la combinación de los niveles de los factores porcentaje de reciclaje (0, 50 y 100 %) y tipos de sustratos (100 CAQ, 65 CAQ y 35 CAQ), para un total de nueve tratamientos con tres repeticiones cada uno. La unidad experimental consistió en una cama de cultivo (Tabla 1-2). Este arreglo bifactorial se realizó bajo un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar, donde la parcela principal correspondió al factor porcentajes de reciclaje y la subparcela al factor tipos de sustratos. Se aclara que de los 9 tratamientos, 6, aquellos con 50 y 100 % de reciclaje, ingresaban al SARD.

**Figura 1-7:** A. Sistema de inyección de fertilizante comandado por un controlador Priva<sup>®</sup>. B. Adecuación de canaletas para la recolección de drenajes bajo cada cama de cultivo. Se observan los contenedores de 20 L en los cuales se recolectó la solución drenada.



**Tabla 1-2:** Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes.

Numeración	Tratamientos	Sustratos	Reciclaje (%)
1	100 CAQ-0 R*	100 CAQ	
7	65 CAQ-0 R*	65 CAQ	0
4	35 CAQ-0 R*	35 CAQ	
2	100 CAQ-50 R	100 CAQ	
8	65 CAQ-50 R	65 CAQ	50
5	35 CAQ-50 R	35 CAQ	
3	100 CAQ-100 R	100 CAQ	
9	65 CAQ-100 R	65 CAQ	100
6	35 CAQ-100 R	35 CAQ	

100 CAQ = 100 % cascarilla de arroz quemada; 65 CAQ = 65 % cascarilla de arroz quemada - 35 % fibra de coco; 35 CAQ = 35 % cascarilla de arroz quemada - 65 % fibra de coco.

\*Tratamientos que no ingresan al SARD.

## 1.4 Resultados

### 1.4.1 Sistema automático para el reciclaje de drenajes (SARD)

El SARD es el resultado de un diseño que conjuga metodologías reportadas por la literatura y necesidades específicas del proyecto y se compuso de tres fases de procesos con sus respectivos equipos (Figura 1-8). Para facilitar la interpretación se designarán las convenciones que se emplearán de aquí en adelante:

El primer carácter: **d**, si se refiere a la fase de drenajes, **r**, si se refiere a la fase recomposición y **a**, si se refiere a almacenamiento.

El segundo carácter, numérico: indica el tratamiento, con su respectiva repetición, de 1 a 3; que para el ejemplo que se muestra a continuación será el tratamiento 3.

El tercer carácter: se refiere a la especie **Rosa**.

Para los sensores y activadores: SV, Sensor de volumen; EV, electroválvula; EB, electrobomba; FA, filtro de anillos; UV, lámpara de radiación UV; pH, CE, NO e I, se refieren a los sensores de las respectivas variables.

#### Fase I. Captación de drenajes

Constituida por dos etapas:

##### 1. Etapa manual

Al inicio de cada cama (repetición) se ubicó un tanque de 20 L de capacidad para recoger los drenajes (**d3.1R**, **d3.2R** y **d3.3R**). Cada mañana se midió el volumen ( $V_d$ ) recolectado con una regla calibrada y el pH ( $pH_d$ ) y la CE ( $CE_d$ ) se midieron con un equipo portátil (Oakton AN 23); posteriormente se accionaba manualmente un registro y los drenajes se transferían por gravedad hasta los tanques ubicados en la zona de medición de la calidad química de las soluciones recicladas (**d3R**). La medición y registro de  $NO_3^-$  y  $NH_4^+$  se realizó semanalmente utilizando un equipo portátil Reflectoquant® Merck.

##### 2. Etapa automática

En esta fase se dispusieron seis tanques de 250 L de capacidad (**d2R**, **d3R**, **d5R**, **d6R**, **d8R** y **d9R**). A cada uno de los tanques llegaba el volumen de las tres repeticiones correspondientes a cada tratamiento. A medida que los tanques se llenaban, los drenajes eran transferidos a la Fase II. La

transferencia de la solución reciclada se realizó por medio de una electrobomba (**EB**) y electroválvulas (**EV**) operadas automáticamente, según el nivel de líquido registrado por sensores de volumen por ultrasonido (**SV**).

### **Fase II. Evaluación y reciclaje de la solución**

La solución drenada procedente de la Fase I se transfería hacia el tanque de 500 L de capacidad (**rTR**) luego de ser filtrados por un filtro de anillo **FA** y una lámpara **UV** para su desinfección. En el tanque **rTR** se recibían uno por uno los tratamientos **T** provenientes de la Fase I. En este tanque estaban instalados los sensores de volumen (**SV**, **pH**, **CE** y de iones (**I**)). El tanque permitía homogenizar las soluciones recicladas, eliminar el 50 % de la solución de los tratamientos que lo requerían (2, 8 y 5) o preparar nuevas soluciones nutritivas.

La solución reciclada debía tener ciertas características químicas para ser reaplicada al cultivo. Estas fueron estimadas a partir de **CE** y **pH**, mediante los electrodos ubicados en el tanque **rTR**. Los rangos para estas variables fueron:  $4 < \text{pH} < 8$  y  $\text{CE}_{\text{máx}} \approx 5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ .

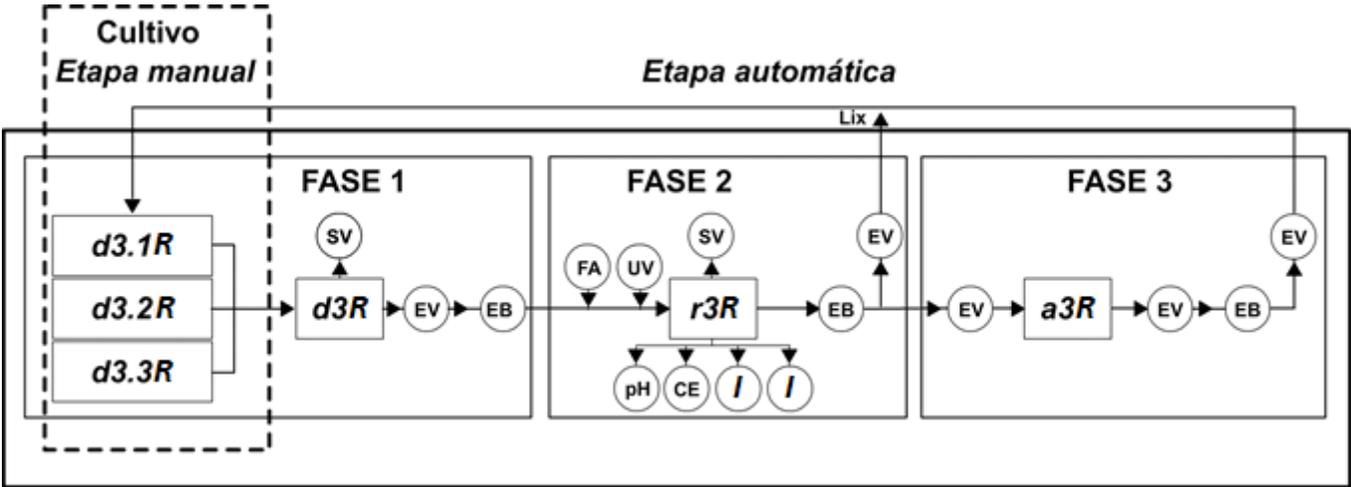
Por ser un sistema novedoso, no existían datos acerca de la variación de estos parámetros en las condiciones de la Sabana de Bogotá. Por tal razón, los rangos fueron flexibles y se manejaron como variables de entrada. Los valores de volumen drenado (**Vd**), **pH** y **CE**, se almacenaron en hojas de cálculo para su posterior análisis.

Cuando el volumen para aplicar era insuficiente para los eventos de fertirriego se procedió a preparar una nueva mezcla de solución nutritiva, con los parámetros  $V = 350 \text{ L}$ ,  $5 < \text{pH} < 7$  y  $1 < \text{CE} < 3,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ .

### **Fase III - Almacenamiento de solución fertilizante para pulsos de fertirriego**

En esta área se contó con seis tanques de 500 L donde se almacenaron las soluciones evaluadas o preparadas en la fase II, para ser usadas como fertirriego para el mismo tratamiento de donde provinieron. El fertirriego se efectuó por pulsos (**P**), definidos con base en las condiciones climáticas y controlados por el sistema de medición de niveles por ultrasonido. El número de **P** estaba asociado con el sustrato y junto con el volumen de riego (**V<sub>r</sub>**) y eran variables de entrada al sistema. Los volúmenes de solución a aplicar por cama por día se basaron en la relación entre el volumen drenado y el volumen aplicado el día anterior. Con base en el número de pulsos y los caudales se calcularon los tiempos de duración de cada evento de riego.

**Figura 1-8:** En este diagrama se destacan las tres fases del reciclaje, los sensores y activadores utilizados: SV, Sensor de volumen; EV, electroválvula; EB, electrobomba; FA, filtro de anillos; UV, lámpara de radiación UV. Los tanques son simbolizados por rectángulos, donde: *dTR*, drenajes del tratamiento *T* (en este ejemplo 3, con tres repeticiones) de la especie *R* (Rosa); *rTR*, tanque de recomposición, preparación de solución nueva y de monitoreo de variables; *aTR*, tanque de almacenamiento de solución nutritiva. Lix, solución lixiviada.





## Equipos que conforman el SARD

El SARD diseñado por el equipo del proyecto, previa evaluación de las condiciones experimentales de campo incluye:

a. Válvulas hidráulicas con solenoide

Las válvulas para uso con fluidos corrosivos, de dos vías, normalmente cerradas y de control eléctrico estaban provistas de un piloto solenoide. Esta válvula usa el diferencial de presión para que el diafragma cierre o abra la válvula. La presión en la cámara de control varía como resultado de la acción del solenoide o de un piloto regulador que puede ser hidráulico. Su función es permitir o no el flujo de solución hacia los tanques de las Fases 2 y 3 del SARD, y del fertirriego. Su voltaje de operación es de 24 VAC (50-60 Hz) y el rango de presión de operación entre 10-150 psi (Bermad Irrigation, 2010).

b. Válvulas de control eléctrico on-off.

Se utilizaron válvulas especiales para fluidos corrosivos. Las válvulas de diámetro de  $\frac{1}{2}$ ", son de 2/2 vías, normalmente cerradas y a diferencia de las válvulas anteriores, el solenoide afectaba directamente el paso del fluido. Se utilizaron a la salida de todos los tanques de almacenamiento usados (de drenaje y de solución recompuesta). Su función era permitir el flujo de solución en función de la orden que generara el controlador del SARD. Su voltaje de operación es de 24 VAC, 8 W, 60 Hz (Baccara, 2010).

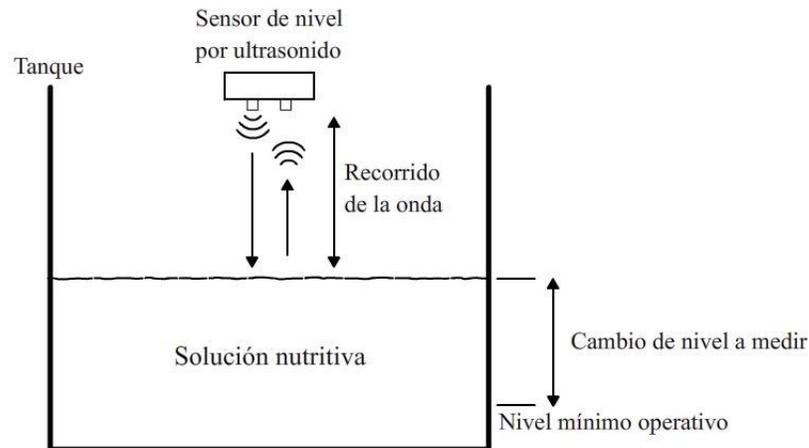
c. Sensores de nivel por ultrasonido

Este sensor mide el tiempo de ida y regreso requerido por una onda de ultrasonido emitida por un transductor y que ha sido reflejada por la superficie del líquido al cual se le está midiendo su nivel. La Figura 1-9 muestra el principio de funcionamiento de este sensor. El proyecto disponía de 25 tanques que fueron calibrados con relación al volumen. Es decir, el sensor de nivel entregaba una lectura del nivel de la solución y la función de transferencia interna entregaba al programa el volumen correspondiente a ese nivel. Los volúmenes en los tanques de recolección permitían usar la cantidad requerida de solución drenada por los tratamientos evaluados (50 y 100 % del volumen drenado). Los volúmenes en el tanque de recomposición y de preparación de nueva solución fertilizante, junto con sus características químicas, se utilizaban para calcular la cantidad de agua y de solución de

premezcla necesarias para obtener la solución de fertirriego apropiada para cada cultivo. En los tanques de almacenamiento del fertirriego el uso de los sensores de nivel por ultrasonido facilitaba la programación de los volúmenes de riego por pulso.

La empresa contratada para el desarrollo del software, así como para el montaje de los equipos, construyeron los respectivos sistemas electrónicos que traducían la señal electrónica del sensor de nivel por ultrasonido por una que facilitaba la conexión al sistema de adquisición de datos. Se utilizó un sensor ultrasónico SRF05 con receptor y emisor integrados con rango entre 1 cm y 4 m, voltaje de 5 V, 4 mA y frecuencia de 40 kHz.

**Figura 1-9:** Medición del volumen de solución nutritiva en un tanque a través de un sensor de nivel por ultrasonido.



d. Hardware de control y adquisición de datos

El hardware utilizado para el control y la adquisición de datos fue un Compact FieldPoint® (cFP), fabricado por National Instruments®. Diseñado para control industrial, administra comunicaciones entre un servidor y los módulos de E/S, integra las habilidades de inteligencia, control avanzado y análisis del software. Posee la capacidad de expansión al conectar dos o más interfaces cFP-1808 (National Instruments, 2006). El cFP tiene los módulos de entrada analógica, salida digital y sus respectivos bloques conectores. A través de los módulos de entrada analógica se realizó la adquisición de las señales de los sensores ISE, del sensor de CE, de los sensores de nivel por ultrasonido y de los sensores de clima. El cFP facilita la interfaz para conectar cuatro u ocho módulos, en este proyecto, de E/S a una red Ethernet o a un puerto serial RS232, permitiendo el enlace con el software de control

desarrollado en LabVIEW® e instalado en el PC (Figura 6). El software de control genera las instrucciones apropiadas con base en los requerimientos del sistema para generar la automatización solicitada por el usuario, ofreciendo la flexibilidad y facilidad de uso de un PC y la fiabilidad de un controlador lógico programable. Las órdenes de salida o de control son entregadas en forma digital al cFP que a través de los módulos de salida digital convierte la señal en voltaje o corriente para activar los diferentes relevos, que a su vez generan la apertura o cierre de las electroválvulas o electrobombas.

e. Computador de escritorio

El proyecto utilizó un computador de escritorio con procesador Pentium 2160 Core Duo de 1,8 GHz, memoria RAM 1GB, puertos USB, disco duro SATA 169 GB 7200 rpm, tarjeta de red 10/100/1000, sistema operativo Windows® XP Home Edition, monitor LCD. En el PC se ejecuta el software de control desarrollado en LabVIEW®, el cual controla el SARD que interactúa con el cFP. Adicionalmente, sirve para almacenar la información proveniente de los sensores (pH, CE, iones en la solución de fertirriego; temperatura, humedad relativa, radiación PAR y radiación global dentro del invernadero) y la programación de los pulsos de riego (hora y duración de los pulsos de riego, volúmenes aplicados) para cada tratamiento del SARD.

f. Electrodo selectivos a iones y de conductividad eléctrica

Adicional a los sensores de pH y de CE, se utilizaron sensores selectivos a los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  fabricados por Advanced Sensor Technologies, Inc. Construidos en materiales resistentes al calor y a la corrosión, son apropiados para ser usados en condiciones extremas de concentración de químicos. Recomendados para aplicaciones en plantas de tratamiento de aguas, procesos químicos y lugares donde las condiciones requieren de poco mantenimiento de estos equipos. La construcción del sensor permite el fácil acceso para revisión y limpieza (Advanced Sensor Technologies, 2010). El rango del electrodo de pH es de 0 a 12, fabricado en polímero resistente a solventes; el electrodo de CE posee compensación por temperatura, constante de celda entre 0,1 y 2,0 y rango de lectura entre 10 y 50.000  $\mu\text{S}$ , construido en CPVC o Teflon/Kynar. Los fabricantes de los electrodos selectivos a nitrato, amonio, calcio, cloro, potasio y sodio reportan rangos de concentración

(ppm), de 0,62 a 6.200; 0,09 a 18.000; 0,2 a 40.000; 0,35 a 35.000; 0,195 a 39.000 y 0,23 a 23.000, respectivamente.

g. **Electrobombas**

Utilizadas para el bombeo de agua, la transferencia de las soluciones entre cada una de las fases del SARD, el desecho de solución y el fertirriego. Se utilizaron las siguientes electrobombas: 1) Electro bomba trifásica accionada por un motor de 6 HP para el bombeo de agua desde el reservorio; 2) Electro bombas accionadas por un motor de 1/2 HP para la transferencia de solución entre fases del SARD; 3) Electro bomba accionada por un motor de 1/3 HP para la agitación y homogenización de la solución nueva preparada en la fase 2, adicionalmente, se emplea para desechar la solución; 4) Electro bomba accionada por un motor de 1 HP para la aplicación del fertirriego; y 5) Electro bomba sumergible accionada por un motor de 0,5 HP para controlar el nivel freático en la zona donde se encuentra la infraestructura. El accionamiento de los motores obedecía al sistema de control.

En caso de fallas eléctricas, en el SARD se dispuso de un sistema de alimentación ininterrumpida o UPS de 5A/250W, para mantener funcionando el PC y el cFP.

### **Seguimiento a variables climáticas**

Se utilizaron dos estrategias para el seguimiento y registro de las variables de clima.

1. **Medición directa en una microestación climática.**

Microestación HOBO® (Onset Computer Corporation) compuesta por un registrador de datos y sensores inteligentes para el seguimiento de las variables seleccionadas. El registrador de datos de cuatro canales utiliza una red de sensores inteligentes que proveen detección automática, fácil expansión y conexiones digitales; lo que significa que no requiere calibración, cableado y programación de los sensores, permite la combinación de sensores y brinda confiabilidad en la recolección y almacenamiento de datos. La descarga de los datos se realiza mediante una conexión través del puerto de comunicaciones del PC utilizando la aplicación BoxCar® Pro. Los sensores conectados al registrador son:

- a. Sensor inteligente de radiación fotosintéticamente activa (PAR). Modelo S-LIA-M003. Rango de medida de 0 a 2500  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , longitudes de onda de 400 a 700 nm. Durante la fotosíntesis, las plantas usan energía en la región del espectro electromagnético entre los 400-700 nm. La radiación en este rango, referida como la radiación fotosintéticamente activa, puede ser medida en unidades de energía ( $\text{W.m}^{-2}$ ) o como densidad de flujo de fotones fotosintéticos, la cual tiene unidades de cuantos (fotones) por unidad de tiempo por unidad de superficie. Las unidades comúnmente usadas son  $\text{mmol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$  (Shibles, 1976).
  - b. Sensor de radiación solar. Modelo S-LIB-M003, rango de medida de 0 a 1280  $\text{W.m}^{-2}$ . Este tipo de sensores inteligentes utiliza el registro de los promedios medidos durante cierto intervalo de tiempo. Los datos son medidos con más frecuencia de lo que se registran, la serie de tiempo se promedia internamente, y este promedio es almacenado como el dato para el intervalo. Este método es útil para reducir el ruido de los datos y es recomendado para áreas en las cuales los niveles de luz pueden variar rápidamente con respecto a los intervalos de registro.
  - c. Sensor inteligente de humedad relativa y temperatura. Modelo S-THA-M002, diseñado para reportar humedad relativa a temperaturas entre 0 y 50 °C.
2. Medición y registro a través del cFP.
- En este caso los sensores climáticos estaban conectados directamente al cFP el cual traduce la señal a digital y posteriormente se almacena en el PC para su posterior análisis. Esta conexión directa facilitaría, entre otras, la posibilidad de realizar el control del fertirriego basado en las condiciones de clima, con las previas modificaciones a la aplicación que controla el SARD. Se utilizaron los siguientes sensores:
- a. Sensor de radiación fotosintéticamente activa. LI-COR Modelo LI-190SA, sensor cuántico usado para medir la densidad de flujo de fotones fotosintéticos de la radiación fotosintéticamente activa, en unidades de  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  (Li-cor Biosciences, 2010).

- b. Sensor de radiación global. LI-COR Modelo LI-200SA, sensor diseñado para medir la radiación global en campo, en unidades de  $W \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  (Li-cor Biosciences, 2010).
- c. Sensor de humedad relativa y temperatura. Vaisala HMP50, rango de medida de 0 a 98 % de humedad relativa, bajo consumo de corriente, voltaje de operación de 0 a 28 VDC, voltaje de salida de 0 a 1 VDC (Vaisala, 2010).

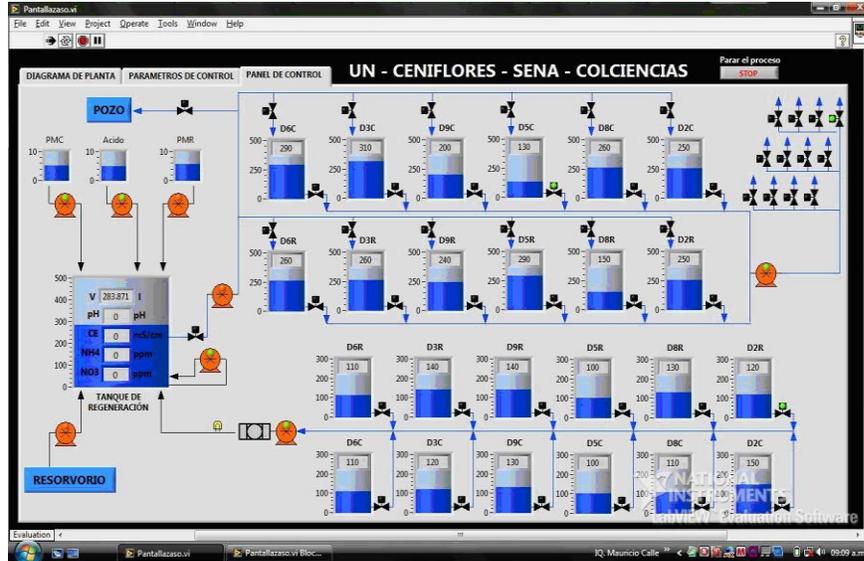
### **Software de control**

En la primera versión del SARD, la empresa contratista Solel Ingeniería S.A.S. construyó parte del sistema de control y sensores y diseñó una aplicación para la automatización y control, con base en el reciclaje con recomposición de la solución conforme a las variables pH y CE. El diseño del programa para el control del sistema automático se realizó con el lenguaje de programación LabVIEW 8.5 (Figura 1-10A). Posteriormente se realizaron pruebas virtuales con el cFP, que incluían la simulación de variaciones en las señales de los sensores y la alimentación de los activadores. Una vez desarrollado el instrumento virtual se montó en el PC que se comunicaba con el cFP en campo, para realizar pruebas de calibración y ajuste en condiciones reales.

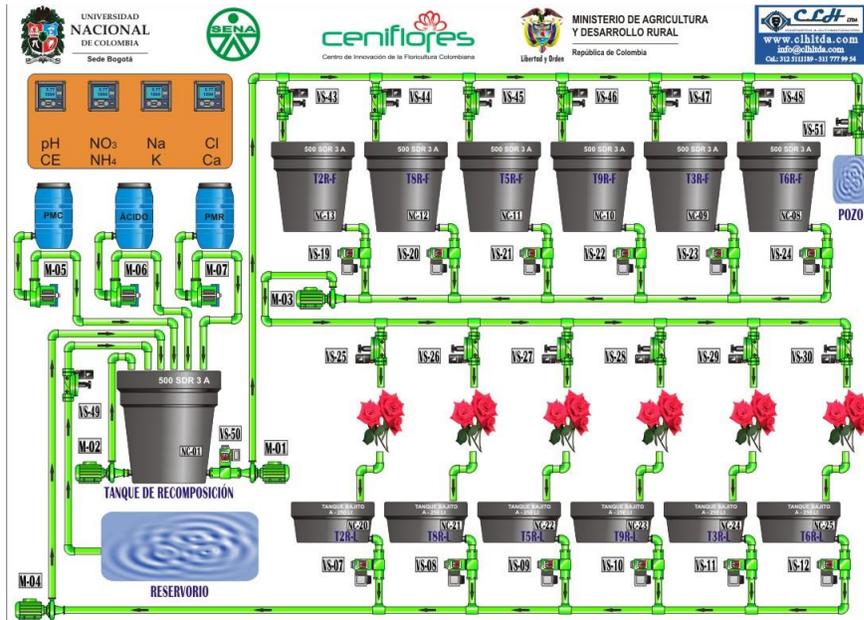
Las señales enviadas por los sensores son adquiridas por el cFP, que las acondiciona y filtra para que a través de la conexión Ethernet sean enviadas al PC, el cual, mediante la ejecución del software de control, toma las decisiones adecuadas para operar las electroválvulas y electrobombas. En cada evento los datos provenientes de los sensores y activadores son almacenados en bases de datos para ser utilizados en el seguimiento del sistema y los posteriores análisis. El procedimiento operó en función de la recomposición de la solución nutritiva cada vez que se reciclaba y se efectuó en tres fases: En la Fase 1 se registraba el volumen de los drenajes procedentes del cultivo y se transferían a la Fase 2 donde se medían y registraban en hojas de cálculo los valores de pH, CE e iones, previo paso por una lámpara de radiación UV. En la Fase 2 se recomponía o renovaba la solución de fertirriego de acuerdo con los valores de las variables volumen, pH y CE. Por último, en la Fase 3, se controlaban los pulsos de fertirriego. El sistema contó con alarmas en el caso de ingresar valores erróneos o si se detectaban fallas en los equipos de bombeo.

**Figura 1-10:** Vista de los paneles de control del sistema automático de drenajes en los cultivos de clavel y rosa. A. Primera versión del software de control; reciclaba y recomponía la solución drenada cuando se requería. B. Segunda versión del software de control que reciclaba la solución hasta agotarla.

A.



B.



En la segunda versión del SARD se contrató a la empresa CLH Ingeniería y automatización Ltda. Para esta nueva versión, el procedimiento de reciclaje de drenajes fue cambiado, dado que la solución se utilizaba hasta que se agotara o hasta que las características químicas no fueran apropiadas para aplicar en el cultivo. De esta manera, se puede estimar con más precisión la vida útil de la solución,

la acumulación de los iones y el incremento de CE. Así mismo, el hardware y el software del SARD se sometieron a una reevaluación con base en las pruebas a la primera versión. El resultado fue la elaboración de una segunda versión del software de control (Figura 1-10B), la fabricación de sensores de nivel por ultrasonido compactos y eficientes, y la ampliación de hardware que incluyó la integración de sensores climáticos de radiación fotosintéticamente activa, radiación global, humedad relativa y temperatura; y de los ISE para  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . La adquisición de las señales provenientes de los nuevos sensores requirió de un nuevo bloque cFP con un módulo de entrada y su respectivo bloque conector.

### **Funcionamiento**

De los nueve tratamientos establecidos en los cultivos que reciclaron drenajes, seis llegaban a la zona de procesamiento de drenajes. El diseño permitió manipular un tratamiento a la vez, con dos actividades operando paralelamente. El primer grupo de actividades lo conformaron la medición del volumen en la fase I, el movimiento del líquido de la fase I a la fase II, la medición del volumen y de las características de calidad del drenaje en la fase II, y el traslado de la solución de la fase II a la fase III. El segundo grupo de actividades estaban relacionadas con el fertirriego.

Con el propósito de establecer tiempos y movimientos de los drenajes de los seis tratamientos que reciclaron, se elaboró una simulación del proceso. La simulación sirvió como base para implementar algoritmos y programar la automatización con la aplicación desarrollada en LabVIEW®. Las señales enviadas por los sensores son adquiridas por el cFP y luego son enviadas al PC. El PC, mediante la ejecución del programa, toma decisiones para operar las electroválvulas y electrobombas. Adicionalmente, datos como las características químicas del agua, se ingresaron manualmente al programa. En cada evento los datos provenientes de los sensores y activadores se almacenaron en bases de datos para ser utilizados en el seguimiento del sistema y en el análisis de la información.

### **Procedimiento**

#### **Fase II. Registro de variables, desecho y almacenamiento de solución reciclada**

Una vez transferido el volumen de cada tanque dTR a rTR se procede así:

- i. Lectura y registro de los valores de volumen, pH, CE e iones.

ii. Comparación de los valores de volumen, pH y CE.

Caso 1. Si alguno de los valores (valores por defecto) cumple con las siguientes condiciones la solución será desechada por completo:

- a. Valores de pH por fuera del rango 4,5 – 8,5.
- b. Valores de CE mayores o iguales que  $8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Caso 2. Si el caso 1 no se cumple, entonces:

a. Para los tratamientos 2, 8 y 5 el 50 % del volumen, el cual es detectado por el sensor de nivel por ultrasonido, es desechado y el restante se transferirá a sus respectivos tanques de almacenamiento aTR.

b. Para los tratamientos 9, 3 y 6 el 100 % del volumen se transferirá a sus respectivos tanques de almacenamiento aTR.

iii. La transferencia a tanques de almacenamiento se efectuó hasta que el sensor de nivel por ultrasonido detectara el nivel mínimo calculado en rTR.

#### **Procedimiento para la preparación y almacenamiento de solución fertilizante nueva**

Cada vez que la solución fertilizante en cada uno de los tanques de almacenamiento se agotara (volumen mínimo necesario para suplir un pulso) se procedió así:

#### **Preparación**

La preparación de la solución fertilizante nueva para cada tratamiento se realizó en el tanque rTR y luego fue transferida al respectivo tanque de almacenamiento aTR.

Para cada uno de los tratamientos y cuando el tanque de almacenamiento correspondiente (aTR) tenía un volumen inferior al necesario para un pulso de fertirriego (alarma interna), se preparaba solución fertilizante hasta completar un volumen de 370 L en el tanque de almacenamiento correspondiente, cumpliendo con una CE y pH objetivos de  $1,8\pm 0,3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y  $5,8\pm 0,5$ , respectivamente.

Valores para ingresar por el usuario a través de la interfaz gráfica, en los siguientes rangos, que pueden ser modificados por el administrador:

- Valores de CE en el rango 1,5 - 2,1  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ .
- Valores de pH en el rango 5 - 7.

En caso de que los valores ingresados estuvieran por fuera de los rangos establecidos, el sistema debía avisar al usuario con una ventana de advertencia en la cual se indique el tipo de error (CE, pH o volumen).

Procedimiento de preparación de solución fertilizante nueva

La aplicación de agua proveniente del reservorio se hizo a través de la activación de la bomba del reservorio y una electroválvula. La aplicación de la solución de premezcla de fertilizante se hizo a través de la activación de una bomba dosificadora que aplicaba un pulso largo de 500 mL si fuese activada por 4 s y un pulso corto de 150 mL si fuese activada por 1 s (los volúmenes y tiempos estaban sujetos a recalibración en campo). Dependiendo del pH del agua del reservorio más la premezcla se aplicó ácido fosfórico a través de la activación de una bomba dosificadora. La agitación de la mezcla se hizo a través de la activación de una bomba que recirculó la solución dentro del tanque.

Los pasos para la preparación de la solución fertilizante nueva, considerando volúmenes y tiempos tentativos, fueron:

- a- Aplicar un pulso de 50 L de agua del reservorio.
- b- Registrar las variables de los sensores de pH, CE e iones hasta que las lecturas se estabilicen.
- c- Aplicar un flujo constante de agua de reservorio hasta completar el volumen calculado de solución fertilizante nueva y cada 50 L aplicar un pulso largo de solución de premezcla.

Nota: Esta opción de agregar pulsos mientras se aplicaba un flujo constante de agua, facilitó la homogenización de la mezcla.

- d- Al completar el volumen calculado de solución fertilizante nueva, se activaba la bomba de agitación durante un tiempo determinado. Después de un tiempo de estabilización de lecturas, el cual fue determinado en campo:

- 1) Comparar la lectura de CE con el valor establecido al inicio del sistema. Los casos que se pueden presentar son:

Caso 1: Si la diferencia de CE es de  $\pm 0,1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , el procedimiento se debe detener entendiéndose que la solución fertilizante nueva está lista.

Caso 2: Si la diferencia de CE es menor que el valor inferior del rango fijado en el caso 1 se aplicará un pulso corto de solución de premezcla, contemplando tiempo de agitación y de estabilización de la solución. Este procedimiento se repetiría hasta que se cumpla el caso 1.

Caso 3: Si la diferencia de CE es mayor que el valor superior del rango fijado en el caso 1 se aplicará un pulso de agua de un volumen tal que no se rebose la capacidad del tanque. Este procedimiento se repetiría hasta que se cumpla el caso 1.

2) Comparar la lectura de pH con el valor establecido al inicio del sistema. Los casos que se pueden presentar son:

Caso 1: Si la diferencia de pH es  $\pm 0,3$  el procedimiento se debe detener entendiéndose que la solución fertilizante nueva está lista.

Caso 2: Si el valor de pH es inferior a 5, la solución debe ser desechada.

Caso 3: Si la diferencia de pH es mayor que el valor superior del rango fijado en el caso 1 se aplicará un pulso de ácido. Este procedimiento se repetiría hasta que se cumpla el caso 1.

Cuando se cumpla los casos 1 de CE y pH y con lecturas estables de las variables pH, CE e iones, proceder a registrar los respectivos valores.

### **Almacenamiento**

Luego de que la preparación de la solución fertilizante finalizara, se procedió a transferirla al tanque de almacenamiento (aTR), mediante la activación de una electroválvula de salida, una electrobomba y la electroválvula de entrada relacionada con cada tanque. La lectura del sensor de volumen de cada aTR fue almacenada para el cálculo de los volúmenes reales de fertirriego.

### **Procedimiento de fertirriego. Fase III.**

El número de pulsos al día se asoció con el sustrato en el cual se sembraron las plantas. Para cada sustrato (100 CAQ, 65 CAQ y 35 CAQ) el número de pulsos (P) y el volumen de fertirriego (Vr) deberían ser variables de entrada conforme a la jerarquía: 100 CAQ > 65 CAQ > 35 CAQ y el rango  $3 < P < 8$ . Los valores por defecto para el número de pulsos fueron: 100 CAQ, 6 pulsos; 65 CAQ, 5 pulsos y 35 CAQ, 4 pulsos, y para Vr 100 CAQ, 60 L; 65 CAQ, 55 L; y 35 CAQ, 50 L.

En caso de que los valores ingresados estuvieran por fuera de los rangos establecidos, el sistema debía avisar al usuario con una ventana de advertencia en la cual se indicaba el tipo de error (P o Vr).

El proceso de fertirriego se hizo teniendo en cuenta las siguientes variables:

- Número de pulsos de fertirriego (P) ingresado previamente por el usuario.
- Volumen de fertirriego (Vr) ingresado previamente por el usuario.

- Volumen de pulso (VP) =  $V_r/P$
- Tiempo total (tT) = 7,5 horas, tiempo de trabajo al día modificable por el administrador.
- Frecuencia de fertirriego (fP) =  $tT/P$

El pulso se iniciaba según lo indicaba la frecuencia calculada por el sistema (fP) (los pulsos de fertirriego) con la activación de la electroválvula de descarga de cada tanque, la respectiva válvula en el múltiple de fertirriego y la electrobomba BRIEGO y terminaba con la desactivación de los elementos mencionados cuando el sensor de nivel por ultrasonido detectaba que se aplicó el volumen del pulso.

## 2. Capítulo 2. Evaluación del funcionamiento del sistema de acuerdo con la conductividad eléctrica y pH de la solución drenada

### 2.1 Resumen

Los sistemas cultivo en sustrato con reciclaje de drenajes requieren del seguimiento continuo de variables determinantes como la CE y el pH, indicadores básicos del estado químico de la solución que determinan hasta donde es posible los eventos de reciclaje. Estas variables son influenciadas por las propiedades, físicas, químicas y microbiológicas de los sustratos, la evapotranspiración del cultivo, la temperatura de los sustratos, y el estadio de desarrollo de las plantas sembradas. Se estableció un cultivo de rosa cv. 'Charlotte' en tres distintos sustratos compuestos por la mezcla de fibra de coco (FC) y cascarilla de arroz quemada (CAQ) e implementando un sistema automático de reciclaje drenajes con tres porcentajes (0, 50 y 100), con el objetivo de conocer los cambios en CE y pH a lo largo de nueve semanas de cultivo. En 1, 2 y 3 SDP la CE fue significativamente mayor al reciclar la solución en 35 CAQ y 65 CAQ y en 7 y 8 SDP lo fue para 100 CAQ y 65 CAQ. En 6 SDP hubo efecto significativo de 50 y 100 % de reciclaje independiente del sustrato. Lo anterior pudo ser causado por la liberación de iones y alta retención de agua, propias de la FC y la alta adsorción de iones por la CAQ. Para el pH, la tendencia fue la acidificación, siendo significativa para el tratamiento 100 CAQ sin reciclaje entre 0 y 4 SDP, lo que posiblemente se relaciona con los cambios en la absorción de iones como el  $\text{NO}_3^-$  y a la actividad de microorganismos nitrificantes, facilitada por las propiedades de la FC.

**Palabras clave:** Sustratos, salinidad, rosas, reciclaje de drenajes.

## 2.2 Introducción

Entre las variables más importantes para tener en cuenta en los sistemas de CSS se encuentran la temperatura y aireación de la rizosfera, el pH de la solución, las concentraciones y relaciones  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$ , el tamaño del contenedor o volumen de raíces, el medio de crecimiento y la CE (Kafkafi, 2001).

Maas y Hoffman (1977) modelaron la tolerancia a las sales caracterizando los siguientes parámetros: (1) valor umbral de salinidad (VUS), que es el valor de salinidad máxima en el que no se presenta una disminución significativa en el crecimiento o rendimiento y (2) la disminución en rendimiento a causa de la salinidad (DRS), valor que indica el porcentaje de disminución en el rendimiento por cada unidad de incremento en CE por encima del VUS. Sonneveld *et al.* (1999) concluyeron que la absorción de sodio y cloruro por la planta se incrementa con el aumento de sus concentraciones en el ambiente radical; lo que sería una ventaja, al contrarrestar su acumulación en la rizosfera, sin embargo, depende de la especie. Para clavel calcularon valores de VUS de 4,3  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y DRS de 3,9 % por  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y para rosa VUS de 2,1  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  y DRS de 5,3 % por  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , mientras que otros autores mencionan valores de CE en extracto de suelo no mayores que 1,5  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  para esta última especie (Cabrera *et al.*, 2017).

Valores de CE bajos pueden entenderse como aportes inadecuados de elementos y deficiencias nutricionales (Graves, 1983). En contraste, valores de CE por encima del VUS disminuyen el rendimiento debido principalmente a efectos osmóticos los cuales están influenciados por la composición de la solución nutritiva (Savvas, 2003). La salinidad afecta la calidad de las flores de corte disminuyendo diámetro y longitud del tallo, así como firmeza y vida en florero (De Kreij y Van Den Berg, 1990). En el caso de gerbera y rosa, estas especies responden reduciendo el número de flores más que el peso promedio de la flor, mientras que en clavel y bouvardia sucede lo contrario (Sonneveld *et al.*, 1999).

Además de la CE y el pH en la preparación de la solución inicial se deben tener en cuenta las relaciones de concentración de nutrientes y la calidad del agua (Savvas y Adamidis, 1999). El pH en la zona de raíces para la mayoría de los cultivos hidropónicos se encuentra entre 5,5 - 6,0, sin embargo, valores entre 5,0 - 5,5 y 6,5 - 7,0 no causarían problemas en la mayoría de los cultivos

(Graves, 1983), mientras que valores mayores que 7,0 podrían producir problemas en la absorción de P, Fe y Mn y posibles síntomas de deficiencia de Cu y Zn (de Rijck y Schrevens, 1997).

El pH en un sistema en sustrato presenta grandes variaciones durante la época de cultivo; en parte debido al reducido volumen del contenedor, y en especial cuando el sustrato utilizado posee baja capacidad de amortiguamiento, como en el caso de sustratos de baja reacción, mientras que en sustratos orgánicos es más estables. La capacidad de amortiguamiento de la solución nutritiva usada es muy baja y casi que solamente determinada por las concentraciones de fosfato (Sonneveld, 2002). En periodos de alta tasa de crecimiento y con la suficiente intensidad lumínica, normalmente la absorción de aniones excede la de cationes, lo que obedece a una alta absorción de  $\text{NO}_3^-$  y su uso en el metabolismo de la planta. Esta diferencia en la tasa de absorción de iones es compensada con la liberación de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{OH}^-$  al medio radical (Ben-Zioni *et al.*, 1971), incrementando el pH de la zona de raíces. Sin embargo, en condiciones de baja intensidad lumínica, esta situación es reversible, lo que disminuye la absorción de  $\text{NO}_3^-$  e incrementa la relación de absorción catión:anión; por tanto, la rápida absorción de cationes es compensada con la liberación de  $\text{H}^+$  por la raíces (Graves, 1983).

El exceso de nitrato en la solución reciclada aumenta la asignación de masa seca hacia las hojas a expensas de brotes e inflorescencias. Valores de pH entre 3 y 4 aumentan la absorción de P y su concentración en las hojas, reduciendo la biosíntesis de sacarosa y afectando negativamente el rendimiento en producción de flores. Para Bar-Yosef *et al.* (2009) utilizar mezclas apropiadas de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y urea reducen los efectos nocivos producidos por los cambios en pH, que llevan a desbalances iónicos y a la competencia por absorción de Ca, P y Mn, entre otros elementos.

El pH en la solución puede ser controlado a través de la modificación de la relación  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_3^-$  en la solución reciclada y la aplicación del nitrógeno requerido en forma nítrica y la reducción del pH con ácido. Al no demandar la adición de ácido se reduce la carga de sales en el sistema, sin embargo, el  $\text{NH}_4^+$  podría inhibir la absorción de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  y afectar negativamente el desarrollo de las raíces (Bar-Yosef, 2008). Para Noordwijk (1990) es fundamental sincronizar la demanda y el suministro de nutrientes para incrementar la eficiencia de su utilización. Una herramienta útil para tal fin es la modelación matemática para la simulación en condiciones controladas. Se han

propuesto modelos de absorción de nutrientes como el de Barber-Cushman (Cushman, 1979; Barber, 1995), el del límite móvil (Reginato *et al.*, 2000) y el que considera el incremento en densidad de raíces y la competencia entre estas (Hoffland *et al.*, 1990). Carmassi *et al.* (2005) desarrollaron un modelo en tomate para predecir los cambios en la concentración de iones y la CE de la solución reciclada, modelo diseñado con base en una ecuación balanceada de absorción de nutrientes y que simula la acumulación de sales en la solución cuando es preparada con agua de baja calidad, para así programar los momentos de desecho de solución. Silberbush *et al.* (2005) propusieron un modelo de flujo de agua y nutrimentos, y su absorción por la planta, teniendo en cuenta las pérdidas de agua por transpiración y la acumulación de sales en la solución, incluyendo la interacción de este efecto con la absorción de agua y nutrimentos. Al desarrollar un modelo similar e integrarlo a un sistema de control asistido por computador, es posible automatizar el manejo de un sistema de CSS de tipo cerrado.

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del porcentaje de reciclaje de drenajes en tres niveles (0, 50 y 100) y del tipo de mezcla de los sustratos orgánicos: cascarilla de arroz 100 % (100 CAQ), cascarilla de arroz 65 %:fibra de coco 35 % (65 CAQ) y cascarilla de arroz 35 %:fibra de coco 65 % (35 CAQ) en los valores de pH y CE entre las 0 y 8 semanas después de poda (SDP) en plantas de rosa cv. 'Charlotte' en un cultivo comercial bajo cubierta.

## 2.3 Materiales y métodos

### 2.3.1 Ubicación

El proyecto se realizó en el Centro de Biotecnología Agropecuaria del SENA, ubicado en el municipio de Mosquera (4°41' N, 74°13' O; 2516 msnm), con promedios anuales de temperatura y lluvia de 12,6 °C y 670 mm, respectivamente, y con características de zona de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) (Guzmán, 1996).

### 2.3.2 Material vegetal y manejo del cultivo

Se dispuso de un invernadero tradicional en madera cubierto con plástico AgrocLEAR® (Productos químicos andinos, Colombia) con cinco naves dimensiones de 65 x 6,8 m cada una, sembradas con rosa cv. 'Charlotte', injertada sobre 'Natal Briar'. El cultivo estaba conformado por 33 camas

suspendidas de 15 x 0,8 m, en las que se ubicaron materas de 8 L para una densidad de siembra de 7 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero.

La fórmula fertilizante, en mg.L<sup>-1</sup>, fue 170 de nitrógeno total (15 % de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>); 35 P; 150 K; 110 Ca; 60 Mg; 82 S; 1 Mn; 0,5 Zn; 0,5 Cu; 3 Fe y 0,5 B y 0,1 Mo. Esta fórmula se preparó conforme a las fórmulas comerciales utilizadas en la región y se ajustó de acuerdo con las características del agua. El manejo cultural y sanitario se realizó como de rutina para este cultivo.

### 2.3.3 Tratamientos y diseño experimental

Para el establecimiento de las plantas se utilizaron mezclas de los sustratos cascarilla de arroz (CAQ), con un grado de quemado entre 70 y 100 %, y fibra de coco lavada (FC) (Tabla 2-1), así: cascarilla de arroz 100 % (100CAQ), cascarilla de arroz 65 %:fibra de coco 35 % (65CAQ) y cascarilla de arroz 35 %:fibra de coco 65 % (35 CAQ). Las relaciones de mezclas correspondieron a los niveles del factor experimental Sustrato. Se utilizó un sistema automático para reciclaje de drenajes (SARD), el cual reciclaba los drenajes en tres niveles 0, 50 y 100 % y que constituyó el factor porcentaje de reciclaje. El SARD está ampliamente descrito en el capítulo 1 de este documento, así como en Cuervo *et al.* (2011) y en Cuervo *et al.* (2012).

Los tratamientos se configuración como la combinación de los niveles de los factores porcentaje de reciclaje y tipos de sustratos, para un total de nueve tratamientos con tres repeticiones cada uno (Tabla 2-2). La unidad experimental consistió en una cama de cultivo. Este arreglo bifactorial se realizó bajo un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar, donde la parcela principal correspondió al factor porcentaje de reciclaje y la subparcela al factor sustrato.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_k + \eta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Con:  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$

Donde:

$\mu$  es el efecto de la media general.

$\alpha_i$  es el efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor porcentaje de reciclaje.

$\delta_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo bloque.

$\eta_{ik}$  es el efecto del error aleatorio en la parcela principal (porcentaje de reciclaje por bloque).

$\beta_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor Sustrato.

$(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto de la  $ij$ -ésima interacción entre los dos factores (porcentaje de reciclaje por sustrato).

$\varepsilon_{ijk}$  es el efecto del error aleatorio en la subparcela

$Y_{ijk}$  es la observación en el  $k$ -ésimo bloque del  $i$ -ésimo nivel del factor porcentaje de reciclaje y el  $j$ -ésimo nivel del factor sustrato.

**Tabla 2-1:** Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo.

Tipo	pH	CE	CO	N	P	Ca	K	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	B	S
		(dS.m <sup>-1</sup> )													
100CAQ	5,53	6,82	27,2	0,51	0,06	0,11	0,01	0,04	0,03	4,4	225	136	54	28	481
65CAQ	5,31	6,52	23,6	0,39	0,08	0,4	0,01	0,06	0,08	13,4	433	87	50	34	470
35CAQ	5,18	5,18	6,04	26,6	0,5	0,06	0,16	0,01	0,17	19,1	704	66	47	-	548

**Tabla 2-2:** Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes.

Numeración	Tratamientos	Sustratos	Reciclaje (%)
1	100 CAQ-0 R*	100 CAQ	
7	65 CAQ-0 R*	65 CAQ	0
4	35 CAQ-0 R*	35 CAQ	
2	100 CAQ-50 R	100 CAQ	
8	65 CAQ-50 R	65 CAQ	50
5	35 CAQ-50 R	35 CAQ	
3	100 CAQ-100 R	100 CAQ	
9	65 CAQ-100 R	65 CAQ	100
6	35 CAQ-100 R	35 CAQ	

100 CAQ = 100 % cascarilla de arroz quemada; 65 CAQ = 65 % cascarilla de arroz quemada -35 % fibra de coco; 35 CAQ = 35 % cascarilla de arroz quemada - 65 % fibra de coco.

\*Tratamientos que no ingresan al SARD.

### 2.3.4 Variables respuesta y análisis estadístico

Los drenajes de cada unidad experimental se recolectaron en un contenedor de 20 L de capacidad y en ellos se registraron diariamente, entre las semanas 0 y 8 después de poda (SDP), las variables CE (dS.m<sup>-1</sup>) y pH utilizando un equipo portátil (Oakton AN 23). Los datos se transcribieron a una hoja de cálculo para su posterior análisis. El software estadístico R (Versión 3.5.3 R Core Team 2019 R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>) fue utilizado para realizar el análisis de varianza para el diseño de parcelas divididas y la posterior prueba de comparación de Tukey ( $P < 0,05$ ) para

cada una de las semanas de evaluación (librería *Agricolae*, R package version 1.3-1. Felipe de Mendiburu (2019): *Statistical Procedures for Agricultural Research*. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>) (de Medinburu, 2019).

## 2.4 Resultados y discusión

Las características químicas de la solución son variables posiblemente a causa de la interacción con las características físicas y químicas del sustrato orgánico utilizado, la dinámica microbiológica, los exudados de las raíces y las condiciones climáticas, entre otros. Se enfatiza en la concentración de algunos iones y su efecto contaminante, además de su influencia en CE, la cual es uno de los factores más influyentes en la vida útil de la solución a reciclar.

### Conductividad eléctrica (CE)

Se observa una tendencia creciente de la CE en el tiempo siguiendo un patrón relacionado con el hecho de que al principio las mezclas de sustratos basadas en mayores porcentajes de FC incrementaban la CE de los drenajes, en especial cuando se presentaba el reciclaje; pero con el transcurso del tiempo, estos efectos en la CE se reducían hasta el punto de no tener efecto significativo (Figura 2-1 A.). En las 1, 2 y 3 SDP, la CE fue significativamente mayor ( $P < 0,05$ ) en los drenajes de los tratamientos que contenían FC (35 CAQ y 65 CAQ); para la semana 6SDP no se determinó un efecto significativo del sustrato, mas sí de la tasa de reciclaje (50 y 100 %). En las 7 SDP y 8 SDP, y, contrario a lo sucedido durante las primeras semanas, los sustratos con contenidos de FC no tuvieron efecto en la CE, y se verificó que a mayores contenidos de CAQ, se incrementaba significativamente la CE en los drenajes (Tabla 2-3.). Este comportamiento puede estar asociado con la liberación de sales de la FC, en especial de elementos como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  y  $\text{S}$  (Tabla 2-1). Sin embargo, también es posible que en el transcurso del tiempo la FC, conocida por su alta capacidad de adsorción de cationes, en particular metales (Song *et al.*, 2013; Okafor *et al.*, 2012), se haya saturado de iones, por lo que la retención era mínima y se producía lixiviación. Los bajos valores de CE pueden explicarse por la posible alta demanda de elementos que aportan significativamente a la CE, y que están siendo absorbidos durante las fases de crecimiento vegetativo de la planta y se reducía el contenido de estos iones en la solución (van der Sar *et al.*, 2014; Bugbee, 2004); no obstante, los valores de CE durante el periodo evaluado no superaron aquellos reportados para la DRS, pero si para VUS (Sonneveld *et al.* 1999).

La CAQ al someterse al proceso de carbonización incrementa el área superficial y la capacidad de fijación de minerales, lo que la convierte en un material apropiado para la adsorción de contaminantes, metales pesados,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$  (Correa *et al.*, 2017; Phonphuak y Chindaprasirt, 2015; Chan *et al.*, 2011; Kuan y Yuen, 2011; Viswanathan *et al.*, 2009) y como corrector de acidez en suelos (Silva *et al.*, 2008; Okon *et al.*, 2007; Pinto *et al.*, 2009; Sandrini, 2010; Oliveira *et al.*, 2014). En este estudio se encontró evidencia significativa de que a mayor contenido de CAQ en el sustrato y mayor porcentaje de reciclaje de drenajes, mayor es la CE en los drenajes (Tabla 2-3), efecto que se aumenta a través del tiempo, posiblemente por la degradación del material o el incremento en la adsorción de cationes que saturan los sitios de intercambio, disminuyendo la CIC. Por lo anterior, es posible que la CAQ adsorba  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de la solución nutritiva, lo que concuerda con lo hallado por Vélez (2012) en un cultivo de clavel sembrado en las mismas mezclas de CAQ y FC.

Datos de esta evaluación mostraron que los contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$  en tejido estuvieron por debajo de los valores recomendados por Cabrera (2003), entre 1,0 y 2,0 %, los contenidos en sustrato en condiciones iniciales fueron de 0,06, 0,4 y 0,11 % para 35 CAQ, 65 CAQ y 100 CAQ, respectivamente, y aquellos encontrados en los sustratos en la 8 SDS fueron mayores para los sustratos 35 CAQ y 65 CAQ, con valores entre 3,0 y 3,8 %, mientras que las concentraciones de este ion en la solución nutritiva fueron de 110  $\text{mg.L}^{-1}$ .

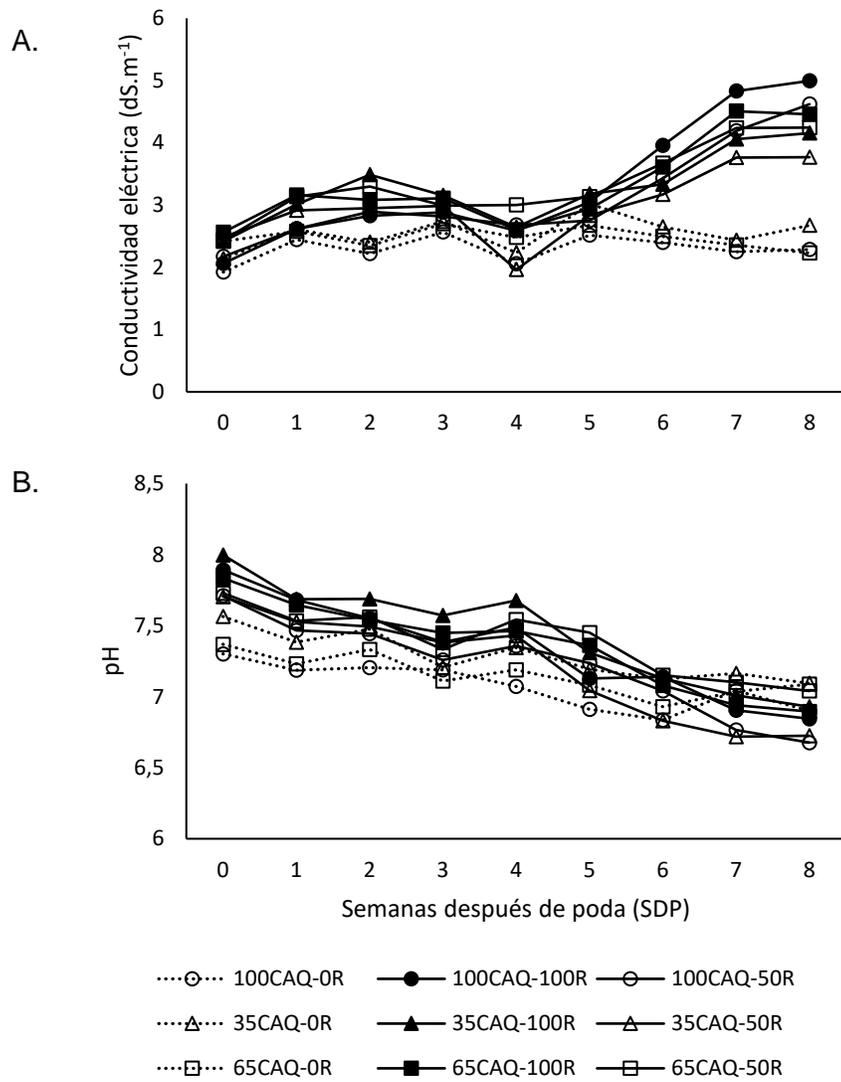
## **pH**

La tendencia del pH de los drenajes fue la acidificación (Figura 2-1B). El análisis de varianza y la posterior prueba de comparación de medias de Tukey indicaron que entre las 0 y 4 SDP los valores de pH fueron significativamente menores ( $P<0,05$ ) para 100CAQ 0R en comparación con los demás tratamientos. La tendencia indica que los drenajes son más alcalinos a medida que se incrementa la fracción de FC y el porcentaje de drenajes. Asumiendo que los lugares de intercambio están siendo saturados por  $\text{Ca}^{2+}$ , se podría presentar un efecto de acumulación de  $\text{H}^+$  en la solución drenada. Se presentaron efectos significativos del porcentaje de reciclaje y del tipo de sustratos ( $P<0,05$ ). A menor porcentaje de reciclaje, mayor tendencia a la acidificación de los drenajes (100 R>50 R>0 R), de igual manera, a menor contenido de FC en los sustratos, mayor acidez de los drenajes (35 CAQ>65 CAQ>100 CAQ) (Tabla 2-4). Estos resultados son congruentes con lo hallado

por Vélez *et al.* (2014) y por Mesa *et al.* (2011), quienes reportaron incrementos en la CE y la tendencia en la reducción del pH durante la transición entre estadios vegetativos y reproductivos para un cultivo de clavel establecido en sustratos a base de CAQ y FC, con reciclaje de drenajes.

Las disminuciones en el pH pueden estar relacionadas con la reducción en la absorción activa de  $\text{NO}_3^-$  y el incremento en la absorción de  $\text{NH}_4^+$  (Bugbee, 2004, Chapagain *et al.*, 2003 y Sonneveld, 2002), así como con la actividad de microorganismos nitrificantes cuya actividad metabólica disminuye el pH del medio (Arp *et al.*, 2007; Avrahami y Conrad, 2003). La actividad nitrificante requiere de un medio con mayor aireación, como sería el caso de las mezclas de sustrato con menores contenidos de FC (Londra *et al.*, 2018; Udayana *et al.*, 2017) y con menores porcentajes de reciclaje. Además, las mezclas de materiales orgánicos utilizados como sustratos para los cultivos, aparte de mejorar sus propiedades físicas y químicas resultantes (Yahya *et al.*, 2009) promueven la actividad metabólica como la hidrólisis de la urea, oxidación de nitrito y amoníaco y la tasa de respiración de  $\text{CO}_2$  (Grunert *et al.*, 2016).

**Figura 2-1:** Comportamiento de la CE y del pH en los drenajes para el sistema de cultivo de rosa en tres sustratos y con tres porcentajes de reciclaje de drenajes. A. Tendencia creciente de la CE con respecto a las semanas después de poda y B. Comportamiento del pH a lo largo del periodo de evaluación.



**Tabla 2-3:** Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de CE (dS.m<sup>-1</sup>) ±DE para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a  $P<0,05$ .

Semana	Tratamiento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
0SDP	1,92±0,27a	2,17±0,29a	2,06±0,36a	2,14±0,2a	2,49±0,38a	2,42±0,35a	2,42±1,3a	2,44±0,54a	2,56±0,22a
1SDP	2,45±0,27c	2,62±0,43bc	2,62±0,35bc	2,61±0,23bc	2,92±0,29abc	3,01±0,44ab	2,58±0,28bc	3,13±0,41a	3,16±0,45a
2SDP	2,22±0,17e	2,89±0,23bc	2,83±0,46bcd	2,4±0,19cde	2,95±0,2b	3,49±0,97a	2,35±0,22de	3,3±0,31ab	3,08±0,16ab
3SDP	2,57±0,19c	2,82±0,25abc	2,89±0,29abc	2,74±0,12bc	2,99±0,21ab	3,15±0,24a	2,7±0,35bc	2,99±0,22ab	3,11±0,17ab
4SDP	2,05±0,4a	2,68±0,59a	2,59±0,35a	2,23±0,41a	1,96±0,44a	2,65±0,5a	2,48±0,37a	3±1,1a	2,6±0,6a
5SDP	2,51±0,3a	2,75±0,3a	3,05±0,62a	3,02±1,01a	2,83±1,05a	3,18±0,99a	2,67±0,29a	3,13±0,76a	2,94±0,4a
6SDP	2,4±0,49d	3,43±0,89abc	3,96±0,98a	2,65±0,54bcd	3,17±0,57	3,33±0,8abcd	2,49±0,32cd	3,67±0,68a	3,61±0,72ab
7SDP	2,25±0,38d	4,19±0,7abc	4,83±1,03a	2,43±0,41d	3,76±0,59c	4,06±0,51bc	2,36±0,27d	4,24±0,86abc	4,51±0,43ab
8SDP	2,28±0,25d	4,62±0,79ab	5±0,92a	2,67±0,57d	3,77±0,65c	4,16±0,71bc	2,23±0,27d	4,24±0,48bc	4,46±0,82ab

**Tabla 2-4:** Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de pH ±DE para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a  $P<0,05$ .

Semana	Tratamiento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
0SDP	7,3±0,2e	7,71±0,19bc	7,89±0,16ab	7,56±0,22cd	7,71±0,22bc	8±0,18a	7,37±0,28de	7,73±0,23bc	7,84±0,16ab
1SDP	7,19±0,1d	7,47±0,13abc	7,68±0,19a	7,38±0,15bcd	7,53±0,19ab	7,69±0,23a	7,23±0,15cd	7,53±0,17ab	7,65±0,12a
2SDP	7,21±0,14c	7,44±0,12abc	7,55±0,23ab	7,48±0,25abc	7,49±0,15abc	7,69±0,18a	7,33±0,17bc	7,56±0,18ab	7,54±0,11abc
3SDP	7,19±0,18bc	7,26±0,15bc	7,38±0,29ab	7,21±0,11bc	7,38±0,18ab	7,57±0,19a	7,11±0,17c	7,33±0,26abc	7,45±0,1ab
4SDP	7,07±0,51c	7,36±0,2abc	7,49±0,35ab	7,35±0,34abc	7,43±0,42abc	7,68±0,23a	7,19±0,21bc	7,54±0,11ab	7,46±0,23ab
5SDP	6,91±0,33a	7,24±0,18a	7,13±1a	7,19±0,95a	7,04±1,05a	7,31±0,95a	7,08±0,16a	7,45±0,14a	7,36±0,17a
6SDP	6,84±0,19a	7,04±0,22a	7,14±0,46a	7,12±0,3a	6,83±0,2a	7,13±0,27a	6,93±0,18a	7,15±0,18a	7,08±0,23a
7SDP	7,04±0,24a	6,77±0,14a	6,9±0,34a	7,17±0,24a	6,72±0,14a	7,01±0,13a	7,04±0,14a	7,1±0,21a	6,94±0,19a
8SDP	6,9±0,15a	6,68±30,2a	6,84±0,27a	7,09±0,25a	6,73±0,16a	6,93±0,26a	7,09±0,16a	7,04±0,26a	6,9±0,2a

## 3. Capítulo 3. Evaluación del comportamiento del sistema de reciclaje en términos de $\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ y S

### 3.1 Resumen

En un sistema de reciclaje de drenajes se presenta la tendencia de la acumulación de iones que son poco absorbidos por las plantas como el sodio y el cloruro, los cuales pueden crear un desbalance iónico en la solución o salinizar el sustrato. Se evaluaron los contenidos de S,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en un sistema de cultivo de rosa cv. 'Charlotte' sin suelo establecido en mezclas de cascarilla de arroz quemada y fibra de coco con tres porcentajes de reciclaje de drenajes (0, 50 y 100 %), para los estadios "Poda" (0 SDP), "Arroz1" (5 SDP) y "Garbanzo" (8 SDP). Se presentaron valores altos de concentración en la solución reciclada que se relacionan directamente con los incrementos en CE durante las semanas evaluadas, y que posiblemente estén afectando la absorción de iones como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NH}_4^+$ . Los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$  presentaron un comportamiento similar en el tiempo, siendo significativamente mayores los contenidos en los sustratos con mayores contenidos de FC en la SDP 0 y lo contrario en la SDP 8. Además, a mayor CAQ y porcentaje de reciclaje mayor  $\text{SO}_4^{2-}$  en los drenajes. Esto probablemente puede ser debido a que la FC provee fuentes de carbono y CAQ las condiciones de aireación para que las bacterias oxiden el S y lo inmovilicen temporalmente en compuestos orgánicos quedando adsorbido en el sustrato y reduciendo su lixiviación. No hubo diferencia significativa en los contenidos de S en sustratos y tejidos. El reciclaje de drenajes (50 y 100 %) incrementó significativamente los contenidos de  $\text{Na}^+$  en el sustrato. Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  fueron significativamente diferentes en el estadio garbanzo (8 SDP), siendo mayores las concentraciones en los tratamientos con reciclaje (50 y 100 %), independiente del tipo de mezcla de sustratos.

## 3.2 Introducción

En los sistemas de cultivo sin suelo, los iones que no son absorbidos por las plantas son drenados y tienden a acumularse en la solución nutritiva recirculante, por tanto, ésta debe ser descargada del sistema. Con frecuencia, en particular en ambientes de altas temperaturas donde la acumulación de sales puede llegar hasta  $2 \text{ dS.m}^{-1}$  (Incrocci *et al.*, 2006). Sonneveld *et al.* (1999) concluyeron que, dependiendo de la especie, la absorción de sodio y cloruro por la planta se incrementa con el aumento de sus concentraciones en el ambiente radical, una ventaja al contrarrestar su acumulación en la rizosfera, sin embargo, el exceso de sales en la solución de riego puede afectar la vida en florero de las flores cosechadas (Aly *et al.*, 1998; Fujimoto *et al.*, 2000 y Riley, 1987).

La composición de una solución nutritiva está completamente definida cuando se conocen la concentración total de sales, el pH, las concentraciones de micronutrientes, las relaciones entre macronutrientes y la composición del agua de riego (Savvas y Adamidis, 1999). Al utilizar un sistema de reciclaje de drenajes se debe tener en cuenta la respuesta fisiológica de la especie a cultivar. Se ha establecido que la absorción de nutrientes por la planta es específica para cada soluto y sigue la dinámica de Michaelis-Menten (Claassen y Barber, 1974). Bugbee (2003) ubica los nutrientes esenciales en tres categorías basado en la tasa de absorción de la solución (Tabla 3-1), como es el caso de la absorción eficiente de iones monovalentes (Schippers, 1980). Los mecanismos para la absorción de iones son diferentes para cada ion y para cada especie de planta, por tanto, los términos absorción pasiva y activa no deben tomarse literalmente, ya que la química de la planta juega un papel importante (Marschner, 2012) a través de la estequiometría de algunos elementos (Ågren, 2008).

La cantidad total de los nutrientes en la solución puede ser determinada fácilmente y con cierta precisión, a partir de la CE de la solución. Sin embargo, a causa de la tasa de remoción diferencial mediante la absorción de nutrientes, la CE en su mayoría mide la concentración de calcio, magnesio y sulfato remanente en la solución, mientras que los micronutrientes contribuyen en menos de un 0,1 % a esta variable (Bugbee, 2004).

Disponer de agua de buena calidad para el riego y el fertirriego es importante para la floricultura y en el caso de especies como el crisantemo, pueden usarse aguas ligeramente salinas ( $1 \text{ g.L}^{-1} \text{ NaCl}$ ) (Lee y van Iersel, 2008). Cuando se utiliza agua para riego de baja calidad, normalmente se presenta un rápido incremento en la CE debido a la acumulación de iones como sodio, cloruro y sulfato y, en el caso de aguas duras, calcio y magnesio. Los iones bicarbonato comúnmente presentes en las aguas subterráneas son neutralizados por la aplicación de ácido. En cambio, micronutrientes como el boro o metales pesados podrían acumularse a niveles tóxicos; sin embargo, sus concentraciones están en el orden de  $\mu\text{mol.L}^{-1}$  y a diferencia de otros iones que se pueden determinar indirectamente midiendo la CE, estos iones tienen que ser monitoreados mediante análisis de laboratorio costosos (Olympios, 1999; Carmassi *et al.*, 2003).

**Tabla 3-1:** Clasificación de elementos en la solución nutritiva de acuerdo con su tasa de absorción.

Tasa de remoción	Elementos
Absorción activa, remoción rápida	$\text{NO}_3$ , $\text{NH}_4$ P, K, Mn
Absorción intermedia	Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mo, Cl
Absorción pasiva, remoción lenta	Ca, B

Fuente: Bugbee (2004).

Varias investigaciones han reportado que especialmente en el caso de macronutrientes absorbidos activamente como N, P y K, manteniendo sus concentraciones bajas se podrían obtener buenos rendimientos (Savvas, 2003). Los mejores resultados se obtienen cuando las concentraciones de elementos en solución corresponden aproximadamente a la relación de absorción nutrientes: agua (Sonneveld, 1981; Graves, 1983). En estas condiciones las plantas no consumen energía para tomar o excluir activamente iones (Steiner, 1980). No obstante, las relaciones de absorción nutrientes: agua fluctúan en respuesta a condiciones climáticas, lo que dificulta la preparación de una solución que sea coherente con dicha relación (Savvas, 2003).

En la práctica, en sistemas basados en sustratos orgánicos es difícil el seguimiento a la variación en la concentración de microelementos (Cu, Fe, Mn, Zn y B), posiblemente a causa de los cambios en características físicas, químicas y microbiológicas de los sustratos. En sistemas basados en fibra de coco, es posible tener excesos de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  a causa de los altos contenidos de estos iones en el material (Abad *et al.*, 2002).

Se necesita obtener información cuantitativa de la absorción de agua y iones durante el desarrollo del cultivo. Además de los iones esenciales, considerar la absorción de otros iones como sodio y cloruro para evitar acumulaciones en el ambiente radical. Las relaciones y las cantidades de nutrientes absorbidos varían con el estadio y condiciones de desarrollo de las plantas. Los cambios inesperados en la composición de la solución nutritiva ocurren con frecuencia en sistemas comerciales, por lo que es necesario realizar análisis en el ambiente radical (Sonneveld, 2000). De igual manera, la composición y el volumen de la solución nutritiva drenada será variable en el tiempo y tendrá consecuencias en el número de ciclos de reutilización.

El azufre es un elemento esencial, con papeles claves en la formación de aminoácidos y la síntesis de proteínas y clorofila, e importante para la producción de cultivos. En el suelo el sulfato es la forma accesible a las plantas, pero es susceptible a la lixiviación. Los contenidos de azufre en los suelos están relacionados con aquellos de la materia orgánica y las transformaciones químicas son en su mayoría catalizadas por microorganismos (Kertesz y Mirleau, 2004), algo similar sucede en sustratos orgánicos donde los microorganismos oxidan el azufre en ácido sulfúrico (Handreck y Black, 1999), además, este ácido presenta una alta CE (Foxboro, 2007).

El cloruro se destaca por sus papeles como componente del sistema fotolítico en el fotosistema II, como regulador estomático en varias especies y como contra anión. El cloruro proviene del suelo, del agua de riego, de la lluvia, de trazas de fertilizantes o la contaminación atmosférica, por lo que no se evidencian problemas por deficiencia, y es más un inconveniente la presencia de toxicidades (Broadley *et al.*, 2012). Una de las razones para la rápida acumulación del cloruro es su débil retención en los suelos y la posterior lixiviación a causa de su alta movilidad (Marschner, 2012). Sin embargo, el cloruro es un elemento esencial para todas las plantas, cuyos contenidos en la masa seca de las plantas son relativamente bajos ( $2\text{-}20 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) y la adición del ion a la solución puede ser una estrategia para disminuir los contenidos de nitrato en cultivos debido a los efectos antagónicos entre estos dos iones (Imas y Magen, 2004; Chapagain *et al.*, 2003). En promedio, concentraciones de cloruro en la solución externa mayores que 20 mM pueden tener efectos tóxicos en especies sensibles, mientras que, para las tolerantes, las concentraciones pueden ser de hasta cinco veces mayores sin afectar el crecimiento (Broadley *et al.*, 2012).

Aunque el sodio es esencial para la mayoría de las plantas C4, poco se sabe aún de su esencialidad o beneficios en otras especies, aparte del hecho de reemplazar algunas funciones del K<sup>+</sup> y estimular el crecimiento. La concentración de Na<sup>+</sup> en tejidos es alta, típica de un macroelemento, posiblemente relacionado con su rol como reemplazante de funciones del K<sup>+</sup> como la osmorregulación (Marschner, 2012). Las plantas sensibles a la salinidad dependen principalmente de la exclusión de Na<sup>+</sup> en la membrana plasmática (Blumwald *et al.*, 2000) y tienen la capacidad de compartimentar y acumular Na<sup>+</sup> en células de la raíz (Marschner, 2012) reduciendo el transporte a la parte aérea, aunque en algunas especies ornamentales expuestas continuamente a altas concentraciones de Na<sup>+</sup> se puede perder esta capacidad (Cabrera *et al.*, 2009; Cabrera y Perdomo, 2003; Farnham *et al.*, 1985).

En general, las rosas son clasificadas como sensibles a la salinidad e investigaciones indican que este cultivo puede tolerar concentraciones de NaCl entre 15 y 30 mM con un manejo adecuado del riego y la fertilización, dependiendo del tipo y concentración de sales, el sistema de cultivo, el tipo de sustrato, el sistema de riego y del cultivar y el portainjerto (Cabrera, 2002; Cabrera y Perdomo, 2003; Cabrera *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2008 y Lorenzo, 2000).

El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto del porcentaje de reciclaje de drenajes en tres niveles (0, 50 y 100) y del tipo de mezcla de los sustratos orgánicos: cascarilla de arroz 100 % (100 CAQ), cascarilla de arroz 65 %:fibra de coco 35 % (65 CAQ) y cascarilla de arroz 35 %:fibra de coco 65 % (35 CAQ) en las concentraciones de S, Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup> en los estadios Poda”, “Arroz 1” y “Garbanzo”, semanas 0, 5 y 8 después de poda (SDP), respectivamente en plantas de rosa cv. ‘Charlotte’ en un cultivo comercial bajo cubierta.

### **3.3 Materiales y métodos**

#### **3.3.1 Ubicación**

El proyecto se realizó en el Centro de Biotecnología Agropecuaria del SENA, ubicado en el municipio de Mosquera (4°41' N, 74°13' O; 2516 msnm), con promedios anuales de temperatura y lluvia de 12,6 °C y 670 mm, respectivamente, y con características de zona de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) (Guzmán, 1996).

### 3.3.2 Material vegetal y manejo del cultivo

Se dispuso de un invernadero tradicional en madera cubierto con plástico AgrocLEAR<sup>®</sup> (Productos químicos andinos, Colombia) con cinco naves dimensiones de 65 x 6,8 m cada una, sembradas con rosa cv. 'Charlotte', injertada sobre 'Natal Briar'. El cultivo estaba conformado por 33 camas suspendidas de 15 x 0,8 m, en las que se ubicaron materas de 8 L para una densidad de siembra de 7 plantas/m<sup>2</sup> de invernadero.

La fórmula fertilizante, en mg.L<sup>-1</sup>, fue 170 de nitrógeno total (15 % de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>); 35 P; 150 K; 110 Ca; 60 Mg; 82 S; 1 Mn; 0,5 Zn; 0,5 Cu; 3 Fe y 0,5 B y 0,1 Mo. Esta fórmula se preparó conforme a las fórmulas comerciales utilizadas en la región y se ajustó de acuerdo con las características del agua. El manejo cultural y sanitario se realizó como de rutina para este cultivo.

### 3.3.3 Tratamientos y diseño experimental

Para el establecimiento de las plantas se utilizaron mezclas de los sustratos cascarilla de arroz (CAQ), con un grado de quemado entre 70 y 100 %, y fibra de coco lavada (FC) (Tabla 3-2), así: cascarilla de arroz 100 % (100 CAQ), cascarilla de arroz 65 %:fibra de coco 35 % (65 CAQ) y cascarilla de arroz 35 %:fibra de coco 65 % (35 CAQ). Las relaciones de mezclas correspondieron a los niveles del factor experimental sustrato. Se utilizó un sistema para reciclaje de drenajes (SARD), el cual reciclaba los drenajes en tres niveles 0, 50 y 100 % y que constituyó el factor porcentaje de reciclaje. El SARD está ampliamente descrito en el capítulo 1 de este documento, así como en Cuervo *et al.* (2011) y en Cuervo *et al.* (2012).

Los tratamientos se configuraron como la combinación de los niveles de los factores porcentaje de reciclaje y tipos de sustratos, para un total de nueve tratamientos con tres repeticiones cada uno (Tabla 3-3). La unidad experimental consistió en una cama de cultivo. Este arreglo bifactorial se realizó bajo un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar, donde la parcela principal correspondió al factor porcentaje de reciclaje y la subparcela al factor sustrato.

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_k + \eta_{ik} + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Con:  $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3$

Donde:

$\mu$  es el efecto de la media general.

$\alpha_i$  es el efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor porcentaje de reciclaje.

$\delta_k$  es el efecto del  $k$ -ésimo bloque.

$\eta_{ik}$  es el efecto del error aleatorio en la parcela principal (porcentaje de reciclaje por bloque).

$\beta_j$  es el efecto del  $j$ -ésimo nivel del factor Sustrato.

$(\alpha\beta)_{ij}$  es el efecto de la  $ij$ -ésima interacción entre los dos factores (porcentaje de reciclaje por sustrato).

$\varepsilon_{ijk}$  es el efecto del error aleatorio en la subparcela

$Y_{ijk}$  es la observación en el  $k$ -ésimo bloque del  $i$ -ésimo nivel del factor porcentaje de reciclaje y el  $j$ -ésimo nivel del factor sustrato.

**Tabla 3-2:** Propiedades químicas de los sustratos empleados en el ensayo.

Tipo	pH	CE (dS.m <sup>-1</sup> )	CO N P Ca K Mg Na							Cu Fe Mn Zn B S					
			(%)							(mg.kg <sup>-1</sup> )					
100CAQ	5,53	6,82	27,2	0,51	0,06	0,11	0,01	0,04	0,03	4,4	225	136	54	28	481
65CAQ	5,31	6,52	23,6	0,39	0,08	0,4	0,01	0,06	0,08	13,4	433	87	50	34	470
35CAQ	5,18	5,18	6,04	26,6	0,5	0,06	0,16	0,01	0,17	19,1	704	66	47	-	548

**Tabla 3-3:** Tratamientos a evaluar en rosa cv. 'Charlotte' cultivado en sustratos con recirculación automática de drenajes.

Numeración	Tratamientos	Sustratos	Reciclaje (%)
1	100 CAQ-OR*	100 CAQ	
7	65 CAQ-OR*	65 CAQ	0
4	35 CAQ-OR*	35 CAQ	
2	100 CAQ-50R	100 CAQ	
8	65 CAQ-50R	65 CAQ	50
5	35 CAQ-50R	35 CAQ	
3	100 CAQ-100R	100 CAQ	
9	65 CAQ-100R	65 CAQ	100
6	35 CAQ-100R	35 CAQ	

100 CAQ = 100 % cascarilla de arroz quemada; 65 CAQ = 65 % cascarilla de arroz quemada - 35 % fibra de coco; 35 CAQ = 35 % cascarilla de arroz quemada - 65 % fibra de coco.

\*Tratamientos que no ingresan al SARD.

### 3.3.4 Variables respuesta y análisis estadístico

En cada réplica (cama) se realizaron muestreos de drenajes, sustratos y plantas completas en los estadios de crecimiento “Poda”, “Arroz 1” y “Garbanzo” que corresponden a las semanas 0, 5 y 8 después de poda (SDP), respectivamente. Las muestras fueron llevadas al laboratorio de suelos y aguas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, para la determinación de los contenidos de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y S; los protocolos utilizados para los análisis químicos se pueden consultar en Vélez (2012).

Una vez reportados los resultados por el laboratorio, se transcribieron a una hoja de cálculo para su posterior análisis. El software estadístico R (Versión 3.5.3 R Core Team 2019 R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>) fue utilizado para realizar el análisis de varianza para el diseño de parcelas divididas y la posterior prueba de comparación de Tukey ( $P < 0,05$ ) para cada una de las semanas de evaluación (librería *Agricolae*, R package version 1.3-1. Felipe de Mendiburu (2019): Statistical Procedures for Agricultural Research. <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>) (de Medinburu, 2019).

## 3.4 Resultados y discusión

### Concentraciones de azufre en drenajes, sustratos y tejido

La FC es un material con altos contenidos de lignina y celulosa (Abad *et al.*, 2002), fuentes de carbono requeridas para el metabolismo de microorganismos oxidantes de S, como las bacterias del género *Thiobacillus* (Tourna *et al.*, 2014 y Lucheta y Lambais, 2012) quienes pueden incrementar la inmovilización temporal del S en compuestos órgano-azufrados (Kertesz y Mirleau, 2004). La oxidación del S a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en sustratos orgánicos requieren de la actividad de microorganismos en presencia de un medio con baja saturación de agua, lo que significa que los sustratos con mayor contenido de CAQ son un medio apropiado para esta reacción, además, se incrementa la acidez del medio y se aumenta la CE (Cabrera *et al.*, 2017), descrito también por Roig *et al.* (2004) en el caso de mezclas de FC y arcillas expandidas.

El comportamiento de las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$  (Figura 3-1 y Figura 3-2) describe una relación positiva, tal como lo mencionado por Marschner (2012), quien indica que al analizar los

iones en la solución nutritiva se debe considerar a los contra iones, esto es, si un anión es absorbido a baja velocidad lo mismo sucederá con el contra ion.

Para los contenidos de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se observa una relación positiva entre ellos y con la CE, resultados congruentes con lo referenciado por Cabrera *et al.* (2017).

### **Concentraciones de sodio en drenajes, sustratos y tejido**

Para el estadio Poda (0 SDP) se verificaron concentraciones significativamente mayores de  $\text{Na}^+$  para los sustratos basados en FC, independiente del porcentaje de reciclaje de la solución (Figura 3-2, Tabla 3-5). Para el estadio "Arroz1" (5 SDP) no hubo diferencia alguna de las concentraciones del ion en los drenajes; mientras que para el estadio "Garbanzo" (8 SDP) se presentó una diferencia significativa en los contenidos de  $\text{Na}^+$  para los sustratos con mayor contenido de CAQ y en aquellos donde se realizó el reciclaje de los drenajes, lo opuesto a lo sucedido en 0 SDP. A nivel de sustratos, para los estadios 0 SDP y 5 SDP no hubo diferencia significativa entre los contenidos de  $\text{Na}^+$ , mientras que en la 8 SDP, a mayores contenidos de FC significativamente mayores los contenidos del ion, sin importar el porcentaje de reciclaje. Para los contenidos en tejido no hubo diferencia estadística.

En general, en el tiempo se aprecia una tendencia creciente en las concentraciones de  $\text{Na}^+$  en los drenajes, lo que puede estar relacionado con que los materiales FC, los cuales se sabe contienen altas concentraciones de  $\text{Na}^+$ , pasaron por un proceso de lavado y lixiviación de este ion, el cual se fue acumulando a medida que se reciclaba la solución. Adicionalmente, los sustratos basados en FC pudieron haber adsorbido  $\text{Na}^+$ , dada su alta capacidad para la retención de cationes, capacidad que se incrementó en el tiempo posiblemente por la activación de este sustrato FC por la acción de ácidos, como el sulfúrico, proveniente de la actividad microbiana (Hettiarachchi *et al.*, 2015). Los contenidos en tejidos no sugieren algún incremento en la absorción del ion relacionados con las concentraciones en la solución drenada, contrario a lo reportado por Solís-Pérez y Cabrera (2007).

### **Concentraciones de cloruro en drenajes**

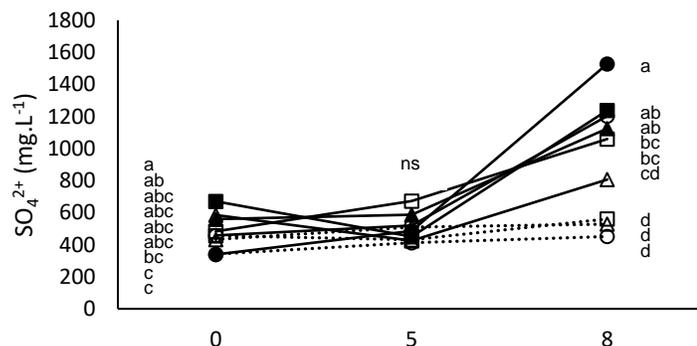
Las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  solo fueron significativamente diferentes en el estadio "Garbanzo" (8 SDP). En este estadio las concentraciones del ion fueron significativamente mayores para los tratamientos con reciclaje independiente del tipo de mezcla de sustrato, un evento típico en los sistemas con reciclaje (Figura 3-3 y Tabla 3-6). Este comportamiento podría ser explicado por la

competencia del  $\text{Cl}^-$  con el  $\text{NO}_3^-$  en la absorción (Sambo *et al.*, 2009) ya que en la 8 SDP la planta pudo haber favorecido la absorción de  $\text{NO}_3^-$  (Rodríguez y Flórez, 2012), incrementando la exclusión de  $\text{Cl}^-$  y atenuando la inhibición de absorción de  $\text{NO}_3^-$  (Massa *et al.*, 2008), además, que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  fueron aproximadamente dos veces las de  $\text{Cl}^-$  (datos no mostrados).

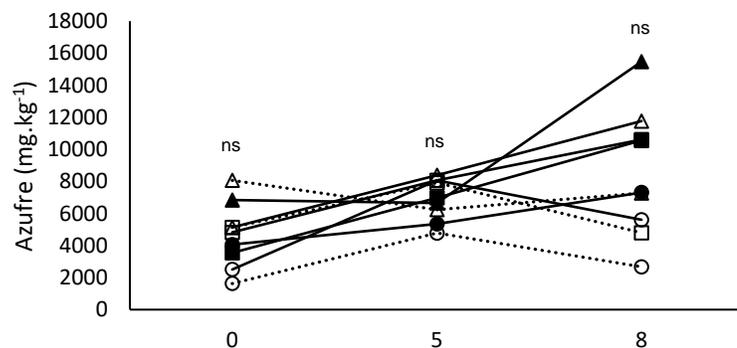
**Figura 3-1:** Contenidos de azufre para cada uno de los estadios evaluados en rosa cv. 'Charlotte' sembrada en sustrato.

A. Drenajes, expresado como  $\text{SO}_4^{2+}$  ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ); en B. Sustratos y C. Tejido, expresado como S ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

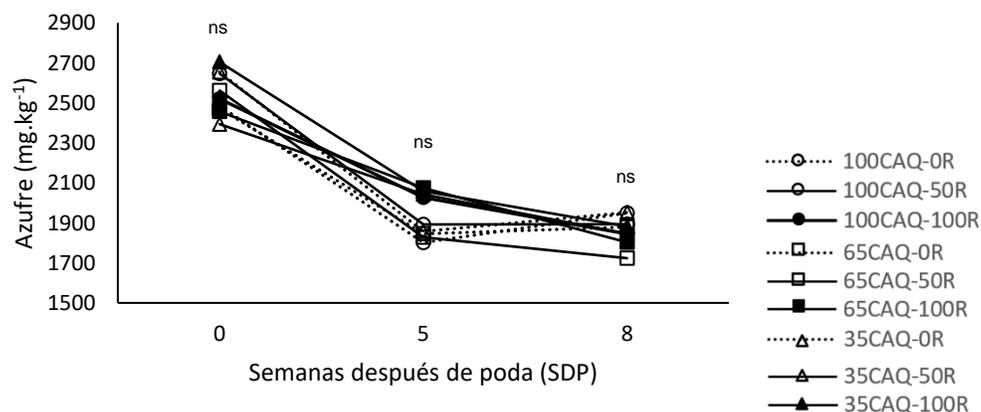
**A.**



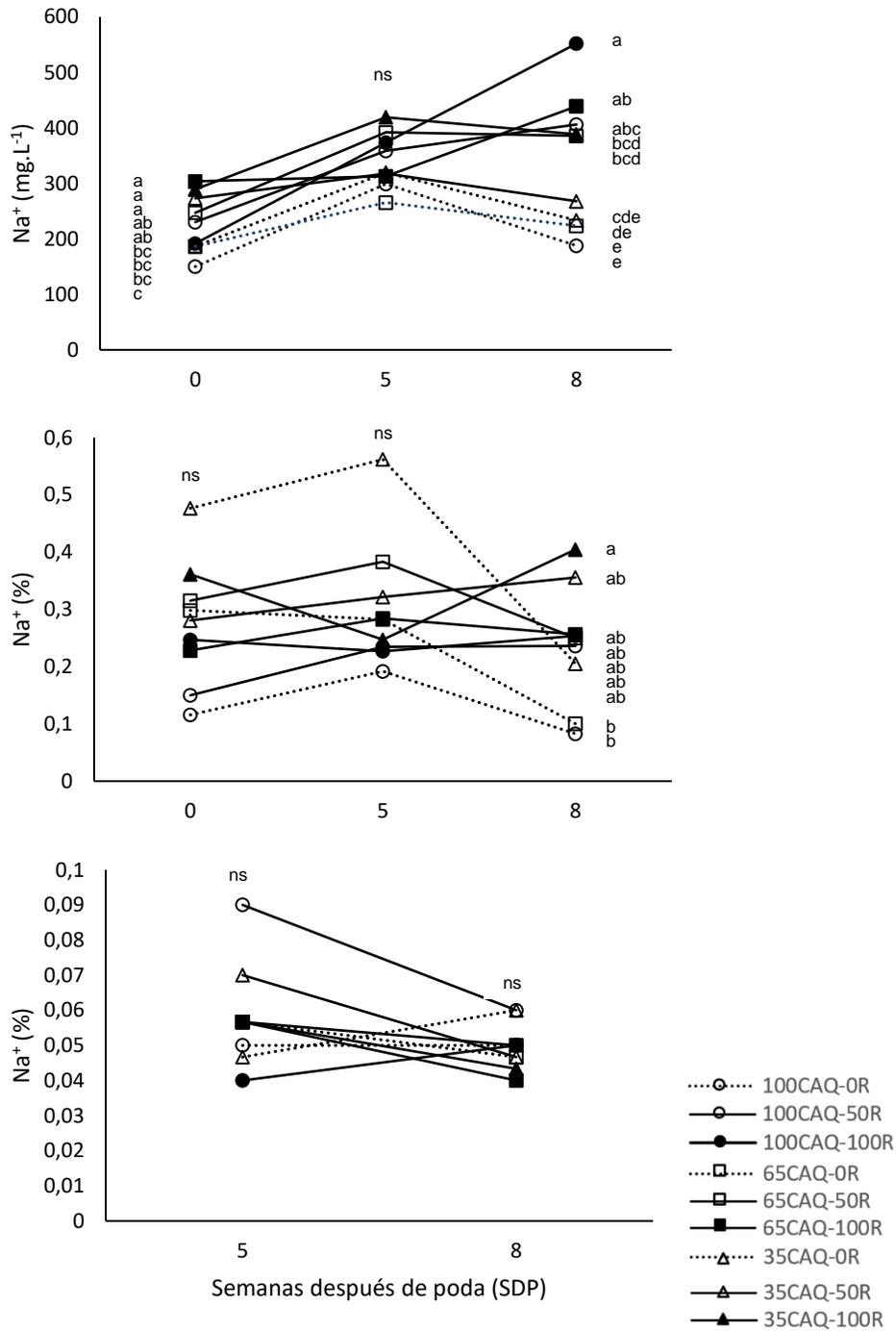
**B.**

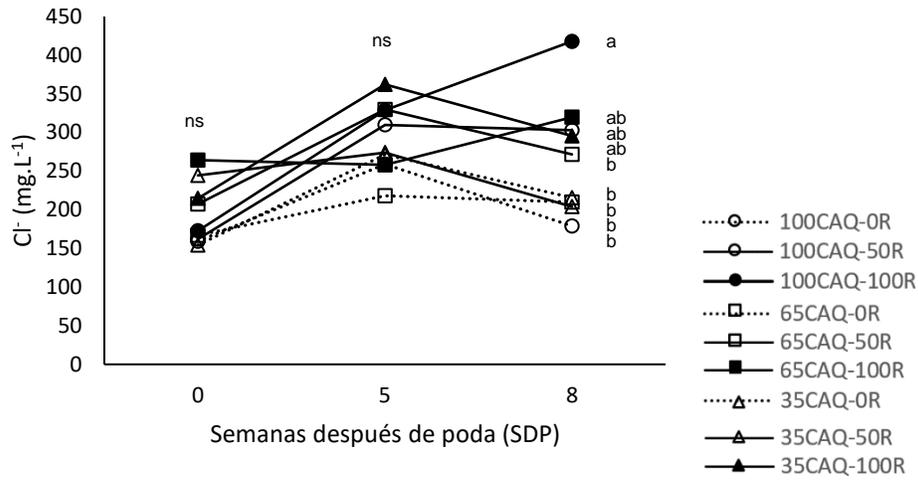


**C.**



**Figura 3-2:** Contenidos de azufre para cada uno de los estadios evaluados en rosa cv. 'Charlotte' sembrada en sustrato. A. Drenajes, Na<sup>+</sup> expresado como (mg.L<sup>-1</sup>); B. Sustratos y C. Tejido, expresados como (mg.kg<sup>-1</sup>).



**Figura 3-3:** Contenidos de cloruro para cada uno de los estadios evaluados en drenajes ( $\text{mg.kg}^{-1}$ ).

**Tabla 3-4:** Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de  $\text{SO}_4^{2-}$  y S  $\pm$ DE para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes SARD. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a  $P < 0,05$ .

Semana	Tratamiento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b><math>\text{SO}_4^{2-}</math> en drenajes (<math>\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}</math>)</b>									
0	341,3 $\pm$ 12,1c	458 $\pm$ 90,4abc	339,3 $\pm$ 55,8c	433,3 $\pm$ 51,3bc	584,3 $\pm$ 146,9ab	560 $\pm$ 138,4abc	457 $\pm$ 13,1abc	483,3 $\pm$ 196,9	671 $\pm$ 51,4a
5	413,2 $\pm$ 122,9a	520,2 $\pm$ 151,7a	485,8 $\pm$ 252,1a	510,1 $\pm$ 108,5a	425,4 $\pm$ 63,4a	586,9 $\pm$ 237,1a	431,3 $\pm$ 75,3a	671,8 $\pm$ 62,9a	450,8 $\pm$ 79,9a
8	451,33 $\pm$ 84,33d	1203,57 $\pm$ 296,07ab	1528,32 $\pm$ 270,26a	528,79 $\pm$ 123,19d	806,82 $\pm$ 192,44cd	1125,02 $\pm$ 59,19bc	560,86 $\pm$ 57,31d	1059,71 $\pm$ 284,1bc	1238,41 $\pm$ 65,17ab
<b>S en sustratos (<math>\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}</math>)</b>									
0	1626,5 $\pm$ 666,3a	2500,1 $\pm$ 799,4a	4058,8 $\pm$ 4317,9a	8065,2 $\pm$ 1841,2a	5133,2 $\pm$ 672,6a	6843,2 $\pm$ 598,5a	5133,4 $\pm$ 1588,6a	4821,9 $\pm$ 4055,5a	3540,8 $\pm$ 1205,2a
5	4781,75 $\pm$ 1737,15a	8061,26 $\pm$ 6597,34a	5354,27 $\pm$ 2832,08a	6234,9 $\pm$ 2964,4a	8393,9 $\pm$ 2882,7a	6651,99 $\pm$ 1850,1a	7918,8 $\pm$ 508,8a	8062,6 $\pm$ 5786,3a	6970,8 $\pm$ 2474,1a
8	2661,22 $\pm$ 422,66a	5600,04 $\pm$ 1519,26a	7304,4 $\pm$ 1676,15a	7277,3 $\pm$ 1286,6a	11765,7 $\pm$ 8911,0a	15471,99 $\pm$ 11314,4a	4794,5 $\pm$ 1073,1a	10611,2 $\pm$ 6806,8a	10558,6 $\pm$ 8019,3a
<b>S en tejido (<math>\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}</math>)</b>									
0	2484,3 $\pm$ 212,2a	2646,7 $\pm$ 225,9a	2520,3 $\pm$ 616,7a	2653,7 $\pm$ 31,9a	2393,7 $\pm$ 327,9a	2704 $\pm$ 175,1a	2472,7 $\pm$ 124,0a	2561,7 $\pm$ 111,3a	2456,7 $\pm$ 461,4a
5	1801,7 $\pm$ 96,8a	1892,3 $\pm$ 164,2a	2027,3 $\pm$ 81,7a	1857,3 $\pm$ 98,1a	2043,3 $\pm$ 137a	2058,67 $\pm$ 367,5a	1845,3 $\pm$ 40,1a	1828,7 $\pm$ 223,5a	2075 $\pm$ 92,6a
8	1948,7 $\pm$ 384,5a	1893,7 $\pm$ 129,5a	1845 $\pm$ 51,0a	1952,3 $\pm$ 28,5a	1845 $\pm$ 84,9a	1882 $\pm$ 355,8a	1879 $\pm$ 153,5a	1723,3 $\pm$ 103,5a	1803 $\pm$ 165a

**Tabla 3-5:** Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de Na<sup>+</sup> ±DE para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes SARD. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a  $P < 0,05$ .

Semana	Tratamiento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>Na<sup>+</sup> en drenajes (mg.L<sup>-1</sup>)</b>									
0	150±6,93c	230,33±42,12ab	191,67±30,01bc	186,33±18,01bc	273±61,02a	289,33±51,5a	186,33±4,16bc	247±78ab	303,67±15,04a
5	298,98±147,65a	358,58±91,84a	373,5±112,44a	319,36±114,37a	317,65±106,78a	418,97±173,58a	265,52±51,19a	391,88±136,95a	312,63±42,16a
8	187,76±21,38e	405,98±100,78abc	551,8±120,07a	233,39±63,05de	267,82±68,6cde	388,06±26,72bcd	223,72±19,42e	385,65±100,39bcd	438,8±38,54ab
<b>Na<sup>+</sup> en sustratos (%)</b>									
0	0,12±0,05a	0,15±0,01a	0,25±0,15a	0,48±0,18a	0,28±0,02a	0,36±0,11a	0,3±0,09a	0,32±0,26a	0,23±0,09a
5	0,19±0,09a	0,23±0,06a	0,23±0,08a	0,56±0,54a	0,32±0,14a	0,25±0,04a	0,28±0,04a	0,38±0,37a	0,28±0,04a
8	0,08±0,06b	0,24±0,08ab	0,25±0,11ab	0,21±0,08ab	0,36±0,2ab	0,4±0,11a	0,1±0b	0,25±0,05ab	0,26±0,14ab
<b>Na<sup>+</sup> en tejido (%)</b>									
5	0,05±0,03a	0,09±0,07a	0,04±0,02a	0,05±0,01a	0,07±0,04a	0,06±0,04a	0,06±0,05a	0,06±0,03a	0,06±0,04a
8	0,05±0,01a	0,06±0a	0,05±0,02a	0,06±0,03a	0,05±0,01a	0,04±0,01a	0,05±0,01a	0,05±0,03a	0,04±0a

**Tabla 3-6:** Prueba de comparación múltiple de Tukey. Se indican los valores medios de Cl<sup>-</sup> ±DE para los tratamientos evaluados en cada una de las semanas de ejecución del sistema automático de drenajes SARD. Medias con diferente letra indican diferencia significativa a  $P < 0,05$ .

Semana	Tratamiento								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>Cl<sup>-</sup> en drenajes (mg.L<sup>-1</sup>)</b>									
0	159,3±6a	162±11,3a	172,7±28,7a	154,3±11,0a	244,3±58,7a	214,7±59,7a	167±25,2a	207,3±57,7a	264±17,4a
5	258,9±135,2a	309,7±88,3a	328,8±115,7a	271,4±93,9a	273,9±109,0a	362,1±156,2a	218,1±36,4a	329,7±134,1a	258,1±42,7a
8	179,0±33,7b	303,0±80,7ab	417,9±108,4a	215,6±53,9b	204,0±40,6b	295,5±25,0ab	209,8±22,2b	271,4±63,9b	319,7±38,8ab

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

En la agricultura intensiva actual se requiere de sistemas para la apropiada recolección, evaluación, recomposición y reciclaje de los efluentes generados. Este tipo de sistemas necesita del modelo de programación necesario para reciclar la solución nutritiva de acuerdo con las variables más influyentes en la calidad del fertirriego. En las condiciones de cultivo en la sabana de Bogotá se necesita el desarrollo de tecnologías que estén al alcance de los agricultores y que permitan el manejo y control de procedimientos como el fertirriego, reciclaje de solución y control de clima en los cultivos bajo cubierta. Este tipo de tecnologías deben caracterizarse por su bajo costo y por tener una complejidad que permita su uso y manejo por parte de personal con conocimientos básicos de sistemas y de las condiciones de cultivo. El sistema automático para el reciclaje de drenajes desarrollado por el proyecto liderado por la Universidad Nacional de Colombia se considera como una herramienta útil para mitigar problemas de contaminación y para reducir costos de producción. Aunque se necesitan de pruebas más prolongadas en campo en condiciones comerciales para determinar falencias no halladas en la fase experimental y refinar hardware y software.

En algunos cultivos de flores en la sabana de Bogotá los drenajes se canalizan hacia el reservorio para luego utilizar el agua de riego en la preparación de nueva solución de fertirriego. Esto no se considera como reciclaje, ya que se está alterando la composición química del agua del reservorio con iones poco absorbidos por las plantas, por lo que es necesario formular técnicas de reciclaje aislando las soluciones drenadas para su recomposición.

La ejecución de este proyecto hizo posible el funcionamiento del sistema de reciclaje automático de drenajes. Sin embargo, es necesario realizar el seguimiento al proceso para determinar puntos críticos y, si es posible, simplificar operaciones; lo que significaría la reducción en control. Otro de

los aportes significativos sería la generación de tecnología local para el diseño y la fabricación de hardware para la automatización y control de sistemas de reciclaje a nivel de finca; con la consecuente reducción de costos iniciales y de montaje. De esta manera se podría ofrecer un paquete completo al productor, que incluiría el hardware, software y los fundamentos del comportamiento químico de la solución a reciclar con base en las interacciones sustrato-planta-ambiente.

Con respecto al funcionamiento del sistema en términos de variables químicas se determinó que la tendencia en el incremento de la CE, que para 1, 2 y 3 SDP la CE fue significativamente mayor al reciclar la solución en 35 CAQ y 65 CAQ y en 7 y 8 SDP lo fue para 100 CAQ y 65 CAQ. En 6 SDP hubo efecto significativo del reciclaje 50 y 100 % independiente del sustrato. Este comportamiento puede ser causado por la liberación de iones y alta retención de agua, propias de la FC y la alta adsorción de iones por la CAQ. Entre 0 y 4 SDP el pH fue significativamente menor para el tratamiento 100 CAQ sin reciclaje, lo que posiblemente se relaciona con los cambios en la absorción de iones como el  $\text{NO}_3^-$  y a la actividad de microorganismos nitrificantes, facilitada por las propiedades de la FC.

Para los contenidos de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  se observa una relación positiva entre ellos y con la CE. En general, en la 0 SDP para los sustratos con mayores contenidos de FC y 100 % de reciclaje, los drenajes presentan mayores concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$ , y en la 8 SDP, sucede todo lo contrario. Esto puede estar relacionado con un proceso de transformación de la FC y CAQ, y la adsorción de iones y saturación por parte de la CAQ. Es probable que ácidos como el sulfúrico hayan activado la FC y este sustrato adsorbido al  $\text{Na}^+$ . En el estadio garbanzo (8 SDP) las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  fueron significativamente en los tratamientos con reciclaje (50 y 100 %), independiente del tipo de mezcla de sustratos.

La tendencia al incremento de la CE, y la concentración de los iones evaluados y la reducción del pH puede relacionarse con las características físicas y químicas de los sustratos, tales como la capacidad de intercambio y la tasa de mineralización, así como con el componente microbiológico que puede estar implicado en la degradación del material, en especial para los sustratos basado en mayores contenidos de FC.

## 4.2 Recomendaciones

Un sistema de reciclaje de drenajes permite facilitar la operación del cultivo, en el caso de rosa, sería de gran importancia a causa del área cultivada y de las implicaciones ambientales actuales relacionadas con el uso eficiente de los recursos. Además, la modelación del comportamiento del sistema en función de variables del sustrato, planta y ambiente adquiridas en tiempo cercano al real sería ideal, algo que en la actualidad es posible efectuar gracias a las herramientas de hardware y software libre, obviamente, con el conocimiento adecuado para la elaboración de los algoritmos su entrenamiento para que sea una tarea automática.

Es importante que los programas de fertirriego contemplen la capacidad de los sustratos de liberar y retener elementos durante su proceso de maduración y degradación, procesos dependientes de factores como la temperatura, la humedad del sustrato (Becker *et al.*, 2008 y Heinen *et al.*, 2001) al final del ciclo de producción indica una baja demanda de estos elementos, por lo que se sugiere una aplicación diferencial de concentración de elementos con el objetivo de reducir antagonismos entre elementos y su pérdida por lixiviación. Estas acumulaciones y agotamientos de elementos en la solución pueden estar relacionados con las características químicas de los sustratos y su proceso de degradación (Martínez-Gutiérrez *et al.*, 2015; Urrestarazu *et al.*, 2008 y Cárdenas *et al.*, 2005), así como con los microorganismos que habitan los sustratos orgánicos como FC y CAQ los cuales pueden estar afectando las tasas de mineralización y así, variando las características químicas de la solución en la rizósfera, lo que significa que, tanto para un sistema abierto, como para un sistema de reciclaje de drenajes, las fórmulas deben ser dinámicas en el tiempo.



## Bibliografía

- Abad M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira y V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresour Technol.* 82(3):241-5. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00189-4
- Arp, D.J., P.S.G. Chain y M.G. Klotz. 2007. The impact of genome analyses on our understanding of ammonia-oxidizing bacteria. *Annu. Rev. Microbiol.* 61:503-528.
- Atta Aly, M.A., M.A. Saltveit y A.S. El Beltagy. 1998. Saline growing conditions induce ripening of a non-ripening mutants nor and rin tomato fruits but not of Nr fruit. *Postharvest Boil. Technol.* 13:225-234.
- Avrahami, S. y R. Conrad. 2003. Patterns of community change among ammonia oxidizers in meadow soils upon long-term incubation at different temperatures. *Appl. Environ. Microbiol.* 69:6152–6164.
- Barguil, B.M., F.M.P. Viana, R.M. Anjos y J.E. Cardoso. 2009. First report of dry rot caused by *Fusarium oxysporum* on rose (*Rosa* spp.) in Brazil. *Plant Dis.* 93(7):766-766.
- Baas, R. y D. Van den Berg. 1999. Sodium accumulation and nutrient discharge in recirculation systems: A case study with roses. *Acta Hortic.* 507:157-164.
- Blumwald, E., G.S. Aharon y M.P. Apse. 2000. Sodium transport in plant cells. *Biochim. Biophys. Acta.* 1465:140-151.
- Breś, W. 2009. Estimation of nutrient losses from open fertigation systems to soil during horticultural plant cultivation. *Pol. J. Environ.Stud.* 18(3):341-345.
- Ikeda,H., P. Koohakan, T. y T. Jaenaksorn. 2002. Problems and countermeasures in the re-use of the nutrient solution in soilless production. *Acta Hortic.* 578:213-219.
- Broadley, M., P. Brown, I. Cakmak, Z. Rengel y F. Zhao. 2012. Chapter 7 - Function of nutrients: micronutrients. pp. 191-248. En: Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3.a ed.), London: Academic Press. 651p. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8.

- Brun, R., A. Settembrino y C. Couve. 2001. Recycling of nutrient solutions for rose (*Rosa hybrida*) in soilless culture. *Acta Hort.* 554:183-192. DOI: 10.17660/ActaHortic.2001.554.19.
- Bugbee, B. 2004. Nutrient management in recirculating hydroponic culture. *Acta Hort.* 648:99-112.
- Cabrera, R.I., A.R. Solís-Pérez y W.J. Cuervo-Bejarano. 2017. Tolerancia y manejo de salinidad, pH y alcalinidad en el cultivo de flores. pp. 63-73. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Consideraciones sobre producción, manejo y poscosecha de flores de corte con énfasis en rosa y clavel. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. 212p.
- Cabrera, R.I. y P. Perdomo. 2003. Reassessing the salinity tolerance of greenhouse roses under soilless production conditions. *HortScience*. 38:533-536.
- Cabrera, R.I. 2002. Rose yield, dry matter partitioning and nutrient status responses to rootstock selection. *Sci. Hortic.* 95:75-83.
- Cabrera, R.I., A.R. Solís-Pérez y J.J. Sloan. 2009. Greenhouse rose yield and ion accumulation responses to salt stress as modulated by rootstock selection. *HortScience*. 44(7):2000-2008.
- Carrillo-López, L. M., L.I. Trejo-Téllez, G. Alcántar-González, L. Arévalo-Galarza, E.A. Gaytán-Acuña y F.C. Gómez-Merino. 2012. Nutrient solutions and traditional production system of *Chrysanthemum* on growth and nutrient concentration in leaves. *Acta Hort.* 947:283-290.
- Chabite, I.T., Z. Lei, Y. Ningning, F. Qiang y Y. Haiye. 2017. Mode of managing nutrient solution based on N use efficiency for lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J. Food Sci. Eng.* 7:29-37. DOI: 10.17265/2159-5828/2017.01.003.
- Cuervo B., W.J., V.J. Flórez R. y C.A. González M. 2012. Aspectos a tener en cuenta para optimizar un sistema de cultivo en sustrato con reciclaje de drenajes. *Agron. colomb.* 30(3):379-387. Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/29029/47048>; consulta: junio 2019.
- Cuervo B. W.J., V.J. Flórez R. y C.A. González M. 2011. Generalidades de la automatización y control para el reciclaje de drenajes en cultivos bajo cubierta. pp. 247-275. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. 294p.
- de Medinburu. 2019. R package version 1.3-1 Statistical Procedures for Agricultural Research (2019), pp. 1-86. Disponible en <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.

- De Kreij C., y T.H.J.M Van Den Berg. 1990. Nutrient uptake, production and quality of *Rosa hybrida* in rockwool as affected by electrical conductivity of the nutrient solution. pp. 519-523. En: van Beusichem, M.L. (eds). Plant Nutrition — Physiology and Applications. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 41. Dordrecht: Springer. 819p.
- European Commission. 2018. The EU Nitrates Directive. Disponible en [ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/nitrates.pdf](http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/nitrates.pdf).
- Farnham, D.S., R.F. Hasek, y J.L. Paul. 1985. Water Quality: Its Effects on Ornamental Plants. University of California Cooperative Extension Leaflet No. 2995. 15p.
- Fascella, G. 2015. Growing substrates alternative to peat for ornamental plants. pp. 47–67. En: Asaduzzaman, M. (ed.). Soilless culture—use of substrates for the production of quality horticultural crops. London: InTech. 164p.
- Florverde. 2018. Florverde standards for the sustainable production of flowers and ornamentals Version 7.1 October 2018. Bogotá, Colombia.
- Fujimoto, S.Y., M. Ohta, A. Usui, H. Shinshi y M. Ohme Takagi. 2000. Arabidopsis ethylene-responsive element binding factors act as transcriptional activators or repressors of GCC box-mediated gene expression. *Plant Cell* 12:393–404.
- Foxboro®. 2007. Sulfuric acid measurements. Disponible en <http://www.foxboro.com/NR/rdonlyres/84BD830F-DF72-4B63-A51B-0D39220C518B/0/SulfuricAcidMeas.pdf>.
- Garcés de Granada, E., M. Orozco de Amézquita, O.L. Calderón y G. Arbeláez. 1997. Respuesta de algunas variedades de clavel estándar a *Phialophora cinerescens*. *Agron. Colomb.* 14(2):149-153.
- Grunert, O., D. Reheul, M.C. Van Labeke, M. Perneel, E. Hernandez-Sanabria, S.E. Vlaeminck y N. Boon. 2016. Growing media constituents determine the microbial nitrogen conversions in organic growing media for horticulture. *Microbi. Biotechnol.* 9(3):389-399. DOI:10.1111/1751-7915.12354
- Gieling, Th.H., J. Bontsema, T.W.B.M. Bouwmansand y R.H. Steeghs. 1997. Modelling and simulation for control nutrient application in closed growing systems. *Neth. J. Agr. Sci.* 45(1):127-142.
- Nakamoto, N., N. Graham, M.R. Collins y R. Gimbel. (eds.). 2014. Recent progress in slow sand and alter-native biofiltration processes. London: IWA Publishing. 570p.

- Giuffrida, F., S. Argento, V. Lipari y L. Cherubino. 2003. Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation. *Acta Hort.* 614:799-803.
- Good, A.G y P.H. Beatty. 2011. Fertilizing nature: A tragedy of excess in the commons. *PLoS Biol.* 9(8): e1001124. DOI: 10.1371/journal.pbio.1001124.
- Gorbe, E. y A. Calatayud. 2010. Optimization of nutrition in soilless systems: A Review. *Ad. Bot. Res.* 53:193-245. DOI: 10.1016/S0065-2296(10)53006-4.
- Guzmán, D.A. 1996. Zonas de vida o formaciones vegetales. Área jurisdiccional CAR. CAR. Disponible en <http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33791/00011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Handreck, K. y N. Black. 1999. Growing media for ornamental plants and turf. UNSW, Sydney.
- Hettiarachchi, E., R. Perera, C. Perera y N. Kottegoda. 2015. Activated coconut coir for removal of sodium and magnesium ions from saline water. *Desalination Water Treat.* 57(47):22341-22352. DOI: 10.1080/19443994.2015.1129649.
- IFA (International Fertilizer Association). 2018. Databases of consumption. Disponible en <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>.
- Kämpf, A., C. For y C. Leonhardt. 2009. Lowering pH value with elemental sulfur in the substrate for ex vitro acclimatization. *Acta Hort.* 812: 415-420. DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.812.58.
- Khan M.N., M. Mobin, Z.K. Abbas y S.A. Alamri. 2018. Fertilizers and their contaminants in soils, surface and groundwater. vol. 5, pp. 225-240. En: DellaSala, D.A. y M.I. Goldstein (eds.) *The Encyclopedia of the Anthropocene*. Oxford: Elsevier. 275p.
- Kertesz, M.A. y P. Mirleau. 2004. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. *J. Exp. Bot.* 55(404):1939-1945. DOI:10.1093/jxb/erh176.
- Lee S. y J. Lee. 2015. Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: types and characteristics of hydroponic food production methods. *Sci. Hort.* 195:206-215. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.09.011.
- Lee, M. y M. van Iersel. 2008. Sodium chloride effects on growth, morphology, and physiology of chrysanthemum (*Chrysanthemum × morifolium*). *HortScience.* 43:1888-1891. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.6.1888.
- Li, J., Y. Ming y B. Li. 2007. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters. *Irrig. Sci.* 35:117:125.

- Lieth, J.H. y L.R. Oki. 2008. Irrigation in soilless production. pp: 117-156. In: Raviv, M. y J.H. Lieth (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice*. London: Elsevier. 587p.
- Londra, P.A., A.T. Paraskevopoulou y M. Psychogiou. 2018. Hydrological behavior of peat- and coir-based substrates and their effect on begonia growth. *Water*. 10(722):1-15. DOI: 10.3390/w10060722.
- Lorenzo, H., M.C. Cid, J.M. Siverio y M.C. Ruano. 2000. Effects of sodium on mineral nutrition in rose plants. *Ann. Appl. Biol.* 137:65-72. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2000.tb00058.x.
- Lucheta, A.R. y M.R. Lambais. 2012. Sulfur in agriculture. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 36(5): 1369-1379. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500001.
- Madrigal-Valverde, Á. y G. Garbanzo. 2018. Uso de residuos agroindustriales en previveros de palma aceitera (*Elaeis guineensis*, Arecaceae): crecimiento y absorción de nutrimentos. *UNED Research Journal*. 10(2):257-266. DOI: 10.22458/urj.v10i2.2157.
- Marfà, O. 2000. Chapter 2: La recirculación en los cultivos sin suelo. Elementos básicos. pp. 21-27. En: Marfà, O. (ed.). *Recirculación en cultivos sin suelo*. Compendios de horticultura. 2. a ed. Madrid: Ediciones de Horticultura. Reus. 269p.
- Marins-Peil, R., J. López Gálvez y A. Martins. 1998. Cultivo de pepino con técnica de solución nutritiva recirculante. p. 1. En: I congreso ibérico sobre gestión y planificación de aguas. Universidad de Zaragoza. Zaragoza, Spain.
- Massa, D., L. Incrocci, R. Maggini, C. Bibbiani, G. Carmassi, F. Malorgio y A. Pardossi. 2011. Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environ. Model. Softw.* 26:711-722. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.01.004.
- Massa, D., N. Mattson y H. Lieth. 2008. Effects of saline root environment (NaCl) on nitrate and potassium uptake kinetics for rose plants: A Michaelis-Menten modelling approach. *Plant Soil*. 318:101-115. DOI: 10.1007/s11104-008-9821-z.
- Mateo-Sagasta, J., S.M. Zadeh, H. Turrall y J. Burke. 2017. Water pollution from agriculture: a global review. Executive summary. Rome, Italy: FAO; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). 35p.
- Mazuela, P. 2005. Vegetable waste compost as substrate for melon. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:1557-1572. DOI: 10.1081/CSS-200059054.

- MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). 2019. Cifras del sector floricultor. Disponible en <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Para-la-celebraci%C3%B3n-del-San-Valent%C3%ADn-Colombia-exporta-35-mil-toneladas-de-flores.aspx?ID=2919>
- Niu, G. y D.S. Rodriguez. 2008. Responses of growth and on uptake of four rose rootstocks to chloride or sulfate-dominated salinity. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 133:663-669.
- Neto, A., S. Zolnier y D. Lopes. 2014. Development and evaluation of an automated system for fertigation control in soilless tomato production. *Comput. Electron. Agric.* 103:17–25. DOI: 10.1016/j.compag.2014.02.001.
- Nosir, W. 2014. New technique for rose production in soilless culture system and disease reduction. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 39(2): 181:188. DOI: 10.1080/01904167.2014.972415.
- IFA (International Fertilizer Association). 2018. Databases of consumption. Disponible en <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>.
- OECD (The observatory of economic complexity). 2020. Disponible en <https://oec.world/en/profile/hs92/0603/>.
- Okafor P, P. Okon, E. Daniel y E. Ebenso. 2012. Adsorption capacity of coconut (*Cocos nucifera* L.) shell for lead, copper, cadmium and arsenic from aqueous solutions. *Int. J. Electrochem. Sci.* 7:12354-12369.
- Papadopoulus, A.P., A. Ber-Tallieth, A. Silber, U.K. Saha y M. Raviv. 2008. Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes. pp: 117-156. En: Raviv, M. y J. H. Lieth (eds.). *Soilless culture: theory and practice*. London: Elsevier. 587p.
- Prenafeta-Boldú, F.X., I. Trillas, M. Viñas, M. Guivernau, R. Cáceres y O. Marfà. 2017. Effectiveness of a full-scale horizontal slow sand filter for controlling phytopathogens in recirculating hydroponics: From microbial isolation to full microbiome assessment. *Sci. Total Environ.* 599-600:780-788. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.221.
- Patiño, M. 2000. Cultivo de clavel sobre sustrato de cascarilla de arroz. pp. 41-43. En: Pizano de Marquez, M. (ed.). *El clavel*. Bogotá: Ediciones Hortitecnia. 181p.
- Putra, A. y H. Yuliando. 2015. Soilless culture system to support water use efficiency and product quality: a review. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 3. pp. 283– 288.
- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

- Ramos, J.H. 2010. Caso de estudio. Tramo desde la confluencia del río Neusa hasta la intersección vía Autopista Norte –Cajicá. Trabajo de grado. Universidad Militar Nueva Granada. Disponible en <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/493/RamosCastiblancoJesu2010.pdf;sequence=1>
- Riley, M.M. 1987. Boron toxicity in barley. *J. Plant Nutr.* 10:2109-2115.
- Sadasivaiah, S.P. y W.D. Holley. 1973. Ion balance in nutrition of greenhouse roses. *Roses Inc. Bull.* (November), 1–27.
- Rodríguez, M. y V. Flórez. 2012. Changes in EC, pH and in the concentrations of nitrate, ammonium, sodium and chlorine in the drainage solution of a crop of roses on substrates with drainage recycling. *Agron. colomb.* 30(2):266-273.
- Romero, R., J.L. Muriel, I. García-Tejero y D. Muñoz-De la Peña. 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. *Agric Water Manag.* 114:59-66. 1. DOI: 0.1016/j.agwat.2012.06.026.
- Rouphael, Y. y M. Cardarelli, P. Bonini y G. Colla. 2017. Synergistic action of a microbial-based biostimulant and a plant derived-protein hydrolysate enhances lettuce tolerance to alkalinity and salinity. *Front. Plant Sci.* 8: 131. DOI: 10.3389/fpls.2017.00131.
- Rouphael, Y., M. Cardarelli, L. Lucini, E. Rea y G. Colla. 2012. Nutrient solution concentration affects growth, mineral composition, phenolic acids, and flavonoids in leaves of artichoke and cardoon. *HortScience.* 47:1424-1429. DOI: 10.21273/HORTSCI.47.10.1424.
- Roig, A., M.L. Cayuela y M.A. Sánchez-Monedero. 2004. The use of elemental sulphur as organic alternative to control pH during composting of olive mill wastes. *Chemosphere.* 57:1099-1105.
- Sambo, P., C. Nicoletto, A. Giro, Y. Pii, F. Valentinuzzi, T. Mimmo y S. Cesco, S. 2019. Hydroponic solutions for soilless production systems: issues and opportunities in a smart agriculture perspective. *Front. Plant Sci.* 10:923. DOI: 10.3389/fpls.2019.00923.
- Sar, D.M., P. Visser y J. Vos. 2014. Nutrient uptake of four cut rose varieties. *Acta Hort.* 1034:559-566. DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1034.71.
- Savci, S. 2012. An agricultural pollutant: Chemical Fertilizer. *Int. J. Environ. Sci. Dev.* 3(1):73-80. DOI: 10.18178/IJESD.
- Silberbush, M. y J. Ben-Asher. 1989. The effect of NaCl concentration on  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  and orthophosphate-P influx to peanut roots. *Sci. Hortic.* 39:279-287. DOI: 10.1016/0304-4238(89)90121-0.

- Solís-Pérez, A.R. y R.I. Cabrera. 2007. Evaluating counter-ion effects on greenhouse roses subjected to moderately-high salinity. *Acta Hortic.* 751:375-380.
- Song, C., W. S. Wu, M. Cheng, P. Tao, M. Shao y G. Gao. 2013. Adsorption studies of coconut shell carbons prepared by KOH activation for removal of lead (II) from aqueous solutions. *Sustainability.* 6:86-98. DOI: 10.3390/su6010086.
- Sonneveld, C. y A.L. van den Bos. 1995. Effects of nutrient levels on growth and quality of radish (*Raphanus sativus* L.) grown on different substrates. *J. Plant Nutr.* 18(3):501-513. DOI: 10.1080/01904169509364918.
- Sonneveld, C., R. Bass, H.M.C. Nijssen y J. De Hoog. 1999. Salt tolerance of flower crops grown in soilless culture. *J. Plant Nutr.* 22(6):1033-1048.
- Sonneveld, C. 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Thesis. University of Wageningen. Wageningen.
- Sonneveld, C. 2002. Composition of nutrient solutions. pp. 179 - 210. En: Savvas, D. y H. Passam (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals.* Athens: Embryo Publications. 463p.
- Stanghellini, C. y F.L.K. Kempkes. 2004. A blueprint for optimal management of multiple-quality water-resources. En: EU-Hortimed, ICA3-1999-0009: Deliverable 8. Disponible en [http://www.aua.gr/ns/project/hortimed/Deliverable\\_8.pdf](http://www.aua.gr/ns/project/hortimed/Deliverable_8.pdf); consultado: enero 2010.
- Tajudeen A. L. y O.S. Taiwo. 2018. Soilless farming – a key player in the realisation of “zero hunger” of the sustainable development goals in Nigeria. *Int. J. Ecol. Sci. Environ. Eng.* 5: 1–7.
- Tourna, M., P. Maclean, L. Condrón, M. O'Callaghan y S.A. Wakelin. 2014. Links between sulphur oxidation and sulphur-oxidising bacteria abundance and diversity in soil microcosms based on soxB functional gene analysis. *FEMS Microbiol. Ecol.* 88(3):538–549, DOI: 10.1111/1574-6941.12323.
- Udayana, S.K., A. Naorem, y N.A. Singh, 2017. The multipurpose utilization of coconut by-products in agriculture: prospects and concerns. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 6(6):1408-1415. DOI: 10.20546/ijcmas.2017.606.165.
- van Os, E.A. 1999. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. *Water Sci. Technol.* 39(5):105-112.
- van Os, E.A., Th. H. Gieling y J. H. Lieth. 2019. Technical equipment in soilless production systems. pp. 624-625. En: Raviv, M., J.H. Lieth y A. Bar-Tal (eds). *Soilless Culture: Theory and Practice.* 2nd edition. London: Academic Press. 712 p.

- Vélez C., N.A., V.J. Flórez R. y S.E. Melo M. 2012. Comportamiento de NPK en un sistema de cultivo sin suelo para clavel estándar cv. Delphi con recirculación de drenajes en la Sabana de Bogotá. 7º Encontro Brasileiro de Hidroponia. Florianópolis, Brasil.
- Xiong, J., T. Yongqiang, W. Jingguo, L. Wei y C. Qing. 2017. Comparison of coconut coir, rockwool, and peat cultivations for tomato production: nutrient balance, plant growth and fruit quality. *Front. Plant Sci.* 8:1327. DOI: 10.3389/fpls.2017.01327.
- Yahya, A., S. Anieza, B. Rosli y L. Ahmad. 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.* 4:63-71.