

**USO DE COMPOST Y ARENA VOLCANICA COMO SUSTRATOS  
EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO ABIERTO PARA CULTIVO  
PROTEGIDO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill)**

**PAULINA QUESADA BOLAÑOS**

Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Agronomía  
como requisito parcial para optar al grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

**TECNOLOGICO DE COSTA RICA**

**SEDE REGIONAL SAN CARLOS**

**2011**

**USO DE COMPOST Y ARENA ROJA VOLCANICA COMO  
SISTRATOS EN UN SISTEMA HIDROPÓNICO ABIERTO EN EL  
CULTIVO PROTEGIDO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum*  
Mill)**

**PAULINA QUESADA BOLAÑOS**

**Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:**

Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph.D.

\_\_\_\_\_

Asesor

Ing. Agr. Parménides Furcal Beriguete, M. Sc.

\_\_\_\_\_

Jurado

Ing. Agr. Arnoldo Gadea Rivas, M. Sc.

\_\_\_\_\_

Jurado

Ing. Agr. Fernando Gómez, MAE

\_\_\_\_\_

Coordinador

Trabajos Finales de Graduación

Ing. Agr. Luis Alberto Camero Rey, M. Sc.

\_\_\_\_\_

Director

Escuela de Agronomía

## Tabla de contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. Hipótesis .....	2
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Cultivos protegidos .....	3
2.2. Sistema hidropónico como parte de la horticultura protegida .....	3
2.3. Sustratos para hidroponía.....	4
2.3.1 Características de un sustrato ideal .....	5
2.3.2 Propiedades físicas .....	6
2.3.3 Propiedades químicas .....	8
2.3.4 Propiedades biológicas. ....	9
2.3.5 Sustratos orgánicos.....	10
2.3.5.1. Compost.....	11
2.4. Cultivo protegido del tomate ( <i>Lycopersicon esculentum</i> ).....	13
2.4.1 Requerimientos ambientales del cultivo .....	14
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
3.1. Ubicación y periodo del estudio. ....	16
3.2. Descripción del invernadero.....	16
3.3. Descripción del experimento.....	17
3.4. Descripción y distribución de los tratamientos .....	17
3.5. Solución nutritiva.....	19
3.6. Material experimental.....	21
3.7. Descripción de la unidad experimental .....	21
3.8. Composición y acondicionamiento del sustrato .....	21
3.9. Manejo del cultivo .....	22
3.9.1 Trasplante y manejo general del cultivo .....	22
3.9.2 Suministro de riego y solución nutritiva .....	23
3.9.3 Manejo fitosanitario del cultivo.....	25

3.10.	Variables evaluadas durante el estudio .....	25
3.11.	Caracterización de los sustratos en laboratorio .....	26
3.11.1	Evaluación de propiedades físicas .....	26
3.11.1.1.	Retención de humedad y porosidad.....	26
3.11.2	Análisis químico.....	27
3.11.3	Análisis microbiológico .....	28
3.12.	Variables evaluadas.....	28
3.12.1	Variables asociadas a los tratamientos .....	28
3.12.2	Variables ambientales .....	32
3.13.	Diseño experimental .....	32
3.14.	Análisis estadístico.....	32
3.15.	Modelo estadístico .....	33
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>34</b>
4.1.	Caracterización de los sustratos utilizados .....	34
4.1.1	Propiedades físicas de los sustratos .....	34
4.1.2	Propiedades químicas de los sustratos .....	37
4.1.3	Propiedades microbiológicas de los sustratos.....	39
4.1.4	Análisis de las variables asociadas a los tratamientos .....	40
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>64</b>
<b>8.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>69</b>

## Lista de Cuadros

Cuadro	Título	Página
1	Producción comercial de tomate comparando dos sustratos orgánicos.....	13
2	Descripción de los tratamientos utilizados en un ensayo para el cultivo de tomate en un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos.....	18
3	Equivalentes de los iones para la solución hidropónica a una CE de 2 y 2,2 mS/cm.....	19
4	Cuadro de doble entrada de cationes y aniones para el diseño de la solución nutritiva a una conductividad eléctrica de 2 mS/cm.....	19
5	Cuadro de doble entrada de cationes y aniones para el diseño de la solución nutritiva a una conductividad de 2,2 mS/cm.....	20
6	Fertilizantes utilizados en la solución nutritiva para 1000 litros de agua con una CE 2 y 2,2 mS/cm.....	20
7	Fuentes y cantidades de los Micronutrientes utilizados en la solución nutritiva para un tanque de 1000 litros de agua a una CE de 2 mS/cm.....	21
8	Frecuencia y duración de los riegos efectuados durante el ciclo del cultivo de tomate en un sistema hidropónico	

	abierto en la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	24
9	Variables de respuesta asociadas al cultivo de tomate y a los sustratos, evaluadas en invernadero y laboratorio, Sede Regional, San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	29
10	Propiedades físicas de los sustratos, rangos óptimos y resultados obtenidos en dos sustratos empleados en el cultivo de tomate bajo un sistema de cultivo protegido.....	34
11	Análisis químico de dos sustratos utilizados en el cultivo de tomate.....	37
12	Niveles óptimos y excesivos de los elementos en sustratos utilizados en la producción del cultivo de tomate.....	38
13	Análisis microbiológico de los sustratos arena roja y compost, expresado en unidades formadoras de colonias por gramo (UFC/g).....	39
14	Estadísticas univariadas para veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos.....	41
15	Correlaciones ordenadas por significancia entre veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San	

Carlos.....	42
16 Proporción de la varianza contenida en diecinueve componentes principales para veintitrés variables de respuesta, medidas en plantas de tomate en un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela.....	50
17 Eigen-vectors para cada una de las variables de respuesta en tres componentes principales.....	51
18 Variables representativas de tres componentes principales, en un ensayo para el cultivo de tomate, San Carlos, Alajuela.....	52
19 Significancia estadística para cada una de las variables relevantes en los tres componentes principales según el análisis de varianza ( $p=0,05$ ).....	55

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1	Invernadero de horticultura ubicado en la finca La Esmeralda, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Alajuela.....	17
2	Distribución aleatorizada de las unidades experimentales en un ensayo de tomate en invernadero, Santa Clara, San Carlos.....	18
3	Inoculación de plántulas de tomate con <i>Trichoderma</i> sp antes del trasplante en un invernadero, Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	22
4	Sistema de tutorado para el sostén de las plantas.....	23
5	Recipientes contenedores de las soluciones suministradas a las plantas de tomate mediante el sistema de riego por goteo en un sistema hidropónico abierto, Sede Regional San Carlos del Instituto tecnológico de Costa Rica.....	24
6	Materiales y método para la medición de las propiedades físicas de los sustratos utilizados en el ensayo de tomate en un sistema hidropónico abierto.....	27
7	Curva de retención de humedad para la arena roja volcánica y el compost utilizados como sustrato en el cultivo de tomate en invernadero, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	36
8	Conglomerado de correlaciones para veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate en un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	48



9	Regresiones lineales para las variables que presentaron significancia estadística en el componente principal uno contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	56
10	Regresiones lineales para las variables que presentaron significancia estadística en el segundo componente principal contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	57
11	Regresión lineal para la variable conductividad eléctrica tres la cual mostró significancia estadística en el tercer componente principal contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica.....	58
12	Temperaturas registradas semanalmente para los sustratos utilizados, con un suministro de la solución nutritiva al100%, durante el ciclo del cultivo de tomate.....	59
13	Temperaturas máximas y mínimas obtenidas dentro del invernadero donde se desarrolló el experimento y rango óptimo de temperaturas para el cultivo del tomate según Castellanos (2009).....	60

## Lista de anexos

Anexo	Título	Página
1	Análisis químico del compost, efectuado bajo la técnica de pasta saturada.....	70
2	Análisis químico de la arena roja, efectuado bajo la técnica de pasta saturada.....	70
3	pH metro y conductímetro utilizados para la medición de pH y conductividad eléctrica de los sustratos.....	71
4	Análisis de varianza para la variable peso seco de frutos por planta en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).	71
5	Análisis de varianza para la variable número de frutos por planta en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	71
6	Análisis de varianza para la variable número de frutos de segunda calidad en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	72
7	Análisis de varianza para la variable peso total de frutos en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	72
8	Análisis de varianza para la variable peso seco total en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	72
9	Análisis de varianza para la variable peso seco hojas en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	72
10	Análisis de varianza para la variable peso seco tallos en el	73

	cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	
11	Análisis de varianza para la variable número de frutos de primera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	73
12	Análisis de varianza para la variable número de frutos de tercera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	73
13	Análisis de varianza para la variable peso de frutos de primera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	73
14	Análisis de varianza para la variable peso de frutos de tercera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	74
15	Análisis de varianza para la variable CE 3 en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	74
16	Análisis de varianza para la variable peso seco de raíz en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).....	74
17	Contrastes ortogonales para la variable peso fresco de frutos de segunda calidad.....	74
18	Contrastes ortogonales para la variable número de frutos por planta.....	75
19	Contrastes ortogonales para la variable peso seco de frutos por planta.....	76
20	Contrastes ortogonales para la variable peso total de fruto.....	76
21	Contrastes ortogonales para la variable peso seco de	

	tallo.....	77
22	Contrastes ortogonales para la variable peso seco de hojas.....	77
23	Contrastes ortogonales para la variable peso seco total.....	78
24	Contrastes ortogonales para la variable número de frutos de tercera.....	78
25	Contrastes ortogonales para la variable número de frutos de primera.....	79
26	Contrastes ortogonales para la variable peso de frutos de primera.....	80
27	Contrastes ortogonales para la variable peso de frutos de tercera.....	80
28	Contrastes ortogonales para la variable conductividad eléctrica tres.....	81
29	Contrastes ortogonales para la variable peso seco de raíz.....	81
30	Vectores para las viables de respuesta y las variables independientes.....	82
31	“Loadins” o “factores de carga” para las 23 variables para los componentes 1 y 2.....	82

## RESUMEN

En un invernadero del ITCR se llevó a cabo un ensayo con plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) bajo un sistema hidropónico abierto, donde se suministraron diferentes dosis de solución nutritiva, 0%, 33%, 66% y 100%, utilizando un tipo de compost como sustrato, así como un sustrato inerte, arena roja con un 100% de la solución, este último tratamiento como testigo relativo. Con el objetivo de determinar el efecto del uso de un compost y arena roja volcánica como sustratos, se midieron variables asociadas al cultivo y al sustrato. Para el análisis de los datos se efectuó un diseño estadístico completamente al azar, con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. En el análisis de componentes principales se encontró que los primeros tres componentes abarcan un 73,65% de la varianza total. En el primer componente las variables que incluyeron la mayor variabilidad fueron, (NF/PL), (NF 2da), (PSF/PL), y (PTF), explicando la producción en términos de peso y número de frutos. El segundo componente agrupó las variables (PST), (PS Hojas), (PS Tallo), (NF 1era), (NF 3era), (PF 1era) y (PF 3era), este componente tuvo un significado mixto, explicando el aumento en producción en términos del crecimiento vegetativo. En el componente principal tres, las variables más importantes fueron el (PS Raíz) y la conductividad eléctrica de los sustratos al final del ciclo del cultivo (CE 3), este componente se expresó en términos del acúmulo de biomasa radical y su relación con la conductividad eléctrica de los sustratos al final del ciclo del cultivo. De estas variables las que mostraron significancia estadística fueron PSF/PL, NF/PL, NF 2da, PTF, PS Hojas, PST, NF 3era, PF e3ra y CE 3. El análisis de regresión lineal se demostró que hay una tendencia lineal creciente entre los tratamientos y las variables, sin embargo, no existe un comportamiento claro de las variables de respuesta respecto a los niveles. Los contrastes ortogonales efectuados para comparar el efecto de la arena volcánica y el compost no mostraron diferencias significativas entre ambos tratamientos.

**Palabras clave:** Compost, Arena volcánica, Solución nutritiva, Tomate.

## ABSTRACT

In a greenhouse of ITCR, was developed an experiment with tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill) under open hydroponic system, where different doses were supplied nutrient solution, 0%, 33%, 66% and 100%, using a type of compost as a substrate and an inert substrate, volcanic sand with a 100% solution, the latter as a control relative treatment. With the objective to determine the effect of using compost and volcanic red sand as substrates were measured variables associated to the substrate and the crop. A completely randomized experimental design was used for data analysis, with five treatments and four repetitions.

In the principal component analysis was found that the first three components included a 73.65% of the total variance. In the first component variables with greater variability were (NF/PL), (NF 2da), (PSF/PL), and (PTF), explaining the production in terms of weight and number of fruits. The second component grouped the variables (PST), (PS Hojas), (PS Tallo), (NF 1era) (NF era) (PF 1era) and (PF 3era), this component had a mixed meaning, explaining the increase in production in terms of vegetative growth. In the principal component three, the most important variables were the (PS Raíz) and electrical conductivity of the substrate at the end of the crop cycle (EC 3), this component is expressed in terms of accumulation of root biomass and its relationship with the electrical conductivity of the substrate at the end of the crop cycle. Of these variables, which showed statistical significance were PSF/PL, NF/PL, NF 2da, PTF, PS Hojas, PST, NF 3era, PF 3era and CE 3. The linear regression analysis showed that there is an increasing linear tendency between treatments and variables; however, there are no clear behavior response variables from the levels. Orthogonal contrasts performed to compare the effect of volcanic sand and compost showed no significant differences between treatments.

Keywords: Compost, Sand volcanic, nutrient solution, tomato.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de sistemas de cultivo protegido permite modificar el clima y el suelo para proporcionarle a la planta las condiciones más apropiadas para su desarrollo. Algunos beneficios que se obtienen empleando este tipo de sistema productivo son; el incremento en productividad y sanidad en los productos obtenidos, la producción en regiones no tradicionales para un determinado cultivo, la obtención de alimentos en áreas reducidas, entre otros, así como competir en un mercado cada vez más exigente en cuanto a calidad y cantidad (Castilla 2004).

Los sistemas de cultivo protegido requieren de soluciones hidropónicas para aportar a la planta los nutrientes que necesita, para ello se emplean fuentes fertilizantes importadas, lo cual encarece la actividad. Como resultado de esto surge la necesidad de buscar alternativas para minimizar este rubro en los costos de producción (Cámara de Insumos Agropecuarios 2011).

Por lo general los sustratos empleados en hidroponía son inertes, sin embargo, un compost puede ser utilizado como sustrato pero con aporte nutricional, de esta manera se hace posible disminuir el uso de fertilizantes sintéticos como vía única de nutrición para las plantas, a la vez que se minimiza la contaminación que generan los desechos de las actividades agrícolas.

Con este estudio se pretende evaluar un tipo de compost y arena volcánica como sustratos en un sistema hidropónico abierto y su efecto en crecimiento y productividad del cultivo protegido de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill).

### **1.1. Objetivo general**

- Determinar el efecto del uso de compost y arena volcánica como sustratos en un sistema hidropónico abierto para el cultivo protegido de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill).

### **1.2. Objetivos específicos**

- Evaluar la producción del cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), a diferentes dosis de solución nutritiva completa, utilizando compost y arena volcánica como sustratos en un sistema hidropónico abierto.
- Cuantificar el crecimiento del cultivo de tomate a diferentes dosis de solución nutritiva completa, utilizando compost y arena roja volcánica como sustratos en un sistema hidropónico abierto.
- Medir el pH y CE de un compost utilizado como sustrato, sometido a diferentes dosis de solución nutritiva completa y arena volcánica, durante un ciclo de cultivo de tomate en un sistema hidropónico abierto.

### **1.3. Hipótesis**

- Usando un compost como sustrato de cultivo y suministrando una dosis de solución nutritiva al 66,6%, es posible obtener una producción similar a la alcanzada con arena roja volcánica aplicando el 100% de la solución.
- El tratamiento de arena roja con una dosis de solución nutritiva al 100% dará un mejor resultado en cuanto a producción y calidad de fruto que el tratamiento de compost con la misma dosis de solución nutritiva.



## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Cultivos protegidos**

Según Resh (2001), para que la producción de los cultivos hortícolas sea rentable es necesario que estos den origen a cosechas elevadas, de calidad, libres de plagas y enfermedades, donde se utilice la menor cantidad de mano de obra posible y exista una mayor eficiencia en el uso de recursos e insumos; por estas razones se ha empleado la forma de cultivo protegido donde en pequeñas extensiones de terreno y con poca disponibilidad de agua se logran producciones excelentes.

La producción en invernaderos es una de las formas de proteger los cultivos. Los invernaderos son edificaciones que tienen diversos objetivos, entre ellos destacan; la modificación del entorno natural por medio de diferentes técnicas, con lo cual se pretende proteger el cultivo de las necesidades de agua, del efecto del viento, de las variaciones de temperatura y humedad, de las plagas, malezas y enfermedades, así como mejorar las condiciones de luz, nutrición, espacio, aireación, todo ello para alcanzar una alta productividad (Castilla 2004).

Núñez citado por Santiago *et al* (1998) destaca las principales ventajas que se obtienen con el uso de invernaderos; se tienen cosechas precoces, aumentan los rendimientos, permite la posibilidad de obtener cosechas fuera de época, se obtienen frutos de mayor calidad, se ahorra agua, existe un mejor control de plagas y enfermedades, siembra de variedades selectas con rendimientos máximos y se tiene la posibilidad de obtener dos o tres cosechas al año.

### **2.2. Sistema hidropónico como parte de la horticultura protegida**

La técnica hidropónica pretende proveer a las plantas las condiciones óptimas para que se manifieste al máximo su potencial genético y es considerada un

sistema de producción agrícola que presenta un gran número de ventajas técnicas y económicas; como mantener un balance ideal entre el agua, el aire y los nutrientes, un buen drenaje según el manejo de los sustratos, una mayor densidad de población, la humedad puede ser siempre uniforme y controlada, es posible corregir rápidamente la deficiencia o exceso de un nutrimento, puede haber un buen control del pH, una reducción en los costos de producción, alta calidad y mayor precocidad del producto, menor dependencia de las condiciones ambientales, se obtienen varias cosechas al año, menor contaminación, entre otras (Escalante y Sánchez 1988).

En cuanto a la estructura del sistema hidropónico, este consta de cinco componentes; plantas, solución nutritiva, contenedores, sustrato, sistema de riego y drenaje, con dos métodos principales; sistemas en sustrato o agregado y sistemas en agua (Alpízar 2008).

Los sistemas hidropónicos pueden ser abiertos o cerrados, se clasifican de esta manera de acuerdo al destino de la solución nutritiva, es decir, si esta última se drena al suelo del invernadero se habla de un sistema abierto, mientras que donde existe circulación de la solución el sistema es cerrado. Actualmente por las regulaciones concernientes a la contaminación del suelo los sistemas tienden a ser cada vez más de tipo cerrado. Este último aunque resulta menos contaminante requiere de una fuente de agua más pura que uno de tipo abierto, en el las impurezas no se eliminan sino que se acumulan. Asimismo, la pureza de los químicos que se emplean en la solución es muy importante (Urrestarazu 2003).

### **2.3. Sustratos para hidroponía**

Calderón y Cevallos (2001) define el sustrato de cultivo en un medio sólido el cual tiene una doble función; la primera, anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles la respiración y la segunda, contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan.

El sustrato debe presentar un balance adecuado entre sus fases, se espera que tengan un 30% de estado sólido, 30% de estado gaseoso y 40% de estado líquido, en relación al volumen total (Barquero 2003).

### **2.3.1 Características de un sustrato ideal**

Los sustratos hidropónicos para ser ideales requieren cumplir con determinadas características, Martínez, citado por Gil *et al.* (2000) menciona que los sustratos deben permitir un adecuado desarrollo radicular, por lo cual se necesita que posean buena textura, aireación y retención de humedad, una densidad adecuada, baja o nula capacidad de intercambio catiónico, alta capacidad amortiguadora, baja en sales solubles, libre de plagas y enfermedades y sustancias tóxicas, entre otras. Se debe tener en cuenta que un sustrato cualquiera que sea no posee todas estas características ideales, pero al momento de elegir uno, debe cumplir con algunas de ellas, además de ser abundante en la región y de bajo costo.

Existe una amplia variedad de materiales para emplearse como sustrato en cultivos hidropónicos. Su aprovechamiento y manejo requiere un buen conocimiento de las propiedades y características físicas y químicas de los mismos. A partir de ellos es posible saber el tipo de tratamiento que requiere cada material, las aplicaciones más apropiadas y las técnicas de manejo pertinentes para cada caso (Martínez y Cadahía citado por García 2008).

Mora (1999) clasifica los sustratos para la producción hidropónica en tres grupos según su origen; inorgánicos, orgánicos y sintéticos. En cuanto a la utilización de los mismos se recomienda conocer su procedencia, además se dice que todo sustrato inorgánico debe ser lavado o tratado previamente para garantizar la eliminación de impurezas que alteren el sistema de cultivo, en el caso de los sustratos orgánicos, estos se deben desinfectar para la eliminación de residuos que puedan ser tóxicos o llevar restos de microorganismos patógenos que afecten el cultivo.

Poincelot (2004) cita algunos materiales que se emplean como medios de cultivo, inorgánicos como son la perlita, piedra pómez, lana de roca, arena, vermiculita, que cuentan con gran estabilidad; así como materiales orgánicos tales como la corteza, aserrín, el compost de plantas o estiércoles, peat moss, sphagnum, entre otros.

### **2.3.2 Propiedades físicas**

Según Florian (1997), las propiedades físicas, son las que describen el comportamiento del sustrato en relación con su porosidad, con las que se determinan las fracciones sólida, líquida y gaseosa del mismo que corresponde a las cantidades de aire y agua que estarán disponibles para la planta, que favorecerán la respiración radicular así como los demás procesos involucrados con ellas.

La densidad real de un sustrato se refiere a la densidad del material sólido que lo compone, mientras que la densidad que se calcula tomando en consideración el espacio total ocupado por los componentes sólidos más el espacio poroso, se denomina densidad aparente. El valor de la densidad real varía de acuerdo a la materia de que se trate y se encuentra alrededor de 2,5-3 para la mayoría de origen mineral. En cuanto a la densidad aparente, esta indica indirectamente la porosidad del sustrato, sus valores se prefieren bajos (0,7-01), debido a que esto facilita su manejo y mejora la capacidad operacional del sustrato disminuyendo costos de manipulación y transporte (Barbado 2005).

La porosidad es el volumen del medio que se encuentra libre de partículas sólidas, por tanto está ocupado por partículas líquidas y gaseosas en determinadas proporciones (Florian 1997). Calderón y Cevallos (2001) reporta que los mejores resultados se han obtenido en sustratos que permiten la presencia de un 15 a 35% de aire y de 20 a 60% de agua en relación con el volumen total.

En un sustrato el espacio poroso se divide según el tamaño de los poros en macroporos (mayor a 200 $\mu\text{m}$ ), mesoporos (200-30 $\mu\text{m}$ ) y microporos (menor a 30 $\mu\text{m}$ ). La circulación del agua gravitacional se da básicamente por los macroporos y en menor medida por los mesoporos (Calderón y Cevallos 2001).

Abad citado por Nuez (1995) señala que una alta porosidad no indica por sí misma una buena estructura del suelo, sino que se debe conocer la relación entre la fracción de la porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación.

Los sustratos están conformados por partículas de distintos tamaños. Las propiedades físicas de un sustrato varían en función de la distribución porcentual de las partículas según su rango de tamaño. Por su parte, para la definición de la textura de los suelos existe una normativa sobre los tamaños de las partículas, para los sustratos no están concretados estos rangos y por lo cual resulta complicado establecer comparaciones entre ellos (Martínez y García citado por Morán 2002).

La retención de humedad de un sustrato está en función de la granulometría y porosidad de sus partículas y determina la disponibilidad de agua para la planta como vehículo en sus funciones metabólicas, para caracterizar la retención de humedad se emplean algunas definiciones como lo son el agua extra fácilmente disponible (AEFD); esta es el agua que retiene un sustrato a una tensión comprendida entre 0 y 10cm de columna de agua, el agua fácilmente disponible (AFD); es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua, dejado drenar a 10cm de tensión matricial y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50cm de columna de agua, el agua de reserva; es la cantidad de agua (% en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100cm de columna de agua, el agua total disponible; la cual se define como la suma del agua fácilmente disponible más el agua de reserva. Su valor óptimo varía entre el 24% y el 40% del volumen del sustrato y el agua difícilmente disponible; es el volumen de agua retenida por el sustrato a una

tensión mayor de 100cm de columna de agua. Ésta puede ser utilizada por la planta en condiciones de estrés hídrico únicamente (Calderón y Ceballos 2001).

### **2.3.3 Propiedades químicas**

La reactividad química de un sustrato es definida por Barbado (2005) como la transferencia de material entre el sustrato y la solución nutritiva que alimenta las plantas a través de sus raíces.

En el cultivo hidropónico los materiales a utilizar como sustrato se prefieren inertes químicamente de modo que la solución nutritiva no será alterada por él. En el caso que el sustrato no sea inerte puede ocurrir una transferencia recíproca entre éste y la solución nutritiva, lo cual puede ser debida a reacciones de distinta naturaleza (Florian 1997).

El pH ejerce efecto sobre la forma en que la planta asimila los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. La mayoría de nutrientes mantienen su máximo nivel de asimilación con pHs de 5,0 a 6,5, siendo el nivel óptimo en el cultivo sin suelo de hortalizas de 5,5 y 6,8 (Urrestarazu 2003). Castellanos (2009) define la conductividad eléctrica como la concentración de sales que se encuentran en el sustrato. Según Burgueño (1996), los elementos minerales aportados mediante la fertilización se solubilizan en parte en el agua del suelo o sustrato, por tanto entre más elevada es la concentración de sales en una solución, la corriente eléctrica pasa más fácilmente, es decir la resistividad es mínima, por tanto si se mide la resistividad del extracto acuoso de un suelo o sustrato es posible conocer su conductividad eléctrica, la cual se puede expresar en dS/m.

Según Bunt, Lemaire *et al.*, citado por Nuez (1995) el incremento en la salinidad del sustrato después que este se ha colocado en el contenedor se puede deber a varias causas; la presencia de fertilizantes insolubles como los de liberación lenta

en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas, cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas o las pérdidas por lixiviación y cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico al mismo tiempo que se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.

En el cultivo de tomate sin suelo, el nivel óptimo de la conductividad determinada en la disolución del sustrato oscila entre 3 y 5 dS/m (Escudero, citado por Nuez 1995).

#### **2.3.4 Propiedades biológicas.**

Estas propiedades evalúan la estabilidad biológica del material a utilizar como sustrato, así como la liberación de elementos o sustancias que pudieran ser tóxicas o benéficas para el cultivo (Lemaire *et al* citado por Castellanos 2009).

Según Imas *et al*, citado por Palma (2005) la actividad biológica está restringida a los sustratos orgánicos y se descartan aquellos cuyo proceso degradativo sea demasiado rápido. De esta manera, las propiedades biológicas de un sustrato se concretan en tres aspectos; el primero es la velocidad de descomposición, que está en función de la población microbiana y de las condiciones ambientales en las que se encuentre el sustrato, esta puede provocar deficiencias de oxígeno, de nitrógeno y liberación de sustancias; el segundo resultan ser los efectos de los productos de descomposición, donde muchas de las propiedades de los sustratos orgánicos se atribuyen a los ácidos húmicos y fúlvicos, ambos son productos finales de la degradación biológica de la lignina y hemicelulosa. Y el tercer aspecto lo constituye la actividad reguladora del crecimiento, se conoce la existencia de actividad auxínica en los extractos de muchos materiales orgánicos utilizados en los medios de cultivo.

Campos 2009, realizó análisis microbiológico para la arena roja y no encontró presencia de actinomicetes pero sí de *Trichoderma* sp en una concentración

menor de  $10^3$ , según Obregón citado por Campos (2009) esta es una baja concentración.

### **2.3.5 Sustratos orgánicos**

Los sustratos orgánicos pueden inducir la liberación de amoníaco o de sustancias fitotóxicas o estimulantes, por lo cual, se debe evitar el uso de sustratos orgánicos con alta biodegradabilidad (Castilla 2005).

Según Barbado (2005) los sustratos producidos a base de materiales orgánicos se clasifican de tres maneras según el origen de los materiales que lo conforman, estas son: de origen natural, se caracterizan por estar sujetos a descomposición biológica, por ejemplo las turbas; de síntesis, son polímeros orgánicos no biodegradables, obtenidos mediante síntesis química (espuma de poliuretano, poliestireno expandido, etc.) y subproductos o residuos de diferentes actividades agrícolas, industriales y urbanas. La mayoría de estos materiales deben experimentar un proceso de compostaje, para su adecuación y estabilización como sustratos (cascarillas de arroz, pajas de cereales, broza de café, fibra de coco, cortezas de árboles, aserrín, residuos sólidos urbanos, lodos de depuración de aguas residuales, estiércol animal, etc.).

La actividad agrícola e industrial genera abundantes residuos y subproductos, de naturaleza orgánica. Estos materiales pueden ser empleados en horticultura como sustratos de cultivo, resultando ser muy efectivos según Pudelski, citado por Nuez (1995) porque contribuyen a reducir el impacto ambiental que ocasiona el efecto de muchos de estos materiales, además porque permiten el reciclado y la recuperación de la materia orgánica y elementos fertilizantes que se puedan encontrar en estos residuos.

El tomate desde hace varios años se ha puesto en práctica el uso de diversos materiales orgánicos residuales, frescos o compostados en forma pura o en



mezcla, tal es el caso de las pajas de cereales, estiércoles, compost de residuos de otros cultivos, entre otros (Nuez 1995).

#### **2.3.5.1. Compost**

El compostaje es un proceso bio-oxidativo controlado, que se desarrolla sobre sustratos orgánicos en condiciones de humedad adecuadas, por la acción de diversos microorganismos. A partir de este proceso se obtiene el compost, conformado por materia orgánica estabilizada, inocua y sustancias fitotóxicas, este material terminado puede ser utilizado para fines hortícolas sin efectos negativos sobre la planta (Abad *et al*, citado por Urrestarazu *et al* 2004).

Epstein y Poincelot, citados por Stoffela y Kahn (2004) describen el compostaje como un proceso biológico mediante el cual los microorganismos convierten materiales orgánicos en compost. Es predominantemente un proceso aeróbico, debido a que los microorganismos que actúan en la descomposición de la materia orgánica consumen oxígeno para extraer de ellos la energía y los nutrientes. Mediante este proceso se genera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua, calor, compost y subproductos gaseosos, característicos de la descomposición. De esta forma la materia orgánica se pierde como compuestos de carbono de descomposición, creando  $\text{CO}_2$  y compuestos orgánicos volátiles como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que se evapora en el medio. Miller citado por Stoffela y Kahn (2004) menciona que aunque los organismos que participan en el proceso descomponen algunos materiales orgánicos, forman a su vez nuevos compuestos orgánicos.

Este tipo de material facilita la aireación de las raíces, la absorción de agua y la retención de nutrientes, estos los absorbe y libera en forma lenta al descomponerse, sobre todo el nitrógeno, potasio, y micronutrientes, evitando que estos se laven fácilmente (Barquero 2003).

El compost puede ser elaborado con gran diversidad de residuos orgánicos, tanto de origen vegetal como animal algunos estiércoles como el de aves de corral, de equinos, cabras, ovejas y conejos, tienen un alto contenido de nitrógeno y garantizan que al iniciar el proceso de descomposición se eleve la temperatura a 70 °C donde se eliminan los microorganismos patógenos, mientras que otros estiércoles como los de bovinos en general y cerdo presentan un menor contenido de nitrógeno contribuyendo así a regular la temperatura para que esta no exceda los 70°C, de esta manera se evita la pérdida de la fauna benéfica que en él se desarrolla (CORPOICA s.f.).

El compostaje ha sido utilizado para estabilizar una gran variedad de residuos o subproductos orgánicos antes usados como enmiendas en sustratos de crecimiento. Estos materiales compostados han sido evaluados como componentes de medios de crecimiento para la producción de hortalizas (Stoffela y Kahn 2004).

Según el MAG (2001), algunas materias primas que se utilizan en Costa Rica para la elaboración de compost son: materiales fibrosos altos en carbono, entre ellos, broza y cascarilla de café, cascarilla de arroz, zacates y bagazo de caña. Materiales nitrogenados como estiércol de bovinos, aves, conejos, caballos y cerdos; desechos de hortalizas y zacates verdes. Desechos orgánicos domésticos en general, tierra de mantillo o tierra negra de la parte superficial del suelo, para agregar microorganismos que aceleran y mejoran el proceso, melaza o desechos de frutales, entre otros.

Cano *et al* (2008) evaluaron sustratos elaborados con mezclas entre compostas; biocomposta y vermicomposta, además de sustratos inertes, arena y perlita a diferentes niveles (12.5, 25, 37,5 y 50%) bajo condiciones de invernadero; el experimento se llevó a cabo en México, donde las cuatro mezclas sobresalientes fueron vermicomposta al 50% más arena de río así como perlita al 37,5% y 50%,

con una producción media de 91.42 t/ha, es decir 9.14 veces más a lo obtenido en producciones de tomate orgánico en campo sin afectar la calidad de los frutos.

Salas *et al* citado por Mazuela y Urrestarazu (2004) menciona que debido a las grandes extensiones de cultivos bajo invernaderos en la provincia de Almería, España, siendo estos sistemas de producción muy intensivos, se generan alrededor de 1 000 000 de toneladas de residuos hortícolas al año. Para evitar la contaminación que estos desechos podrían generar, se ha creado como alternativa a esta problemática la descomposición de dichos residuos lo cual da como resultado un compost que puede ser utilizado como enmienda para el suelo o puede ser una alternativa de sustrato para el cultivo sin suelo. En el cultivo de tomate se han realizado ensayos para evidenciar la funcionalidad de este compost como sustrato de cultivo; en uno de ellos se compara el compost con la fibra de coco empleando tres variedades de tomate, estos se evidencia en producción comercial en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Producción comercial de tomate comparando dos sustratos orgánicos.

Tratamiento	cv Josefina		cv Daniela		cv Pitenza	
	Kg/m <sup>2</sup>	f/m <sup>2</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	f/m <sup>2</sup>	Kg/m <sup>2</sup>	f/m <sup>2</sup>
Fibra de coco	6,82	790	4,68	43	7,64	99
Compost	6	712	4,75	44	7,72	99

Fuente: Mazuela y Urrestarazu (2004).

#### 2.4. Cultivo protegido del tomate (*Lycopersicon esculentum*)

El tomate tiene su centro de origen en América del Sur (Casseres 1980). Es la hortaliza número uno en el mundo por la superficie dedicada a su cultivo y el valor de su producción. Esta planta arbustiva o indeterminada puede tener un ciclo de vida superior a un año, aunque se cultiva como anual. Para invernadero se utilizan

las plantas de crecimiento indeterminado, ya que permiten tener producción durante largos periodos si se manejan de forma adecuada (Castellanos 2009).

En cuanto a la altura en la que se desarrolla adecuadamente el cultivo, se dice que puede cultivarse desde los 20 a los 2000 msnm, tomando en cuenta la capacidad de adaptación de cada variedad o híbrido (Alcorta *et al.* 2006).

El tomate es la planta que más se siembra bajo cultivo protegido, debido a que su producción supera la producción en suelo; una planta de tomate en suelo produce de 5 a 8 Kilos, mientras que en hidroponía de 15 a 20 kilos. La producción inicia al cabo de 90 días, una vez que ha comenzado a producir se puede seguir cosechando los próximos seis meses (Alpizar 2008).

#### **2.4.1 Requerimientos ambientales del cultivo**

El cultivo de tomate requiere de ciertas condiciones ambientales para su óptimo desarrollo. La planta es termosensible, es decir, que las variaciones en la temperatura ambiental afectan directamente el crecimiento normal de la misma (Benton 2008). Pérez y Castro citados por Gil (2000) mencionan que la planta de tomate es termoperiódica, lo que significa que responde favorablemente a fluctuaciones de temperatura diurna-nocturna. Esta oscilación térmica entre el día y la noche debe ser al menos de 8 °C para favorecer su crecimiento y la formación de un mayor número de flores. Las temperaturas óptimas para su crecimiento se encuentran en 25 °C en el día y entre 15 y 18 °C en la noche. Por debajo de los 12 °C se detiene el crecimiento y sobre los 30-35 °C también hay problemas, principalmente en la polinización debido a que el polen se esteriliza y ocurre el aborto floral (Alcorta *et al.* 2006).

Un aspecto relevante a tomar en cuenta al producir bajo sistemas de cultivo protegido es la ubicación del sistema, se prefieren áreas donde el clima permite producir a bajo costo con el fin de ser más competitivo, de esta manera se evita

incurrir en gastos energéticos para regular las temperaturas dentro del invernadero (Castellanos 2009).

Gil *et al* 2000 menciona que la actividad fotosintética es más alta cuando en el suelo hay una temperatura entre 25°C y 30°C, esta actividad disminuye por debajo de 15°C y por encima de 35°C. Por tanto la temperatura mínima de un sustrato mineral u orgánico debe ser de 12°C; la óptima entre 20 y 24°C y la máxima de 24 °C. Según Benton (2008) la absorción de agua y nutrientes disminuye significativamente cuando la temperatura de las raíces decrece. El uso del agua por parte de la planta disminuye cuando la temperatura de las raíces es inferior a 20 °C y cuando esta es mayor de 30 °C.

El tomate es un cultivo insensible al fotoperiodo, entre 8 y 16 horas, aunque requiere buena iluminación (Calvert citado por Nuez *sf*). Iluminaciones limitadas, al reducir la fotosíntesis neta, implican mayor competencia por los productos asimilados, con incidencia en el desarrollo y producción (Aung citado por Nuez *sf*).

La humedad relativa óptima debe oscilar entre los 60 y 80%, valores más altos favorecen el desarrollo de enfermedades en el follaje y el agrietamiento del fruto, además se dificulta la fecundación debido a que el polen se compacta y abortan parte de las flores. (Alcorta *et al.* 2006).

Valores reducidos de luz pueden incidir de forma negativa sobre los procesos de floración, fecundación así como el desarrollo vegetativo de la planta, durante los periodos críticos de este último periodo resulta crucial la interrelación existente entre la temperatura diurna, nocturna y la luminosidad (Alcorta *et al.* 2006).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Ubicación y periodo del estudio.**

El estudio se llevó a cabo en invernadero y en laboratorio, para lo cual se utilizó el invernadero de horticultura y los laboratorios de entomología y análisis químicos de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en la comunidad de Santa Clara, distrito de Florencia, en San Carlos, Alajuela, a una altitud de 165 msnm, el clima de esta región se califica como tropical húmedo, con una precipitación promedio de 3500 mm anuales, la temperatura mínima es de 21 °C y la máxima de 30 °C. El experimento se inició el 14 de diciembre del 2010 y finalizó el 30 de marzo del 2011.

#### **3.2. Descripción del invernadero**

El invernadero donde se efectuó el ensayo (Figura 1) tiene un área de 270m<sup>2</sup>, un largo de 30m y un ancho de nueve metros, con una altura de pared de cuatro y medio metros, una altura de cumbrera de siete metros y medio con una abertura cenital de un metro veinte centímetros, con paredes de malla de nylon antiáfidos con una densidad de hilos de 32 x 32 por pulgada lineal, el techo es de cobertura plástica con filtro UV, de polietileno de baja densidad, el piso presenta una cubierta plástica blanca conocida como "Grown cover" que permite el drenaje de líquidos.



**Figura 1.** Invernadero de horticultura ubicado en la finca La Esmeralda, del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Alajuela 2011.

### **3.3. Descripción del experimento**

Se cultivaron plantas de tomate en invernadero bajo un sistema hidropónico abierto, utilizando como sustrato un compost elaborado de residuos de actividades agrícolas y pecuarias, se utilizaron cuatro diferentes proporciones de una solución nutritiva completa, y un testigo relativo con sustrato de arena volcánica a un 100% de la solución. A lo largo del ciclo de cultivo, se midieron variables asociadas al crecimiento de las plantas, así como la producción y calidad de los frutos, a los sustratos se les evaluó el pH y la CE.

### **3.4. Descripción y distribución de los tratamientos**

Los tratamientos evaluados correspondieron a cuatro diferentes proporciones de la solución nutritiva hidropónica, utilizando compost como sustrato. Además un testigo relativo, arena volcánica con solución nutritiva al 100%.

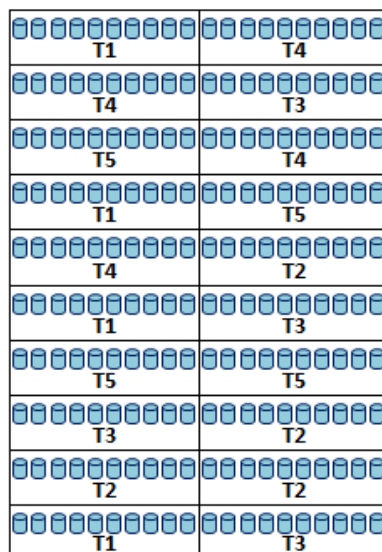
El experimento estuvo constituido por cinco tratamientos que se describen en el cuadro 2, con cuatro repeticiones y la unidad experimental se encontraba

conformada por diez plantas cada una sembrada en un contenedor con sustrato. Las unidades experimentales fueron aleatorizadas (Figura 2) mediante una tabla de números aleatorios.

**Cuadro 2.** Descripción de los tratamientos utilizados en un ensayo para el cultivo de tomate en un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Tratamiento	Sustrato	Niveles de aplicación de la solución nutritiva (%)	*CE Trasplante a inicio floración	CE Inicio floración a cuaje racimos	CE Cuaje de racimos a final cosecha
T1	Compost	0	0	0	0
T2	Compost	33,3	0,66	0,66	0,73
T3	Compost	66,6	1,33	1,33	1,47
T4	Compost	100	2	2	2,2
T5	Arena roja volcánica	100	2	2	2,2

Fuente: El autor (\*CE: Conductividad eléctrica en mS/cm)



**Figura 2.** Distribución aleatorizada de las unidades experimentales en un ensayo de tomate en invernadero, Santa Clara, San Carlos, 2011.



### 3.5. Solución nutritiva

Para la elaboración de la solución nutritiva se utilizó como base la fórmula propuesta por Steiner citado por Sánchez (2005), empleando los fertilizantes disponibles, donde se manejó la conductividad eléctrica en dos niveles (2 y 2,2) según la fenología, esta se incrementó al llenado de frutos. A partir de esta fórmula al 100% diluida en 1000L de agua, se variaron las concentraciones para dar origen a los tratamientos (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Equivalentes de los iones para la solución hidropónica a una CE de 2 y 2,2 mS/cm. Santa Clara, San Carlos, 2011.

Iones	2 mS/cm	2,2 mS/cm	Iones	2 mS/cm	2,2 mS/cm
<b>+</b>	<b>Eq</b>		<b>-</b>	<b>Eq</b>	
<b>K</b>	7	9	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	15	16
<b>Ca</b>	10	10	<b>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></b>	3	4
<b>Mg</b>	3	3	<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	2	2
<b>Σ</b>	20	22	<b>Σ</b>	20	22

Fuente: Steiner citado por Sánchez (2005).

**Cuadro 4.** Cuadro de doble entrada de cationes y aniones para el diseño de la solución nutritiva a una conductividad eléctrica de 2 mS/cm, Santa Clara, San Carlos, 2011.

	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>Total</b>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	5	10	-	15
<b>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></b>	-	-	3	3
<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	2	-	-	2
<b>Total</b>	7	10	3	20

Fuente: Hogland y Arnon citado por Sánchez (2005).

**Cuadro 5.** Cuadro de doble entrada de cationes y aniones para el diseño de la solución nutritiva a una conductividad de 2,2 mS/cm. Santa Clara, San Carlos, 2011.

	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>Ca<sup>+2</sup></b>	<b>Mg<sup>+2</sup></b>	<b>Total</b>
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	6	10	-	16
<b>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></b>	1	-	3	4
<b>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup></b>	2	-	-	2
<b>Total</b>	9	10	3	22

*Fuente: Hogland y Arnon citado por Sanchez (2005)*

**Cuadro 6.** Fertilizantes utilizados en la solución nutritiva para 1000 litros de agua con una CE 2 y 2,2 mS/cm. Santa Clara, San Carlos, 2011

<b>Fuente</b>	<b>CE 2 mS/cm</b>	<b>CE 2,2 mS/cm</b>
	<b>Cantidad (g)</b>	
<b>Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b>	1180	1180
<b>KNO<sub>3</sub></b>	505,5	606
<b>KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub></b>	272	272
<b>MgSO<sub>4</sub></b>	370	370
<b>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	0	87,5

*Fuente: El autor*

Para suministrar los elementos menores se empleó una fórmula completa; Microplex<sup>®</sup>, sin embargo el Zinc y Boro se adicionaron por separado para reforzar dicha fórmula.

**Cuadro 7.** Fuentes y cantidades de los Micronutrientes utilizados en la solución nutritiva para un tanque de 1000 litros de agua a una CE de 2 mS/cm, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Elemento	Fuente	Cantidad (g)
Fe, Mn, Cu, Zn	Microplex <sup>®</sup> (Quelato de EDTA)	35
Zn	Sulfato de Zinc	2,5
B	Ácido bórico	3

*Fuente: El autor*

### 3.6. Material experimental

El material experimental correspondió a plántulas de tomate del híbrido QualiT 21 de (Rogers Syngenta seeds, US), estas fueron adquiridas en Almacigos San Juan (Naranjo, Alajuela). El total de plántulas requerido fue de 200.

### 3.7. Descripción de la unidad experimental

La unidad experimental consistió en una hilera de diez plantas de tomate, sembradas cada una en un contenedor con sustrato, la distancia entre hileras era de 1,50 m y entre plantas dentro de cada hilera de 0,40 cm, lo cual correspondió a una densidad de siembra de 16.666 plantas por hectárea.

### 3.8. Composición y acondicionamiento del sustrato

En el experimento se empleó como sustrato un compost a base de pollinaza, broza de café y estiércol de ganado bovino en una proporción 1:1:1/2 respectivamente, empleando melaza a una dosis de 0,2 L disueltos en 1 L de agua, como activador de microorganismos, para un saco (46 kg) de la mezcla anterior. Estos materiales se mezclaron y pasaron por un proceso de

descomposición aeróbica, se efectuaron cinco volteos durante quince días con el propósito mantener una temperatura no mayor a 60 °C.

Por la naturaleza de sus materias primas el compost terminado tiende a formar conglomerados que dificultan su utilización, por lo que se molió en Coopepalmares, Alajuela con un molino de martillos (Vargas 2010).

### 3.9. Manejo del cultivo

#### 3.9.1 Trasplante y manejo general del cultivo

Las plántulas se inocularon con *Trichoderma sp* a la raíz a una concentración de  $1 \times 10^9$  conidios/ml y se colocó una por contenedor de diez litros de capacidad (Figura 3). El sustrato dentro del contenedor, se humedeció con la solución correspondiente a cada tratamiento antes de sembrar las plántulas.



**Figura 3.** Inoculación de plántulas de tomate con *Trichoderma sp* antes del trasplante en un invernadero, Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

La Figura 4 muestra el sistema de tutorado que fue instalado con el fin de manejar la biomasa de las plantas, se asignaron dos cuerdas para cada una, estas se encontraban atadas a un cable principal debidamente tensado, la parte inferior de los mecates se amarraron de la base del tallo, cada uno contaba con una gasa

que permitía su movimiento de acuerdo al crecimiento de las plantas, el mecate fue arrollado alrededor del tallo con el fin de sostener la planta. Las plantas se manejaron a dos guías de crecimiento vertical según su dicotomía y se efectuó poda de rebrotes conforme los mismos iban apareciendo.



**Figura 4.** Sistema de tutorado para el sostén de las plantas de tomate bajo invernadero, Santa Clara, San Carlos, 2011.

### **3.9.2 Suministro de riego y solución nutritiva**

El agua y la solución nutritiva fueron suministradas al mismo tiempo vía riego por goteo mediante bombeo, se emplearon cuatro recipientes con su respectiva bomba los cuales contenían las diferentes concentraciones de la solución (Figura 5), se utilizaron dos mangueras de goteo por hilera con cuatro goteros por contenedor y se suministraron a las plantas por medio de su respectiva bomba con una frecuencia de 9 riegos diarios y una duración que varió según la etapa del cultivo (Cuadro 8), mediante la programación de un temporizador Nelson Ez Pro Controller (L.R. Nelson, IL. Chicago) instalado en el invernadero.

**Cuadro 8.** Frecuencia y duración de los riegos efectuados durante el ciclo del cultivo de tomate en un sistema hidropónico abierto en la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Tiempo programado	Trasplante a inicio floración (min)	Inicio floración a cuaje racimos (min)	Cuaje de racimos a final cosecha (min)
7:30	3	3	3
8:30	3	3	3
9:30	3	3	3
10:30	3	3	3
11:30	3	3	5
12:30	3	3	5
1:30	3	3	5
2:30	3	3	3
3:30	3	3	3

Fuente: El autor



**Figura 5.** Recipientes contenedores de las soluciones suministradas a las plantas de tomate mediante el sistema de riego por goteo en un sistema hidropónico abierto, Sede Regional San Carlos del Instituto tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos, 2011.

### 3.9.3 Manejo fitosanitario del cultivo

A la entrada del invernadero se mantuvo un pediluvio con una solución de Carbolina como desinfectante para evitar la entrada de patógenos.

Para el control de bacteria se realizaron tres aplicaciones de Biocto<sup>®</sup>, bactericida a base de semillas de cítricos a una dosis de 1,5 cc l<sup>-1</sup>, se emplearon los insecticidas Muralla<sup>®</sup> (Bayer, Alemania) a una dosis de 4cc l<sup>-1</sup> y Dipel<sup>®</sup> (Abott, USA) a 3,33 g l<sup>-1</sup> para el control de larvas de lepidóptero y minador. Además se utilizó *Trichoderma* sp para la prevención de *Botrytis cinerea* y Sportak<sup>®</sup> (Bayer, Alemania) para su control a una dosis de 7 cc l<sup>-1</sup>. Para cada una de estas aplicaciones se adicionó 0,5 cc l<sup>-1</sup> de COSMO-IN<sup>®</sup> d 27 SL (Cosmoagro, Colombia) como coadyuvante.

### 3.10. Variables evaluadas durante el estudio

Por la naturaleza de las variables estas fueron evaluadas en dos sitios:

- *Laboratorio*. Se llevaron a cabo evaluaciones de variables asociadas a los sustratos mediante la caracterización de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas.
- *Invernadero*. Se llevó a cabo la medición de las variables asociadas al cultivo en cuanto a crecimiento y productividad. Temperatura del sustrato y variables ambientales.

### **3.11. Caracterización de los sustratos en laboratorio**

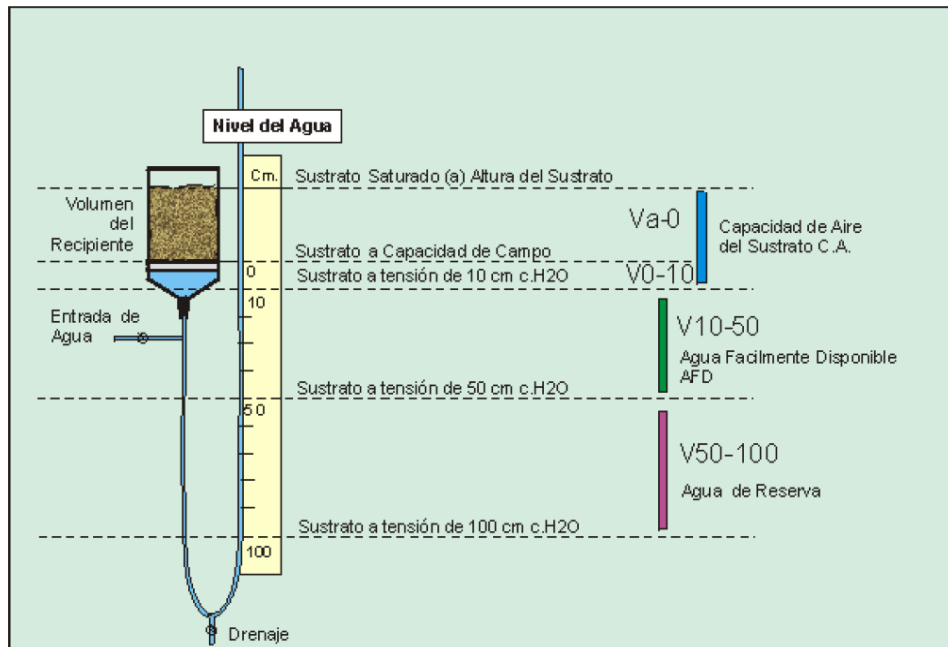
#### **3.11.1 . Evaluación de propiedades físicas**

##### **3.11.1.1. Retención de humedad y porosidad**

La medición de la retención de humedad se llevó a cabo en el laboratorio de entomología del ITCR, la metodología para su determinación se basó en la propuesta por Calderón y Ceballos (2001), donde se fijó un recipiente cilíndrico con una placa filtrante en el fondo para evitar que pasara el sustrato (Figura 6). Al recipiente se le colocaron dos litros del sustrato, esto se compactó suavemente y se dejó estabilizar, luego con la válvula cerrada se le añadió agua al sustrato hasta saturar. De esta manera al drenar se obtuvo los valores de  $V_a-0$  (sustrato a capacidad de campo),  $V_0-V_{10}$  (sustrato a tensión de 10 cm de agua),  $V_{10}-50$  (sustrato a tensión de 50 cm de agua),  $V_{50}-100$  (sustrato a tensión de 100 cm de agua) y  $VR$  (volumen del recipiente). Con la obtención de estos valores referidos al porcentaje de volumen inicial del recipiente  $VR$  ocupado por el sustrato fue posible realizar una curva de retención de agua así como determinar las siguientes variables con sus respectivas fórmulas:

- Macroporosidad:  $(V_a-0)/VR \times 100$
- Capacidad de aireación (CA):  $(V_a-0+V_0-V_{10})/VR \times 100$
- Agua extra fácilmente disponible (AEFD):  $(V_0-10)/VR \times 100$
- Agua fácilmente disponible (AFD):  $(V_{10}-50)/VR \times 100$
- Agua de reserva (AR):  $(V_{50}-100)/VR \times 100$
- Agua total disponible:  $(AFD+AR)$





**Figura 6.** Método para la medición de la retención de humedad de los sustratos utilizados en un ensayo de tomate bajo en sistema hidropónico abierto (Calderón y Cevallos 2001), Santa Clara, San Carlos, 2011.

### 3.11.2 Análisis químico

El análisis químico del sustrato se realizó en el Laboratorio de CAFESA para esto recolectó una muestra de cada sustrato, las cuales fueron colocadas en bolsas plásticas separadas y debidamente rotuladas para su transporte al laboratorio. El análisis se efectuó mediante el método de pasta saturada con el fin de determinar la concentración de iones de elementos nutritivos disponibles como lo son: el N- $\text{NH}_4$ , N- $\text{NO}_3$ , P, K, Mn, Mg, Fe, Cu, Zn, Ca, el pH y la conductividad eléctrica del sustrato.

En el laboratorio de análisis agronómicos del ITCR se realizó la medición de la conductividad eléctrica del sustrato tomando un extracto en líquido del mismo y haciendo uso de un conductímetro previamente calibrado en la solución correspondiente pH ISE conductivity meter 250 (Denver Instrument Company,

USA) y de la misma manera se tomó el dato del pH del sustrato mediante el uso de un pH metro pHTestr 3 + (OAKTON, USA.) que también se introdujo en la solución concentrada.

### **3.11.3 Análisis microbiológico**

El análisis microbiológico se efectuó mediante la técnica clásica (diluciones seriadas), modificada por Mata 2010.

Se realizó análisis microbiológico tanto para el compost como para la arena. De una muestra se efectuó un recuento total de bacterias anaerobias, aerobias, actinomicetos y hongos.

## **3.12. Variables evaluadas**

### **3.12.1.1. Variables asociadas a los tratamientos**

En el Cuadro 9 se muestran las variables asociadas a los tratamientos donde se evaluó el crecimiento, la producción y dos variables relativas al sustrato.

**Cuadro 9.** Variables de respuesta asociadas al cultivo de tomate y a los sustratos, evaluadas en invernadero y laboratorio, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Variable	Abreviación	Unidad de medición	Frecuencia medición	Descripción
Altura de planta	ALT	Centímetros	Semanal	Se midió con una cinta métrica (Truper, China), desde la base del tallo hasta el meristemo apical más alto de las dos guías de la planta.
Grosor de tallo	GT	Centímetros	Semanal	Con un calibrador de mano (Best value, China) se tomó la medida en mm en la base del tallo, paralelo a la cinta de goteo.
Peso Seco Total	PST	Gramos/planta	Mensual	Se utilizó un método destructivo, se tomó una submuestra del borde de cada parcela, la planta se fraccionó y colocó en bolsas de papel, esta fue introducida en un horno de aire forzado a 55 °C, durante una semana. Las partes fraccionadas fueron pesadas en una balanza granataria y se sumó la totalidad de los pesos.
Peso Seco de Hojas	PSH	Gramos/planta	Mensual	Las hojas de la muestra seca separadas se pesaron en una balanza granataria.
Peso Seco de Tallo	PS Tallo	Gramos/planta	Mensual	Los tallos separados de las muestras secas fueron pesados.
Peso Seco de Raíz	PSR	Gramos/planta	Mensual	La raíz una vez seca se pesó en una balanza granataria.
Número frutos/planta	NF/PL		Al momento de cosecha	Del número total de frutos cosechados por parcela se obtuvo un promedio por planta.

Peso Seco de frutos/ planta	PSF/PL	Gramos/ planta	Mensual	Se tomó una muestra de frutos previamente pesados, los cuales se sometieron a secado, a partir de esto se calculó un factor que se multiplicó por el dato de producción por parcela para obtener el peso seco de frutos totales, este se dividió entre el número de plantas de la parcela efectiva (6 plantas).
Número de frutos 1era	NF 1era		Al momento de cosecha	Los frutos que pesaban 250g o más fueron categorizados como frutos de primera calidad.
Número de frutos 2da	NF 2da		Al momento de cosecha	Los frutos entre los 250 y 100g se clasificaron como segunda calidad.
Número de frutos 3era	NF 3era		Al momento de cosecha	Los de menos de 100g se clasificaron en frutos de tercera calidad.
Peso de Frutos de 1 era	PF 1era	Gramos	Al momento de cosecha	Se obtiene del peso del total de frutos de primera cosechados por repetición en cada tratamiento hasta el final de la cosecha.
Peso de Frutos de 2 da	PF 2da	Gramos	Al momento de cosecha	Se obtiene del peso del total frutos de segunda cosechados por repetición en cada tratamiento hasta el final de la cosecha.
Peso de Frutos de 3 era	PF 3era	Gramos	Al momento de cosecha	Se obtiene del peso total frutos de tercera cosechados por repetición en cada tratamiento hasta el final de la cosecha.
Número de racimos/ planta	Nrac/PL		Durante el desarrollo productivo	Los racimos fueron contados al final del ciclo.
Número de frutos/ racimo	NF/Rac		Durante el desarrollo productivo	Se divide el número de frutos por planta entre el número de racimos/planta.

Temperatura del sustrato	T°S	°C	Semanal	La temperatura del sustrato fue registrada con un termómetro de espiga (Smart Electric, China), que permitió su introducción en el sustrato, tanto en el compost como en la arena.
pH	pH 1, pH 2 y pH 3		Mensual	El pH se determinó mediante la toma de una muestra de sustrato, con ayuda de un beaker de 50 cc. Del contenedor de donde se tomó la planta muestreada mensualmente para determinar el peso seco, en el laboratorio este material fue saturado con el mismo volumen de agua destilada, al decantado se le midió el pH con el respectivo instrumento. De esto se derivan las variables pH 1 medida a partir del primer mes después del trasplante, en el segundo mes se obtuvo la medida correspondiente a pH 2 y al tercer mes se originó el pH 3.
Conductividad Eléctrica	CE 1, CE 2 y CE 3	μS/cm	Mensual	La conductividad eléctrica se determinó mediante la toma de una muestra de sustrato, con ayuda de un beaker de 50 cc. del contenedor de donde se tomó la planta muestreada mensualmente para determinar el peso seco, en el laboratorio este material fue saturado con el mismo volumen de agua destilada, al decantado se le midió la conductividad con el respectivo instrumento.

				De esto se derivan las variables CE 1, CE 2, CE 3 las cuales corresponden a un promedio de las mediciones efectuadas por tratamiento a partir del primer mes después del trasplante cada mes, durante tres meses.
--	--	--	--	---

*Fuente: el autor*

### **3.12.2 Variables ambientales**

Para registrar la temperatura y la humedad relativa acumulada se empleó un higrotermómetro Thermo-hygro (Control company, Texas US) de mínimas y máximas, en cada lectura por la mañana debió ser borrada la memoria para obtener registros diarios, la toma de datos se efectuó a las 7:30 am.

### **3.13. Diseño experimental**

Debido a que las condiciones dentro del invernadero en las que se desarrolló el experimento son uniformes, se utilizó un diseño irrestricto al azar de cinco tratamientos con cuatro repeticiones.

### **3.14. Análisis estadístico**

Se llevó a cabo un análisis multivariado de componentes principales, a partir de este se seleccionaron las variables representativas, a estas se les realizó análisis de varianza, así como regresiones para las variables que mostraron los  $R^2$  más altos en cada componente y los tratamientos. Se efectuaron también contrastes ortogonales para los tratamientos T4 y T5 donde se suministró la solución a un 100%.

Para los análisis se utilizaron los programas estadísticos JMP versión 9 (SAS Institute) e Info Stat.

### **3.15. Modelo estadístico**

El modelo que describe los datos es el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + t_i + e_{ijk}$$

**Donde:**

$Y_{ij}$  = Variable respuesta de la ij-esima unidad experimental

$\mu$  = media general.

$t_i$  = efecto del iésimo tratamiento  $i=1.....5$

$e_{ij}$  = error experimental.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSION

### 4.1. Caracterización de los sustratos utilizados:

#### 4.1.1 Propiedades físicas de los sustratos:

En el Cuadro 10 se muestran los resultados obtenidos de las propiedades físicas obtenidas mediante la metodología de (Calderón y Ceballos 2001).

**Cuadro 10.** Propiedades físicas de los sustratos, rangos óptimos y resultados obtenidos en dos sustratos empleados en el cultivo de tomate bajo un sistema de cultivo protegido.

Propiedad	* Nivel óptimo (%)	Compost	Arena volcánica
Macroporosidad (MP)	20 - 30	54.10	33.60
Capacidad de aireación (CA)	20 - 30	56.30	35.15
Agua fácilmente disponible (AFD)	20 - 30	4.50	4.50
Agua de reserva (AR)	4 - 10	5.45	5.50
Agua total disponible (ATD)	25 - 40	9.95	10.00

\*Fuente: Ansorena (1994)

Se recomienda que el espacio ocupado por las partículas de aire (macroporosidad) se encuentre entre el 20 y 30% del volumen que ocupa el sustrato, para el caso de los sustratos utilizados, ambos presentaron valores mayores a los óptimos. Sin embargo, Castellanos (2009) menciona que una buena aireación del sustrato favorece el crecimiento de raíces vigorosas en el caso de la

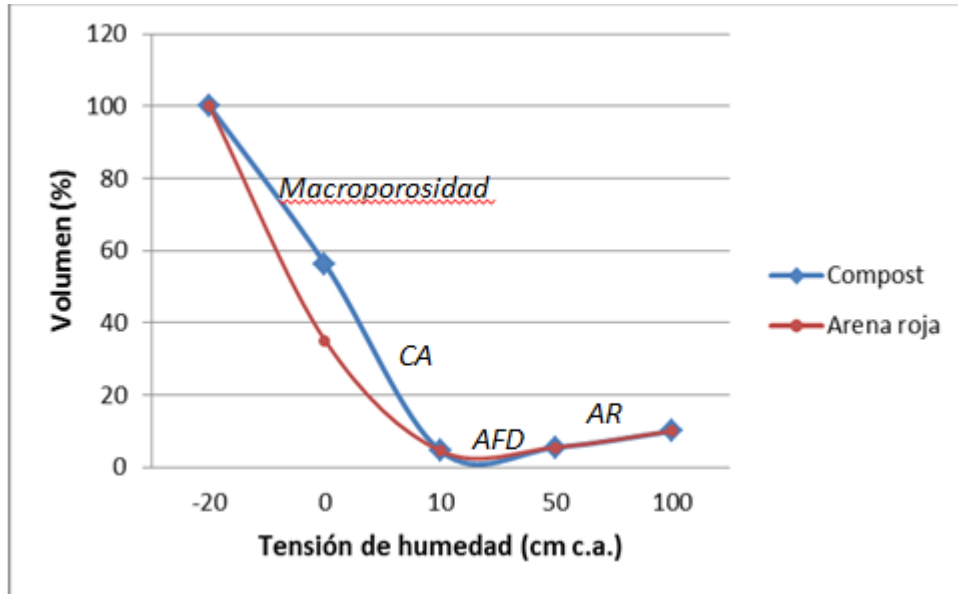


planta de tomate, debido a que se facilita la absorción de nutrimentos, agua y oxígeno.

El dato obtenido para el sustrato compost no es coincidente con el rango óptimo, según Ansorena (1994), la capacidad de aireación (CA) debe oscilar entre 20 y 30% para sustratos orgánicos (Cuadro 10).

Castellanos (2009) menciona que para los sustratos inorgánicos este rango oscila entre 25 y 35%, por tanto, la arena volcánica presentó un porcentaje dentro del rango óptimo.

Para ambos sustratos se utilizaron contenedores de la misma capacidad (diez litros), se mostró una marcada diferencia entre los valores de capacidad de aireación (CA) para la arena volcánica y el sustrato compost (Cuadro 10), esto se debe a que la capacidad de aireación se encuentra estrechamente relacionada con la macroporosidad, donde anteriormente se observó que el compost presentó un valor elevado respecto a la arena volcánica, lo cual favorece la oxigenación de las raíces y por ende el crecimiento del cultivo como lo hace ver Castellanos (2009). En la Figura 7 se muestra la curva de retención de humedad, donde se observa una caída en la retención de agua por parte de los sustratos, esta es más pronunciada para el compost, donde a una tensión de diez centímetros el compost libera gran parte del agua que se le suministró.



**Figura 7.** Curva de retención de humedad para la arena roja volcánica y el compost utilizados como sustrato en el cultivo de tomate en invernadero, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Para el agua fácilmente disponible (AFD), ambos sustratos mostraron valores iguales representando un porcentaje muy bajo en relación al rango óptimo (Cuadro 10), esto deja en evidencia que la planta no contó con buena disponibilidad de agua. Abad y Ansorena citados por Calderón (s.f.) mencionan que un sustrato puede presentar una pobre retención de agua fácilmente disponible cuando los poros son grandes y parte del agua se pierde por gravedad. Conocer este tipo de agua es importante para llevar a cabo la programación del riego, debido a que esta es el agua que las raíces adquieren para efectuar sus actividades metabólicas sin mayor dificultad (Castellanos 2009).

El volumen de agua de reserva (AR) en un sustrato juega también un papel importante, ya que en momentos de escases la planta cuenta con una reserva que puede ser utilizada en periodos más prolongados (Florian 1997). El compost y la arena volcánica presentaron valores similares, que se encuentran dentro del rango óptimo (Cuadro 10).

El agua total disponible es la suma del AFD y el AR, la arena roja y el compost presentaron valores inferiores al rango ideal según Baixauili y Aguilar (2000) debido a que el valor de agua fácilmente disponible fue inferior al óptimo en ambos sustratos.

#### 4.1.2 Propiedades químicas de los sustratos

Para extraer los nutrientes que están disponibles a la planta, se efectuó un análisis químico, bajo la técnica de pasta saturada según lo recomienda Cadahía citado por Navarro (2002); los datos obtenidos para los dos sustratos empleados se presentan en el Cuadro 11.

**Cuadro 11.** Análisis químico\* de dos sustratos utilizados en el cultivo de tomate, Santa Clara, San Carlos, 2011.

IDENT. DE CAMPO	mg/L						mg/L				mS/cm	
	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	pH	CE
Compost	150.9	79.3	122	3380	40.8	23.9	19.5	1.91	0.23	1.2	8.7	6.69
Arena roja	1.47	1.19	3.55	Tr	4.64	2.93	3.91	0.05	0.02	0.3	7.2	0.05

Fuente: El autor (\* Técnica de pasta saturada, laboratorio de CAFESA).

**Cuadro 12.** Niveles óptimos y excesivos de los elementos en sustratos utilizados en la producción del cultivo de tomate, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Elemento	*Nivel optimo	**Nivel óptimo	**Nivel excesivo
CE (dS/mL)	2.0-3.0		
pH	5.0-6.0		
	mg/L (ppm)	mg/L (ppm)	mg/L (ppm)
Nitrato	370-930	100-180	>300
Amonio	0-10		
Fósforo	15-45	7-13	>19
Potasio	160-270	156-235	>352
Calcio	160-280	50-100	>500
Magnesio	25-70	18-37	>88
Sulfato	100-500		
Cobre	0.02-0.1	0.001-0.5	
Hierro	0.4-1.1	0.3-3.0	
Manganeso	0.2-0.8	0.02-3.0	
Zinc	0.2-0.7	0.3-3.0	

Fuente: \*Jones (2008) y \*\*Warncke y Abad citados por Castellanos (2009)

En el Cuadro 11 se muestran las concentraciones en miligramos por litro (mg/L) de los distintos elementos, pH y conductividad eléctrica (mS/cm) para ambos sustratos.

Comparando los resultados obtenidos con los rangos óptimos (Cuadro 12), se logró constatar que elementos como el amonio, fosforo, potasio, hierro, cobre y manganeso en el caso del compost excedieron los valores recomendados por Jones (2008) y Warncke y Abad citados por Castellanos (2009) para sustratos en el cultivo de tomate, el nitrato, calcio y magnesio estaban por debajo de los rangos aceptables y únicamente el zinc se encontró dentro del óptimo.

La arena roja presentó concentraciones bajas para la mayoría de los nutrientes (Nitrato, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio y Zinc), el amonio, cobre y

manganeso se encuentran dentro del rango óptimo, solamente el hierro se encontró en una concentración mayor a la deseada en el caso de sustratos para tomate.

La carga iónica y el pH presentes en el caso del compost se ven influenciados por el potasio, es importante recalcar que a pesar del alto contenido encontrado en el sustrato, este nutrimento es el que más extrae la planta para su adecuado crecimiento y desarrollo, según lo reporta Godoy *et al.* citado por Castellanos (2009).

#### 4.1.3 Propiedades microbiológicas de los sustratos.

El análisis microbiológico de los sustratos mostró la presencia de diferentes microorganismos tanto en el compost como en la arena roja (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Análisis microbiológico de los sustratos arena roja y compost, expresado en unidades formadoras de colonias por gramo (UFC/g).

Organismos	Arena Roja UFC/ gr de sustrato	Compost UFC/ gr de sustrato
Hongos	> 10 <sup>3</sup> se determinó la presencia de <i>Trichoderma</i> sp	1,3x10 <sup>7</sup> <i>Metharhizium</i> sp; 1,6x10 <sup>3</sup> <i>Paecilomyces</i> sp y 2,4x10 <sup>6</sup> <i>Penicillium</i> sp
Bacterias aeróbicas	1,8x10 <sup>4</sup>	1,6x 10 <sup>5</sup>
Actinomicetos	No se determinó presencia.	1,6x10 <sup>4</sup>

Fuente: el autor

Los niveles de los microorganismos fueron mayores en el compost, siendo esto normal tratándose de un sustrato orgánico, ya que la actividad biológica según Imas *et al.*, citado por Palma (2005) queda supeditada a este tipo de sustrato no así en los de tipo inorgánico. En el compost se encontraron hongos como *Metharhizium* sp, *Paecilomyces* sp y *Penicillium* sp, así como bacterias aeróbicas y actinomicetos, estos son en su mayoría descomponedores de este tipo de material (Paul *et al* citado por Soto 2003).

Por su parte los actinomicetes se presentaron únicamente en el compost, Rey (s.f.) menciona que estos microorganismos son característicos del proceso de compostaje, presentan enzimas con la capacidad de romper químicamente residuos ricos en celulosa, lignina, quitina y proteínas, con frecuencia producen antibióticos que inhiben el crecimiento bacteriano y suelen aparecer al final del proceso de descomposición, siendo estos indicadores de la madurez del compost. La presencia de actinomicetes en el compost mostró un nivel de madurez que le confirió estabilidad a este material, sin embargo Castellanos (2009) menciona que materiales como el compost tienen baja bioestabilidad, lo cual puede provocar deficiencias de oxígeno y nitrógeno, además de liberar sustancias fitotóxicas, contracción del sustrato, bajo contenido de aire, etc, por lo que se recomienda usar sustratos con una alta bioestabilidad como la turba y la fibra de coco.

La arena roja mostró una escasa actividad microbiana, el hongo *Trichoderma* sp se presentó únicamente en este sustrato en una baja concentración (Cuadro 13) siendo menor que el rango óptimo mayor a  $10^3$  UFC/gr recomendado por Obregón citado por Campos (2009).

#### **4.1.4 Análisis de las variables asociadas a los tratamientos**

En el presente experimento se obtuvo gran cantidad de información, las veintitrés variables evaluadas presentan distintas unidades de medición de acuerdo a la naturaleza de las mismas, lo cual explica la amplia diferencia en sus magnitudes (Cuadro 14).

**Cuadro 14.** Estadísticas univariadas para veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos.

Variable	Unidad	Media	Desviación Estandar	Sumatoria	Mínimos	Máximos
Alt PL	cm	203.1	10.3563	4062	180	223
PST	g	195.85	69.0822	3917	74	299
PS Raiz	g	15.55	8.3947	311	6	41
PS Hojas	g	81.6	29.0198	1632	27	127
PS Tallo	g	59.15	15.809	1183	25	88
PSF/PL	g	87.8	30.6999	1756	32	142
Grosor Tallo	cm	14.85	0.6708	297	14	16
NF/PL	Conteo	13.5	4.9364	270	5	22
NF 1era	Conteo	2.75	2.3141	55	0	7
NF 2da	Conteo	61.45	22.4065	1229	18	96
NF 3era	Conteo	15.6	12.3135	312	3	42
PTF	g	11967.7	4203.73	239354	4367	19422
PF 1era	g	784.15	648.992	15683	0	2033.5
PF 2da	g	10020.9	3833.4	200417	2879	17515
PF 3era	g	1174.1	974.298	23482	232	3216
NRac/PL	Conteo	9.15	1.6944	183	6	11
NF/Rac	Conteo	1.45	0.5104	29	1	2
CE 1	μS/cm	95.8	39.6293	1916	25	154
CE 2	μS/cm	154.4	83.1317	3988	24	348
CE 3	μS/cm	157.05	91.3976	3141	28	282
pH 1		6.75	0.5501	135	6	8
pH 2		6.8	0.5231	136	6	8
pH 3		6.65	0.4894	133	6	7

Fuente: el autor

La información anterior demuestra la diferencia de magnitudes y exhibe la totalidad de las variables de forma individual.

A través de las correlaciones entre las variables y su grado de significancia estadística se puede observar la importancia de algunas de ellas, tal como se muestra en el Cuadro 15.

**Cuadro 15.** Correlaciones ordenadas por significancia entre veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Variable	por Variable	Correlación	Signif Prob	Plot Corr
PTF	PSF/PL	0.9998	<.0001*	
PF 3era	NF 3era	0.9822	<.0001*	
PF 2da	PSF/PL	0.9789	<.0001*	
PF 2da	PTF	0.9787	<.0001*	
PS Hojas	PST	0.9745	<.0001*	
PF 2da	NF 2da	0.9736	<.0001*	
PTF	NF 2da	0.9734	<.0001*	
NF 2da	PSF/PL	0.9730	<.0001*	
PF 1era	NF 1era	0.9567	<.0001*	
NF 2da	NF/PL	0.9338	<.0001*	
PTF	NF/PL	0.9284	<.0001*	
NF/PL	PSF/PL	0.9266	<.0001*	
PS Tallo	PST	0.8821	<.0001*	
PF 2da	NF/PL	0.8713	<.0001*	
PS Tallo	PS Hojas	0.8650	<.0001*	
pH 3	pH 1	0.8309	<.0001*	
NF/Rac	NF/PL	0.8042	<.0001*	
NRac/PL	PF 2da	0.7853	<.0001*	
NRac/PL	NF 2da	0.7842	<.0001*	
NRac/PL	PSF/PL	0.7807	<.0001*	
NRac/PL	PTF	0.7766	<.0001*	
CE 3	CE 1	0.7570	0.0001*	
pH 1	NF/PL	-0.7462	0.0002*	
NRac/PL	NF/PL	0.7142	0.0004*	
NF/Rac	NF 2da	0.7085	0.0005*	
pH 1	NF 2da	-0.7035	0.0005*	
pH 1	NF/Rac	-0.7029	0.0005*	
NF/Rac	PTF	0.6961	0.0007*	
NF/Rac	PSF/PL	0.6946	0.0007*	
pH 2	NF/PL	-0.6929	0.0007*	
NRac/PL	PST	0.6549	0.0017*	
pH 2	NF/Rac	-0.6307	0.0029*	
CE 3	NRac/PL	0.6294	0.0029*	
pH 1	PTF	-0.6254	0.0032*	
NRac/PL	PS Hojas	0.6253	0.0032*	
pH 1	PSF/PL	-0.6233	0.0033*	
CE 1	NRac/PL	0.6158	0.0038*	
CE 2	PS Hojas	0.6125	0.0041*	
pH 2	NF 3era	-0.6095	0.0043*	
NF/Rac	PF 2da	0.6083	0.0044*	
pH 1	PF 2da	-0.6038	0.0048*	
pH 3	NF/Rac	-0.6005	0.0051*	
pH 3	NF/PL	-0.5992	0.0052*	
NF 3era	NF/PL	0.5949	0.0057*	
pH 2	NF 2da	-0.5891	0.0063*	
CE 3	CE 2	0.5851	0.0067*	
CE 1	NF/PL	0.5844	0.0068*	
CE 2	NRac/PL	0.5791	0.0075*	



Variable	por Variable	Correlación	Signif Prob	Plot Corr
NF/Rac	NF 3era	0.5661	0.0093*	
pH 3	NF 2da	-0.5561	0.0109*	
pH 2	pH 1	0.5486	0.0122*	
pH 2	PTF	-0.5485	0.0123*	
pH 2	PSF/PL	-0.5466	0.0126*	
pH 2	PF 3era	-0.5395	0.0141*	
pH 3	pH 2	0.5345	0.0152*	
CE 2	PST	0.5302	0.0162*	
PF 2da	PST	0.5290	0.0165*	
PSF/PL	PS Hojas	0.5271	0.0169*	
CE 1	NF 2da	0.5271	0.0169*	
PF 2da	PS Hojas	0.5229	0.0180*	
CE 2	CE 1	0.5222	0.0182*	
NF/Rac	PF 3era	0.5208	0.0185*	
PF 3era	NF/PL	0.5188	0.0191*	
PTF	PS Hojas	0.5181	0.0193*	
CE 3	PS Hojas	0.5176	0.0194*	
PSF/PL	PST	0.5135	0.0206*	
pH 2	PF 2da	-0.5080	0.0222*	
pH 3	CE 2	-0.5061	0.0228*	
pH 1	CE 2	-0.5052	0.0231*	
PS Raiz	PST	0.5052	0.0231*	
PTF	PST	0.5039	0.0235*	
CE 3	PST	0.5035	0.0236*	
PS Raiz	Alt PL	-0.5001	0.0247*	
CE 1	PF 3era	0.4999	0.0248*	
CE 1	NF 3era	0.4912	0.0278*	
CE 1	PSF/PL	0.4898	0.0284*	
CE 1	PTF	0.4880	0.0291*	
PS Hojas	PS Raiz	0.4879	0.0291*	
NF 3era	Alt PL	-0.4859	0.0299*	
CE 3	PS Raiz	0.4660	0.0384*	
pH 1	NRac/PL	-0.4658	0.0385*	
NF 2da	PS Hojas	0.4628	0.0399*	
NF 2da	PST	0.4568	0.0429*	
PF 3era	Alt PL	-0.4547	0.0440*	
pH 3	PTF	-0.4538	0.0445*	
pH 3	PF 2da	-0.4499	0.0465*	
pH 3	PSF/PL	-0.4498	0.0466*	
NF 3era	NF 1era	-0.4488	0.0471*	
pH 1	NF 3era	-0.4429	0.0505	
CE 1	PF 2da	0.4416	0.0513	
pH 3	NRac/PL	-0.4411	0.0515	
CE 2	NF/PL	0.4396	0.0524	
pH 2	NRac/PL	-0.4394	0.0526	
CE 2	Grosor Tallo	0.4324	0.0569	
PF 3era	PF 1era	-0.4316	0.0574	
PF 3era	NF 1era	-0.4232	0.0630	
CE 1	PS Hojas	0.4190	0.0659	
NF/PL	PS Hojas	0.4185	0.0663	
CE 2	NF 2da	0.4171	0.0673	
Grosor Tallo	PS Hojas	0.4131	0.0702	
CE 3	PF 3era	0.4096	0.0729	
PF 1era	NF 3era	-0.4083	0.0739	
PS Tallo	PS Raiz	0.4027	0.0784	

Variable	por Variable	Correlación	Signif Prob	Plot Corr
CE 3	NF/PL	0.4006	0.0800	
CE 1	Alt PL	-0.3976	0.0825	
NRac/PL	PS Tallo	0.3960	0.0839	
pH 2	NF 1era	0.3913	0.0880	
CE 2	PSF/PL	0.3889	0.0902	
PF 1era	Alt PL	0.3875	0.0914	
NF/PL	PST	0.3855	0.0933	
NF 1era	Alt PL	0.3854	0.0933	
CE 2	PTF	0.3837	0.0949	
CE 1	PST	0.3837	0.0949	
CE 3	NF 3era	0.3821	0.0964	
PF 1era	PS Tallo	0.3807	0.0977	
CE 1	NF/Rac	0.3768	0.1015	
pH 1	PF 3era	-0.3767	0.1016	
Grosor Tallo	PST	0.3754	0.1029	
PF 1era	PSF/PL	0.3745	0.1038	
PF 1era	PTF	0.3706	0.1077	
CE 2	PF 2da	0.3597	0.1193	
pH 3	NF 3era	-0.3564	0.1230	
pH 2	CE 1	-0.3524	0.1276	
PF 2da	PF 1era	0.3478	0.1330	
pH 1	CE 1	-0.3476	0.1331	
NF 1era	Grosor Tallo	0.3475	0.1333	
NF 1era	PS Tallo	0.3464	0.1347	
NF/Rac	NRac/PL	0.3438	0.1377	
CE 3	NF 2da	0.3395	0.1431	
pH 1	CE 3	-0.3284	0.1574	
pH 3	CE 3	-0.3173	0.1728	
PF 2da	PS Tallo	0.3151	0.1761	
PF 1era	PS Hojas	0.3128	0.1793	
CE 1	PS Raiz	0.3106	0.1826	
Grosor Tallo	PS Tallo	0.3099	0.1836	
PSF/PL	PS Tallo	0.3089	0.1851	
pH 3	PS Raiz	0.3056	0.1902	
PTF	PS Tallo	0.3009	0.1974	
CE 3	PSF/PL	0.3007	0.1977	
CE 2	PS Raiz	0.3003	0.1983	
pH 3	PF 3era	-0.2978	0.2023	
PF 1era	PST	0.2972	0.2032	
PTF	NF 3era	0.2970	0.2035	
NF 3era	NF 2da	0.2958	0.2054	
CE 3	PS Tallo	0.2932	0.2096	
CE 3	PTF	0.2932	0.2096	
NF 3era	PSF/PL	0.2922	0.2113	
pH 2	CE 3	-0.2893	0.2161	
CE 3	Alt PL	-0.2860	0.2215	
CE 3	NF/Rac	0.2849	0.2234	
PF 1era	Grosor Tallo	0.2826	0.2273	
CE 2	PS Tallo	0.2761	0.2387	
NRac/PL	PS Raiz	0.2751	0.2404	
CE 2	Alt PL	-0.2747	0.2412	
pH 2	PF 1era	0.2714	0.2471	
pH 1	PS Hojas	-0.2703	0.2490	
CE 2	NF/Rac	0.2672	0.2548	
NF 1era	PS Hojas	0.2633	0.2620	

Variable	por Variable	Correlación	Signif Prob	Plot Corr
NF 1era	PST	0.2585	0.2711	
pH 1	Alt PL	0.2540	0.2798	
pH 1	Grosor Tallo	-0.2496	0.2886	
NF 1era	PSF/PL	0.2467	0.2944	
CE 3	PF 2da	0.2451	0.2976	
pH 3	NF 1era	0.2440	0.2999	
PTF	NF 1era	0.2402	0.3078	
PS Hojas	Alt PL	-0.2330	0.3230	
CE 2	NF 3era	0.2329	0.3230	
PF 3era	NF 2da	0.2324	0.3242	
NF 2da	PS Tallo	0.2274	0.3349	
PF 3era	PTF	0.2221	0.3466	
CE 2	PF 3era	0.2208	0.3496	
PF 1era	NF 2da	0.2208	0.3496	
PF 3era	PSF/PL	0.2177	0.3566	
pH 1	PST	-0.2171	0.3579	
PTF	Grosor Tallo	0.2140	0.3649	
NF/Rac	PS Hojas	0.2118	0.3701	
PF 2da	NF 1era	0.2111	0.3716	
Grosor Tallo	PSF/PL	0.2106	0.3728	
pH 2	Grosor Tallo	0.2100	0.3743	
PF 2da	Grosor Tallo	0.2081	0.3785	
NF 2da	Grosor Tallo	0.2078	0.3793	
PF 3era	PS Tallo	-0.2066	0.3822	
NRac/PL	Grosor Tallo	0.2061	0.3834	
NRac/PL	PF 1era	0.2004	0.3970	
PF 3era	PS Raiz	0.1926	0.4159	
NF 3era	PS Raiz	0.1917	0.4183	
CE 1	Grosor Tallo	0.1889	0.4252	
NF 3era	PS Tallo	-0.1789	0.4504	
CE 1	PF 1era	-0.1773	0.4545	
NRac/PL	NF 3era	0.1771	0.4551	
NF/Rac	PS Raiz	-0.1714	0.4701	
PST	Alt PL	-0.1702	0.4731	
pH 3	CE 1	-0.1694	0.4754	
pH 2	Alt PL	0.1690	0.4762	
pH 3	Grosor Tallo	-0.1683	0.4780	
pH 1	PS Raiz	0.1681	0.4787	
CE 1	NF 1era	-0.1624	0.4939	
CE 3	Grosor Tallo	0.1624	0.4940	
pH 2	PS Hojas	-0.1581	0.5056	
CE 3	PF 1era	-0.1555	0.5127	
pH 1	NF 1era	0.1550	0.5140	
NF/Rac	PF 1era	0.1546	0.5151	
NF/PL	PS Tallo	0.1514	0.5240	
PF 2da	NF 3era	0.1444	0.5435	
NRac/PL	NF 1era	0.1443	0.5439	
pH 2	PST	-0.1407	0.5541	
pH 3	PF 1era	0.1403	0.5552	
NF/Rac	PST	0.1378	0.5622	
pH 2	CE 2	-0.1372	0.5640	
NRac/PL	PF 3era	0.1328	0.5767	
NF 2da	PS Raiz	-0.1301	0.5846	
pH 3	PS Hojas	-0.1253	0.5987	
NF/PL	Alt PL	-0.1215	0.6099	

Variable	por Variable	Correlación	Signif Prob	Plot Corr
NF 3era	Grosor Tallo	-0.1096	0.6456	
NF 2da	NF 1era	0.1058	0.6570	
NF 1era	PS Raiz	0.1050	0.6596	
PF 2da	Alt PL	0.1033	0.6647	
NF/PL	Grosor Tallo	0.1033	0.6647	
PF 3era	PST	-0.1025	0.6671	
PF 2da	PS Raiz	-0.0995	0.6763	
PF 1era	NF/PL	0.0984	0.6797	
pH 3	PST	-0.0904	0.7047	
CE 3	NF 1era	-0.0865	0.7168	
pH 2	PS Raiz	0.0863	0.7176	
CE 2	PF 1era	0.0802	0.7367	
pH 3	PS Tallo	0.0752	0.7528	
Grosor Tallo	PS Raiz	0.0715	0.7645	
CE 2	NF 1era	0.0695	0.7710	
NF/Rac	Alt PL	-0.0687	0.7735	
CE 1	PS Tallo	0.0686	0.7738	
pH 2	PS Tallo	-0.0662	0.7816	
pH 3	Alt PL	-0.0654	0.7840	
PF 3era	PF 2da	0.0624	0.7939	
pH 1	PF 1era	0.0558	0.8154	
NF/Rac	NF 1era	0.0557	0.8156	
PF 3era	Grosor Tallo	-0.0545	0.8195	
PF 1era	PS Raiz	0.0541	0.8208	
NF/Rac	Grosor Tallo	0.0538	0.8218	
NF 3era	PST	-0.0525	0.8261	
PTF	Alt PL	0.0505	0.8326	
NF 2da	Alt PL	0.0504	0.8330	
PSF/PL	Alt PL	0.0492	0.8367	
PTF	PS Raiz	-0.0377	0.8745	
NF 1era	NF/PL	-0.0346	0.8850	
PSF/PL	PS Raiz	-0.0308	0.8974	
NF/Rac	PS Tallo	0.0303	0.8990	
PF 3era	PS Hojas	-0.0260	0.9133	
NF 3era	PS Hojas	0.0225	0.9250	
NF/PL	PS Raiz	-0.0222	0.9259	
NRac/PL	Alt PL	0.0171	0.9430	
Grosor Tallo	Alt PL	-0.0129	0.9570	
PS Tallo	Alt PL	-0.0056	0.9814	
pH 1	PS Tallo	-0.0015	0.9949	

La información anterior presenta la alta correlación existente entre muchas variables de respuesta, una gran mayoría de estas se derivan unas de otras lo cual explica su alta correlación. El peso total de frutos (PTF) y el peso seco de frutos por planta (PSF/PL) mostraron la correlación más alta (0.9998), lo cual se atribuye a que el peso fresco de todos los frutos se ve reflejado en el acúmulo de biomasa de los frutos por planta (Salisbury y Ross 1994). El número y peso de los frutos de tercera (NF 3era y PF 3era) presentaron una alta correlación (0.9822),

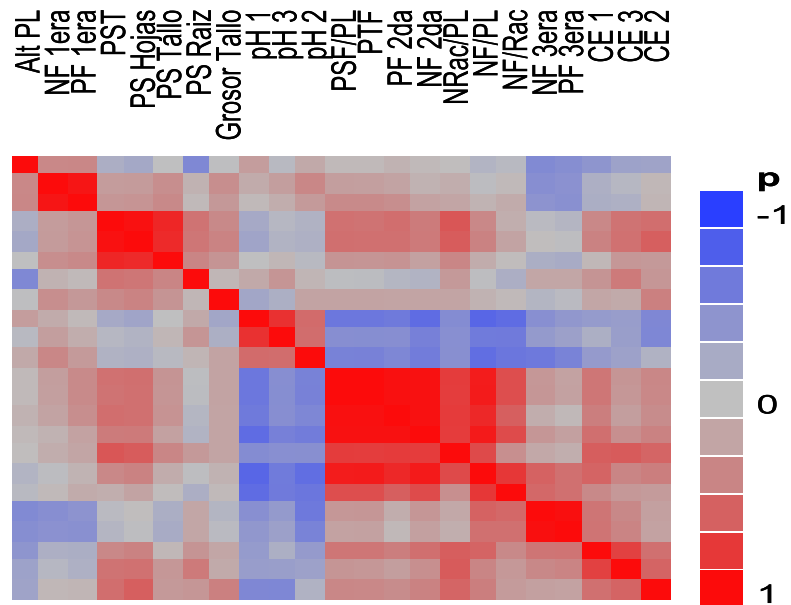
esto resultó tener sentido, debido a que los frutos de esa categoría fueron contados y luego pesados.

El peso de los frutos de segunda (PF 2da) y el peso seco de frutos por planta (PSF/PL) mostró una correlación elevada, 0.9789, lo cual puede deberse a que los frutos de segunda calidad representan la fracción con mayor peso en la variable peso seco de frutos en comparación a las dos restantes categorías, de la misma forma se explica la alta correlación existente entre el PF 2da y el PTF (0.9787).

El peso seco de hojas y el peso seco total (PSH y PST) presentaron al igual que las variables anteriores una alta correlación (0.9745), el peso seco total es el acúmulo de biomasa de toda la planta, por tanto, en él está contenida el peso seco de las hojas (Salisbury y Ross 1994).

La biomasa aérea de la planta está compuesta por el tallo y las hojas, siendo este último un órgano de gran importancia porque en ellas ocurren procesos como la fotosíntesis, transpiración e intercambio gaseoso, además en condiciones óptimas, las hojas representan la mayor cantidad de biomasa que la planta es capaz de producir, por lo cual el peso seco de las mismas se encuentra estrechamente relacionado al peso seco total (Castellanos 2009).

Para facilitar el entendimiento de las correlaciones, gráficamente se muestra el análisis de conglomerado o "cluster", el cual toma las variables más correlacionadas y las agrupa en conglomerados, cada uno de ellos resulta diferente de los demás (Creighton *et al* 2005). La Figura 8 muestra variables como el peso seco de frutos por planta, peso total de frutos, peso y número de frutos de segunda la cuales están agrupadas, es decir se encuentran correlacionadas entre sí, igualmente, el peso seco de hojas, peso seco de tallo y peso seco total se agruparon en un conglomerado más pequeño a la izquierda de la figura. Se muestra claramente la independencia de los conglomerados, donde hay variables sumamente correlacionadas y en grupos separados.



**Figura 8.** Conglomerado de correlaciones para veintitrés variables de respuesta en plantas de tomate en un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos, 2011.

Según Johnson (1998), cuando en una unidad experimental se evalúan más de dos variables se obtienen datos de variables múltiples, en estos casos los métodos multivariados resultan ser muy útiles para el análisis del conjunto de datos obtenido. Las técnicas multivariadas, en nuestro caso, las dirigidas por las variables, se enfocan en las relaciones que pueden existir entre las variables de respuesta que se están midiendo y pueden dar a conocer la información realmente valiosa después de haber examinado los datos.

Para determinar el efecto del uso del compost como sustrato en el cultivo protegido de tomate se midieron veintitrés variables de respuesta. Sin embargo, del total de variables no es posible inferir cuáles aportan más a la variabilidad del sistema y cuáles no. Con el fin de reducir la dimensión de la variabilidad se procedió a elaborar un análisis multivariado denominado análisis de componentes principales (ACP), el cual reduce el total de variables a un nuevo número menor

de variables no correlacionadas, otorgando más importancia a las variables que representan la mayor parte de la variabilidad, de tal forma se mantiene la información relevante (Rodríguez 2009).

Terrádez (s.f.) menciona que éste análisis de la información cumple con el principio de parsimonia, donde se busca explicar el máximo de la información con la menor cantidad de elementos, manteniendo la mayor parte de la varianza del conjunto inicial con la menor pérdida de información. Así, los componentes principales capturan un máximo porcentaje de la variabilidad en el menor número de componentes posibles, siendo estos ortogonales, es decir, independientes entre sí.

El ACP según Johnson (1999) permite la transformación de un conjunto de variables de respuesta correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. Al estandarizar las variables se le otorga a cada una un valor máximo de 1, por lo tanto la varianza en nuestro caso es igual al número total de variables, veintitrés. Al efectuar el análisis se obtuvo que la varianza adjunta en veintitrés variables fue explicada en 19 componentes principales como se muestra en el Cuadro 16 donde se presentan los valores que representan el peso que tiene cada componente dentro del total de la varianza obtenida y se denomina eigen-valor.

**Cuadro 16.** Proporción de la varianza contenida en diecinueve componentes principales para veintitrés variables de respuesta, medidas en plantas de tomate en un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, 2011.

<b>Componente principal (CP)</b>	<b>Eigen-valor</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Porcentaje acumulado</b>
1	9.3693	40.736	40.736
2	4.3862	19.07	59.806
3	3.1851	13.848	73.655
4	1.3866	6.029	79.683
5	1.2022	5.227	84.91
6	0.9587	4.168	89.078
7	0.722	3.139	92.218
8	0.5781	2.513	94.731
9	0.3886	1.689	96.42
10	0.2927	1.272	97.693
11	0.2137	0.929	98.622
12	0.1277	0.555	99.177
13	0.0576	0.251	99.428
14	0.0548	0.238	99.666
15	0.0352	0.153	99.819
16	0.0262	0.114	99.933
17	0.0138	0.06	99.993
18	0.001	0.004	99.998
19	0.0005	0.002	100

*Fuente: el autor*

De tal forma, la mayor proporción posible de la información se explica en el primer componente que presentó un eigen-valor de 9.3693, en el segundo componente se explica un valor menor (4.3862) y así sucesivamente este va disminuyendo en cada componente.

Se seleccionaron los tres primeros componentes principales ya que estos abarcaban más de un 70% de la variabilidad total, se obtuvo un eigen-valor 16.94 que corresponde a un 73,65% de la variabilidad (Cuadro 16).



Cada variable tiene un peso dentro de cada componente. El aporte de cada una de ellas a la variabilidad, es dado por el eigen-vector, donde las variables con el eigen-vector mayor permiten describir y darle significado a cada componente esto se presenta claramente en el Cuadro 17.

**Cuadro 17.** Eigen-vectors para cada una de las variables de respuesta en tres componentes principales.

Variable	CP 1	CP 2	CP 3
Alt PL	-0.05671	0.17403	-0.36763
PST	0.2016	0.27264	0.23877
PS Raíz	0.04642	0.10127	0.45262
PS Hojas	0.21292	0.25288	0.24673
PS Tallo	0.1204	0.3131	0.19208
PSF/PL	0.2981	0.07084	-0.1685
Grosor Tallo	0.09096	0.19151	0.06753
NF/PL	0.3072	-0.09145	-0.1122
NF 1era	0.01929	0.37949	-0.1297
NF 2da	0.3002	0.01806	-0.18165
NF 3era	0.15593	-0.34442	0.12837
PTF	0.29755	0.06709	-0.1723
PF 1era	0.05193	0.37155	-0.18611
PF 2da	0.284	0.0983	-0.19488
PF 3era	0.13542	-0.34355	0.14797
NRac/PL	0.27348	0.10572	0.0464
NF/Rac	0.23855	-0.13345	-0.18053
CE 1	0.21694	-0.09169	0.22725
CE 2	0.20336	0.05399	0.20204
CE 3	0.19141	-0.03324	0.31338
pH 1	-0.24393	0.14046	0.1106
pH 2	-0.20697	0.23181	0.07281
pH 3	-0.19627	0.1581	0.16194

*Fuente: el autor*

En el presente ensayo se seleccionaron las variables representativas con los eigen-vectors más elevados en los tres primeros componentes, estos se muestran en el siguiente cuadro.

**Cuadro 18.** Variables representativas de tres componentes principales, en un ensayo para el cultivo de tomate, San Carlos, Alajuela, 2011.

<b>Componente</b>	<b>Variables</b>
<b>CP 1</b>	NF/PL
	NF 2da
	PSF/PL
	PTF
<b>CP 2</b>	NF 1era
	PF 1era
	NF 3era
	PF 3era
	PS Tallo
	PST
	PS Hojas
<b>CP 3</b>	PS Raíz
	CE 3

*Fuente: el autor*

Las variables que abarcan la mayor variabilidad en el primer componente son cuatro: número de frutos por planta (NF/PL), número de frutos de segunda (NF 2da), peso seco de frutos por planta (PSF/PL), y el peso total de frutos (PTF). Al observar las variables de mayor relevancia en este componente, es posible decir que en él se explica la producción de frutos, ya que todas las variables están asociadas a la parte productiva. Se observa que el número de frutos de segunda tiene gran peso en este componente, esto puede deberse a que del total de frutos obtenidos en el estudio, la mayor cantidad corresponde a frutos de segunda calidad (Cuadro 14). El peso total de frutos y el peso seco de frutos por planta son dos variables que mostraron tener peso en este componente.

Por su parte el segundo componente agrupa las variables peso seco total (PST), peso seco de hojas (PSH), peso seco de tallos (PS tallo), número de frutos de primera (NF 1era), número de frutos de tercera (NF 3era), peso de frutos de primera (PF 1era) y peso de frutos de tercera (PF 3era) como se observa en el Cuadro 18. El PS tallo y PSH son variables de alto peso en este componente, así como también lo es el peso seco total, el cual incluye las dos variables anteriores, estas tres explican el crecimiento vegetativo. Además parte del comportamiento productivo de la planta es explicado mediante las variables número y peso de los frutos de primera y tercera calidad, lo cual no fue explicado en el primer componente. Por ello este componente tiene un significado mixto, explicando el aumento en producción en términos del crecimiento vegetativo.

Galvez y Peil (2005) mencionan que los asimilados, producidos por la fotosíntesis en los órganos “fuente” (principalmente las hojas), pueden ser almacenados o distribuidos vía floema entre los diferentes órganos “sumideros” de una planta. Por tanto el aumento en el peso seco vegetativo pudo incrementar la producción de frutos de primera en peso y cantidad, a la vez que disminuyó el número y peso de los frutos de tercera categoría, ya que estas dos últimas variables tenían gran peso en este componente pero mostraron una correlación inversa respecto a las demás variables representativas.

Tanto para el primero y segundo componentes, el peso seco fraccionado mostró ser importante para explicar el crecimiento y la producción. Heuvelink (1995) demostró como la partición de la materia seca permite explicar la distribución de la biomasa en los órganos vegetativos y productivos.

En el componente principal tres, las variables más importantes son el peso seco de la raíz (PS Raíz) y la conductividad eléctrica de los sustratos al final del ciclo del cultivo (CE 3), por lo cual este último componente explica básicamente crecimiento radical en asocio con la salinidad de los sustratos al final del ciclo.

Se ha determinado que existe una gran relación entre el crecimiento radical y la carga iónica presente en los sustratos de cultivo, Al-Karaki citado por Goykovic y Saavedra (2007) encontró que el aumento de la concentración de sal afectaba adversamente el crecimiento de las raíces, cuantificado como materia seca. Por su parte Almasoum citado por Goykovic y Saavedra (2007) mencionan que el efecto de las sales en las raíces de las plantas de tomate siempre resulta en un menor crecimiento de estos órganos, lo cual puede afectar el crecimiento de la planta al reducirse el volumen de suelo que pueden explorar sus raíces. Shannon y Grieve citados por Galvez y Peil (2005) explican que las sales afectan el crecimiento al alterar la absorción de agua por las raíces, y llaman a este fenómeno “componente osmótico”, y sería el efecto inicial que padecen las plantas, en nuestro caso los niveles de conductividad que se manejaron dieron origen a un aumento en la biomasa acumulada en la raíz al incrementar la conductividad eléctrica.

Al abordar el análisis de esta manera se muestra como cada componente es independiente de los demás, es decir, no están correlacionados entre sí. Por consiguiente, los tres componentes principales seleccionados para explicar la mayor parte de la varianza en el presente ensayo tienen un significado individual, se determinó que el primer componente explica la producción en términos de peso y número de frutos, por su parte, el segundo componente explica el crecimiento vegetativo y productivo, donde al aumentar la masa vegetativa se incrementan los frutos de primera y se disminuyen los frutos de tercera, estos últimos tienen gran aporte en este componente pero de forma negativa. Y el tercer componente se expresa en términos del acúmulo de biomasa radical y su relación con la conductividad eléctrica de los sustratos al final del ciclo del cultivo.

Una vez seleccionadas las variables de mayor peso en cada componente, se efectuó un análisis univariado (ANDEVA) para estas, en asocio con los tratamientos donde se utilizó compost como sustrato, con la finalidad de ver si existía entre ellos diferencias estadísticamente significativas, esto se muestra en el cuadro 19.

**Cuadro 19.** Significancia estadística para cada una de las variables relevantes en los tres componentes principales según el análisis de varianza ( $p=0,05$ ), 2011.

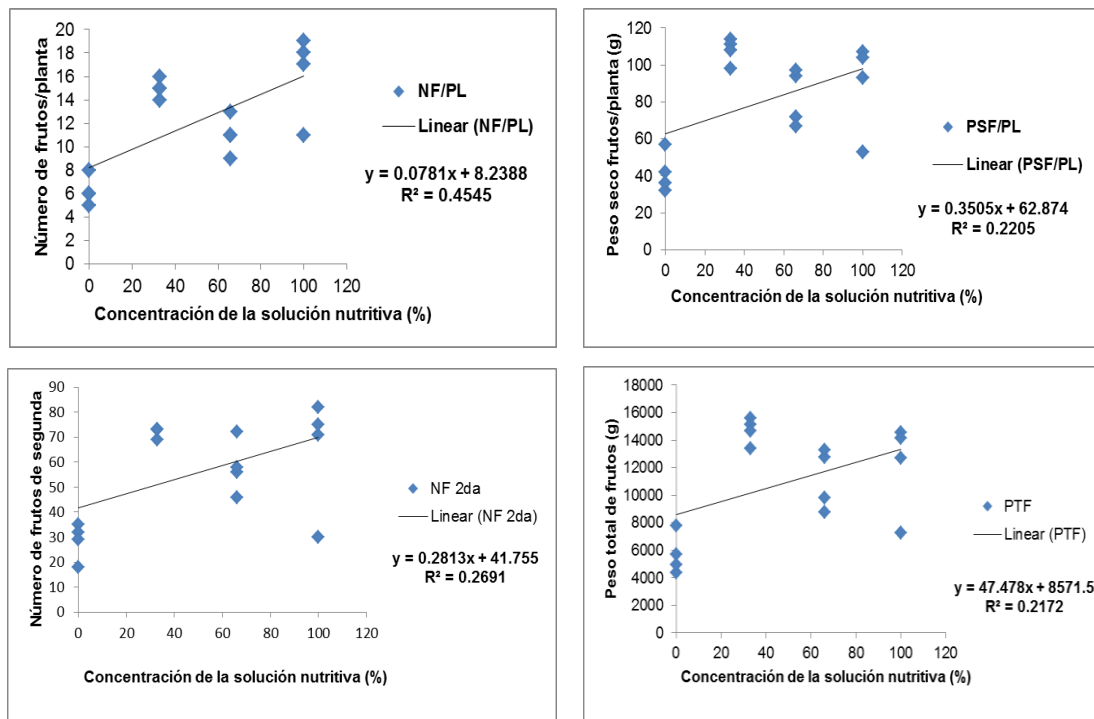
CP 1				CP 2							CP 3	
PSF/PL	NF/PL	NF 2da	PTF	PS Tallo	PSH	NF 1era	PST	NF 3era	PF 1era	PF 3era	PS Raiz	CE3
*	*	*	*	NS	*	NS	*	*	NS	*	NS	*

Fuente: el autor (\*: presenta diferencias significativas, NS: no presenta diferencias significativas)

De acuerdo al análisis de varianza se obtuvo que para el primer componente las cuatro variables de mayor peso, presentaron significancia estadística, no así en el segundo componente, donde el número y peso de los frutos de primera así como el peso seco de tallo, variables con gran aporte a la variabilidad en este componente no resultaron ser significativas. En el tercer componente solamente la CE 3 mostró diferencias significativas entre los tratamientos.

Se efectuaron análisis de regresión lineal para las variables representativas que mostraron significancia estadística en cada componente (Figuras 9, 10 y 11), con el fin de comparar las variables con los tratamientos continuos donde se utilizó compost como sustrato, el tratamiento con arena roja fue excluido de este análisis.

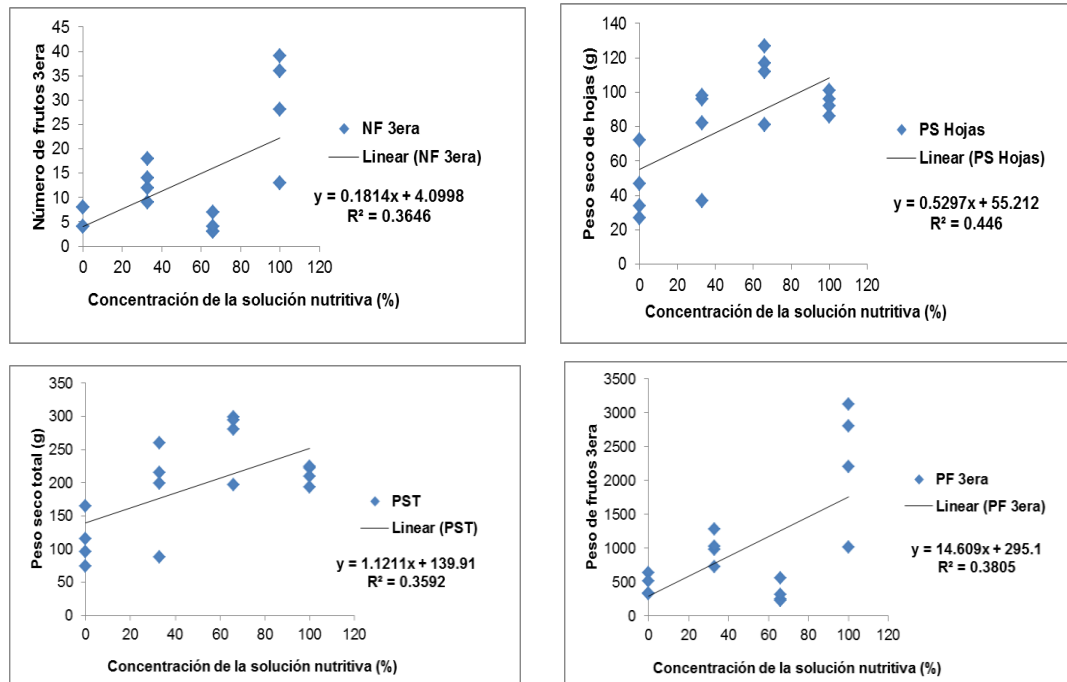
Mediante este análisis se demostró que hay una tendencia lineal creciente entre los tratamientos y las variables, sin embargo, no existe un comportamiento claro de las variables de respuesta respecto a los niveles.



**Figura 9.** Regresiones lineales para las variables que presentaron significancia estadística en el componente principal uno contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.

La Figura 9 muestra una tendencia lineal creciente para las cuatro variables que presentaron significancia en el primer componente. La regresión para el número de frutos por planta y los tratamientos mostró el valor más elevado, el comportamiento de esta variable llama la atención, ya que al suministrar la solución nutritiva al 33% se obtuvo un mayor número de frutos que a una concentración al 66%. Mientras que los tratamientos al 33% y 100% mostraron tener una cantidad similar de frutos por planta, es decir, se encontró que es posible obtener casi el mismo número de frutos con una tercera parte de los nutrientes que normalmente se suministran en la solución para el cultivo de tomate, lo cual resulta importante en cuanto a la disminución de costos de producción.

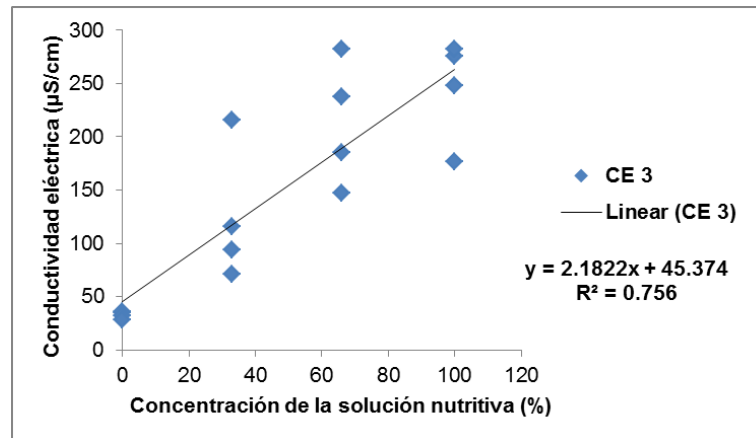
En las cuatro variables representativas para el componente uno, se observó que el tratamiento compost al 33% de la solución, mostró un comportamiento similar cuando se empleó compost al 100% de la solución. Por lo cual la cantidad de nutrientes que aporta el compost, aunque no es suficiente si suministra una cantidad importante que al parecer es aprovechada por el cultivo.



**Figura 10.** Regresiones lineales para las variables que presentaron significancia estadística en el segundo componente principal contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, San Carlos, Alajuela, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2011.

La figura 10 muestra que para el segundo componente, la mejor regresión ( $R^2=0,446$ ) se obtuvo para la variable peso seco de hojas. Se observa que en el tratamiento donde se suministró la solución al 66% se presentó el mayor acúmulo de materia seca en hojas respecto a los demás tratamientos, parece ser que la distribución de la materia seca en la planta para este tratamiento no es coincidente con una adecuada relación fuente sumidero, si esto lo asociamos con las regresiones para las variables que mostraron significancia en el primer

componente (cuadro 9). Heuvelik (1995) reportó que después de los 95-100 días del trasplante en varios experimentos un 54-60% de la materia seca es distribuida en los frutos, un 28-33% se acumula en hojas y un 12-13% en tallos.



**Figura 11.** Regresión lineal para la variable conductividad eléctrica al final del ciclo del cultivo, la cual mostró significancia estadística en el tercer componente principal contra los cuatro niveles de solución nutritiva evaluados en plantas de tomate bajo un sistema hidropónico abierto, Santa Clara, San Carlos, 2011.

La conductividad eléctrica del sustrato fue la única variable cuyos datos mostraron un mejor ajuste a la ecuación de regresión lineal con un  $R^2$  de 0,756 (figura 11), se observó que conforme se aumentó la concentración de la solución nutritiva se incrementaba la conductividad eléctrica, presentándose un acúmulo de sales en los sustratos en proporción a la dosis de sales que fue suministrada. Sin embargo con el suministro de la solución al 66% se obtuvo una conductividad eléctrica similar a la del 100%.

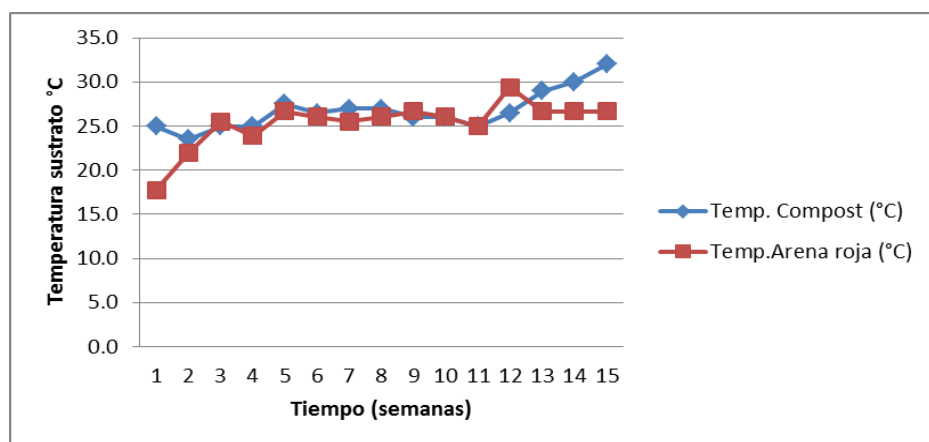
El sustrato arena roja se utilizó como testigo relativo, ya que este es uno de los sustratos más empleados en la producción de tomate bajo ambiente protegido. Se pretendía comparar el efecto del uso de compost y arena roja sobre las plantas a una dosis al 100% de la solución nutritiva. Por lo cual se realizaron contrastes ortogonales para los tratamientos arena roja y compost, cada sustrato con una concentración de la solución nutritiva al 100%. Demostrando así que no se



presentó diferencias estadísticamente significativas entre el uso de arena roja y el compost a diferentes concentraciones de solución nutritiva. Esto confirma que el tratamiento compost con un nivel de la solución al 100% no fue el mejor (Ver Anexos del 16 al 28).

Los sustratos empleados en este ensayo presentaron características similares en cuanto a sus propiedades físicas, sin embargo el análisis químico demostró diferencia entre ellos. La técnica de pasta saturada consiste en saturar el sustrato con agua y extraer los nutrientes que se encuentran en solución (Basaure 2006), hecho que no es real a lo ocurrido en el contenedor, ya que el riego se aplica en forma localizada y nunca se presenta saturación del medio, por ello este elevado valor de conductividad no se ve reflejado al final del ciclo en el sustrato.

En la Figura 13 se observan las temperaturas que fueron tomadas semanalmente en ambos sustratos donde se suministró la solución nutritiva a una concentración al 100%, durante el ciclo del cultivo de tomate.



**Figura 12.** Temperaturas registradas semanalmente para los sustratos utilizados, con un suministro de la solución nutritiva al 100%, durante el ciclo del cultivo de tomate, 2011.

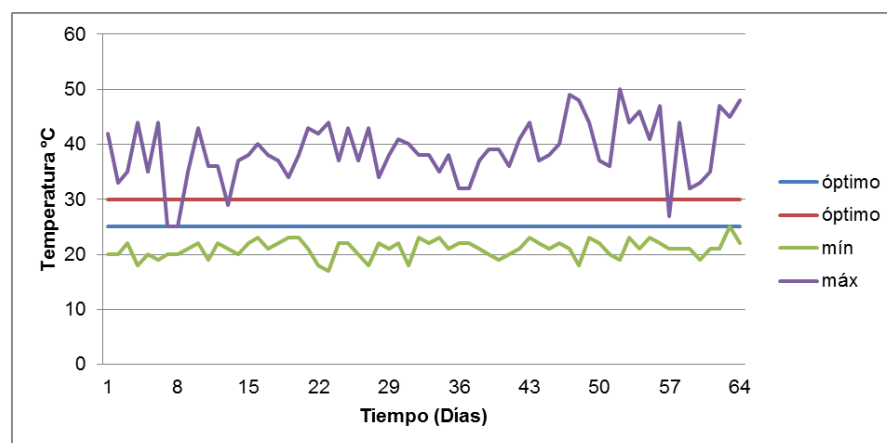
La óptima temperatura del sustrato como lo menciona Harssema citado por Benton Jones (2009), debe estar entre 20 a 30 °C. Sin embargo elementos como

el potasio, nitrato, calcio y el hierro son de difícil acceso para la planta cuando el sustrato presenta temperaturas entre el rango anterior.

Las temperaturas obtenidas para ambos sustratos donde se suministró la solución nutritiva al 100% (T4 y T5) durante quince semanas se encuentran muy cerca de los rangos deseados, la arena roja mostro una temperatura inferior a la óptima en la primer semana mientras que el compost excedió en dos grados el rango óptimo para la última semana. Gil et al. (2000) mencionan que la mayor actividad fotosintética y producción de fruto ocurren cuando en el suelo hay una temperatura entre 25 y 30 °C.

En la última semana se incrementó la temperatura del compost en dos grados.

La Figura 13 muestra las temperaturas máximas y mínimas acumuladas registradas dentro del invernadero en sesenta y cuatro tomas de datos equidistantes, a lo largo de las quince semanas que se mantuvo el cultivo de tomate.



**Figura 13.** Temperaturas máximas y mínimas obtenidas dentro del invernadero donde se desarrolló el experimento y rango óptimo de temperaturas para el cultivo del tomate según Castellanos (2009).

Gil *et al.* (2000) establece que se aceptan temperaturas en el día de 22 a 31 °C y de 13 a 18 °C durante la noche. Castellanos (2009) menciona que temperaturas por encima de los 30 °C durante largos periodos agobian las plantas y ocasionan desordenes fisiológicos en el fruto. La figura 13 muestra que las temperaturas mínimas registradas durante el ciclo del cultivo se aproximan a las óptimas, contrario a lo ocurrido con las temperaturas máximas, donde estas sobrepasan el rango óptimo esperado, se obtuvo valores acumulados de hasta 50 °C, lo cual pudo interferir en el normal crecimiento y desarrollo de las plantas.

## 5. CONCLUSIONES

Según las condiciones experimentales en las que se llevó a cabo el presente estudio se concluye que:

- Los dos sustratos empleados presentaron propiedades físicas similares, con excepción de la capacidad de aireación y el agua fácilmente disponible que no se encuentran dentro de los rangos óptimos propuestos, el compost difiere de la arena roja al presentar una mayor capacidad de aireación.
- La arena roja mostró ser un sustrato químicamente inerte, mientras que el compost presentó cierto aporte nutricional según el análisis químico efectuado, la carga iónica y el pH se ven influenciados por el potasio, ya que este nutriente excedió los rangos óptimos propuestos.
- La carga iónica presente en el compost, según el análisis químico efectuado, sobrepasó los niveles óptimos recomendados para la mayoría de los nutrientes.
- El compost mostró una gran actividad biológica, según el análisis microbiológico se presentaron hongos, bacterias y actinomicetes, estos últimos organismos aparecen al final de proceso de compostaje, lo cual indica que se empleó un material que alcanzó la madurez para su uso, la arena roja por su parte no mostró gran actividad biológica.
- Las variables representativas que presentaron significancia estadística (PSF/PL, NF/PL, NF 2da, PTF, PSH, PST, NF 3era, PF 3era y CE3) y los tratamientos, mostraron una tendencia lineal creciente, sin embargo, no hay un ajuste de los datos a la ecuación de regresión obtenida.

- La conductividad eléctrica al final del ciclo del cultivo (CE 3), fue la única variable cuyos datos mostraron un mejor ajuste a la ecuación de regresión lineal con un  $R^2$  de 0,756.
- Las variables pH1, pH2 y pH3 según el análisis estadístico efectuado no mostraron tener gran aporte a la variabilidad en este experimento.
- Al comparar el efecto del uso de compost y arena roja sobre las variables de respuesta (PSF/PL, NF/PL, NF 2da, PTF, PS Tallo, PSH, NF 1era, PST, NF 3era, PF 1era, PF 3era, PS Raíz y, CE3) a una dosis al 100% de la solución nutritiva mediante contrastes ortogonales, se encontró que no hay diferencias significativas entre los sustratos, demostrando así, que no hay efecto de los sustratos sobre las variables de respuesta.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Es necesario evaluar en futuros ensayos el contenido nutricional del follaje de las plantas que se desarrollen en compost como sustrato.
- Sería recomendable realizar análisis químicos a los sustratos antes y después del ensayo con el fin de ver el aporte de cada uno, así como cuanto de lo que fue suministrado es aprovechado por la planta y cuanto queda en el sustrato.
- Se recomienda llevar a cabo varios ciclos de cultivo para evaluar si en el caso del compost se da una mayor liberación de los nutrientes.
- Resulta importante efectuar un ensayo en el cual se utilice un diseño factorial para ver no solo el efecto de los niveles sino también el efecto del compost y otro sustrato de tipo inorgánico.

## **7. BIBLIOGRAFÍA**

- Alcorta, E; Muñoz, S y Rodríguez, H. 2006. El tomate rojo: sistema hidropónico. 1 ed. Editorial Trillas S.A. México D.F. 82 p.
- Alpizar, L. 2008. Hidroponía: cultivo sin tierra. 1ed. Editorial tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 108p.
- Ansorena, J. 1994. Niveles óptimos para las propiedades físicas de un sustrato de cultivo. (en línea). Consultado el 20 set. 2011. Disponible en <http://www.fraisoro.net/FraisoroAtariaDoku/recomenvaloresoptimossustratos.pdf>
- Baixauili, C y Aguilar, J. 2000. Cultivo sin suelo de Hortalizas (en línea). Valencia, España. Consultado 13 Oct. 2011. Disponible en <http://www.ivia.es/sdta/pdf/libros/n53.pdf>
- Barbado, J. 2005. Hidroponía (en línea). 1ed. Buenos Aires, Argentina. Consultado 15 mayo. 2010. Disponible en <http://books.google.co.cr/books>
- Bargueño, H. 1996. La fertirrigación: los elementos minerales de la fertilización y su relación suelo-planta, dosificación y tiempo de aplicaciones de los elementos fertilizantes. BURSAG, S.C. Sinaloa, México.
- Barquero, G. 2003. Principios para la producción agrícola en invernaderos: experiencias en Costa Rica. 1 ed. San José, Costa Rica. Mundo gráfico. 134 p.
- Basaure, P. 2006. Métodos usuales en análisis de laboratorio (en línea). Consultado 20 oct. 2011. Disponible en <http://www.manualdelombricultura.com/foro/mensajes/11023.html>
- Calderón, A. s.f. Propiedades físicas de los sustratos (en línea). Proyecto Fondef. Facultad de Ciencias. Agronómicas, Universidad de Chile. Consultado 12 oct. 2011. Disponible en [http://www.biosustratos.cl/pdf/Propiedades\\_fisicas\\_Sustratos.pdf](http://www.biosustratos.cl/pdf/Propiedades_fisicas_Sustratos.pdf)
- Calderón, S y Cevallos, F. 2001. Los sustratos (en línea). Doctor Calderón laboratorios Ltda. Bogotá, Colombia. Consultado 25 abr. 2010. Disponible en [http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los\\_Sustratos.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Publicaciones/Los_Sustratos.htm)
- Cámara de Insumos Agropecuarios 2010. Consultado 20 marzo. 2011. Disponible en <http://www.insumos.cr/>

- Cano, P; Márquez, C y Rodríguez, N. 2008. Uso de sustratos orgánicos en la producción de tomate en invernadero. *Agricultura técnica en México*. 34(1): 69-74.
- Casseres, E. 1980. Producción de hortalizas. 3 ed. IICA. San José, Costa Rica. 392p.
- Castellanos, JZ. 2009. Manual reproducción de producción de tomate en invernadero. Guanajuato, Mexico. 458p.
- Castilla, N. 2004. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Mundi-Prensa S.A. Barcelona, España. 462 p.
- CORPOICA (Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria) *sf.* producción de abonos orgánicos de buena calidad (en línea). Bogotá, Colombia. Consultado 02 jun. 2010. Disponible en <http://books.google.co.cr>
- Creighton, L; Lehman, A y Sall, J. 2005. JMP Start Statistics. Third edition. Thomson Brooks/Cole. U.S. 560 p.
- Escalante, E y Sánchez, F. 1988. Hidroponía: principios y métodos de cultivo. 3era ed. Imprenta Universitaria de la UACH. (Universidad Autónoma de Chapingo). México. 194p.
- Florian, P. 1997. Sustratos: Propiedades, ventajas y desventajas. Conferencia Internacional en Hidroponía comercial. IVIA (Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias). Valencia España.
- Galvez, J y Peil, R. 2005. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de fruto cultivadas en invernadero. *Agrociencia, Brasil* 11(1): 05-11.
- Gil, I; Sánchez, F y Miranda, I. 2000. Producción de Jitomate en hidroponía bajo invernadero. Universidad Autónoma de Chapingo. AGRIBOT. Chapingo México. 90 p.
- Goykovic, V y Saavedra, G. 2007. Algunos efectos de la salinidad en el cultivo del tomate y practicas agronómicas de su manejo. *IDESIA*. 25(3): 47-58.
- Heuvelink, E. 1995. Growth, development and yield of a tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae* 6(1): 77-99.



- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). 2001. Abonos orgánicos para una producción sana. Editorial del Norte. San José. Costa Rica. 24p. Consultado 02 junio. 2010. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/27133503/ABONOS-ORGANICOS>
- Mazuela, P y Urrestarazu, M. 2004. Ventajas del compost frente a otros sustratos en cultivo sin suelo (en línea). Vida Rural. Almería, España. Consultado 15 abr. 2010. Disponible en [http://www.mapa.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_vrural/Vrural\\_2004\\_199\\_28\\_31.pdf](http://www.mapa.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_vrural/Vrural_2004_199_28_31.pdf)
- Mora; L. 1999. Sustratos para cultivo in suelo o hidroponía (en línea). Indagro. San Jose, Costa Rica. Consultado 13 abril. 2011. Disponible en [http://www.mag.go.cr/congreso\\_agronomico\\_xi/a50-6907-III\\_095.pdf](http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_095.pdf)
- Morán, D. 2002. Evaluación técnica y económica de cuatro programas de fertilización y dos sustratos en cultivo de melón (*Cucumis melo*) bajo macrotúnel en Zamorano (en línea). Tesis Lic. Carrera de ciencia y producción agropecuaria del Zamorano. Consultado 15 mayo. 2010. Disponible en [http://zamo-oti-02.zamorano.edu/tesis\\_infolib/2002/T1568.pdf](http://zamo-oti-02.zamorano.edu/tesis_infolib/2002/T1568.pdf)
- Navarro, M. 2002. Nutrición vegetal balanceada y riego por goteo en cultivos hortícolas (en línea). Consultado 20 oct. 2011. Disponible en <http://www.uaaan.mx/academic/Horticultura/Memhort02/Ponencia01.pdf>
- Nuez, F. 1995. El cultivo del tomate (en línea). 1 ed. Ediciones Mundi- Prensa, México. Consultado 1 mayo. 2010. Disponible en <http://books.google.co.cr/books>
- Nuez, F. comp. *sf.* El cultivo del tomate: necesidades climáticas (en línea). Consultado 05 mar.2011. Disponible en: <http://www.corpoica.org.co/sitioweb/Archivos/Foros/Cultivodeltomateynecesidadesclimaticas.pdf>
- Palma, H. 2005. Evaluación de cinco sustratos para la producción de pilones de papaya (*Carica papaya*), bajo condiciones de invernadero en la aldea el Subin, La Libertad, El Peten (en línea). Tesis de Lic. Facultad de Agronomía Universidad de San Carlos de Guatemala. Consultado 15 abril. 2010. Disponible en [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2208.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2208.pdf)

- Resh, H. 2001. Cultivos hidropónicos (en línea). 5 ed. España. Consultado 20 mayo. 2010. Disponible en [http://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=O74no8Jcz8IC&oi=fnd&pg=PA7&dq=+cultivos+de+hortalizas+en+invernaderos&ots=UBQWHmkqep&sig=0xTZdhP6JrfYbF\\_ILPdvIFPtANk#v=onepage&q=cultivos%20de%20hortalizas%20en%20invernaderos&f=false](http://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=O74no8Jcz8IC&oi=fnd&pg=PA7&dq=+cultivos+de+hortalizas+en+invernaderos&ots=UBQWHmkqep&sig=0xTZdhP6JrfYbF_ILPdvIFPtANk#v=onepage&q=cultivos%20de%20hortalizas%20en%20invernaderos&f=false)
- Rey, M. s.f. Organismos que interfieren en el compostaje (en línea). Consultado 25 set. 2011. Disponible en [http://www.compostadores.com/repositorio/Organismos\\_intervienen\\_compostajenl.pdf](http://www.compostadores.com/repositorio/Organismos_intervienen_compostajenl.pdf)
- Rodríguez; O. 2009. Análisis de Componentes Principales. (en línea). Consultado 23 oct. 2011. Disponible en [http://www.oldemarrodriguez.com/yahoo\\_site\\_admin/assets/docs/cap2.143111051.pdf](http://www.oldemarrodriguez.com/yahoo_site_admin/assets/docs/cap2.143111051.pdf).
- Salisbury; F y Ross; C. 1994. Fisiología Vegetal. Cuarta edición. Grupo Editorial Iberoamérica S.A. México D.F. 759 p.
- Sánchez, F. 2005. Diplomado Internacional en Horticultura Protegida. Universidad Autónoma de Chapingo. México, DF.
- Santiago, J; Mendoza, M y Borrego, F. 1998. Evaluación de Tomate (*Lycopersicon esculentum*, MILL) en invernadero: criterios fenológicos y fisiológicos. Agronomía Mesoamericana 9(1): 59-65.
- Soto G. 2003. Abonos Orgánicos: el proceso de compostaje (en línea) CATIE/GTZ/UCR/CANIAN. Consultado 30 oct. 2011. Disponible en <http://www.bcienegociosverdes.com/Almacenamiento/Biblioteca/77/archivo.pdf>
- Stoffela, P y Kahn, B. 2004. Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola (en línea). Mundi-Prensa. D.F. México. Consultado 02 junio.2010. Disponible en [http://books.google.co.cr/books?id=qiVQOERQSOIC&pg=PA34&dq=proceso+de+compost&hl=es&ei=9acGTNihCYK88gbow42QDA&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=2&ved=0CC4Q6AEwAQ#v=onepage&q=proceso%20de%20compost&f=false](http://books.google.co.cr/books?id=qiVQOERQSOIC&pg=PA34&dq=proceso+de+compost&hl=es&ei=9acGTNihCYK88gbow42QDA&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CC4Q6AEwAQ#v=onepage&q=proceso%20de%20compost&f=false)

Terrádez; M. s.f. Análisis de principales. Componentes (en línea). Consultado 13 oct.2011. Disponible en [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes\\_principales.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf)

Urrestarazu, M. 2003. Tratado de cultivo sin suelo (en línea). 2da ed. Consultado 20 mayo. 2010. Disponible en <http://books.google.co.cr/books?id=Wt4T63yT1VYC&printsec=frontcover&dq=Tratado+de+cultivo+sin+suelo.&cd=1#v=onepage&q&f=false>

Vargas, F. 2011. Comunicación personal. Coopepalmares R.L.

## 8. ANEXOS

***ANEXO 1. Análisis químico del compost, efectuado bajo la técnica de pasta saturada.***

**INFORME DE ANALISIS MEDIO DE CRECIMIENTO**

FECHA: 2/16/2011

CLIENTE: Carlos Ramírez - I. T. C. R.

PROVINCIA: Alajuela CANTON: San Carlos DISTRITO:

No. LAB.	IDENT. DE CAMPO	mg/L						mg/L				pH	mS/cm Conductividad Eléctrica
		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn		

M-01-11	Abono orgánico, pasta saturada	150.90	79.30	121.76	3379.5	40.77	23.86	19.5	1.91	0.23	1.21	8.69	6.69
---------	-----------------------------------	--------	-------	--------	--------	-------	-------	------	------	------	------	------	------

**ANEXO 2.** Análisis químico de la arena roja, efectuado bajo la técnica de pasta saturada.

**INFORME DE ANALISIS MEDIO DE CRECIMIENTO**

FECHA: 11/8/2011

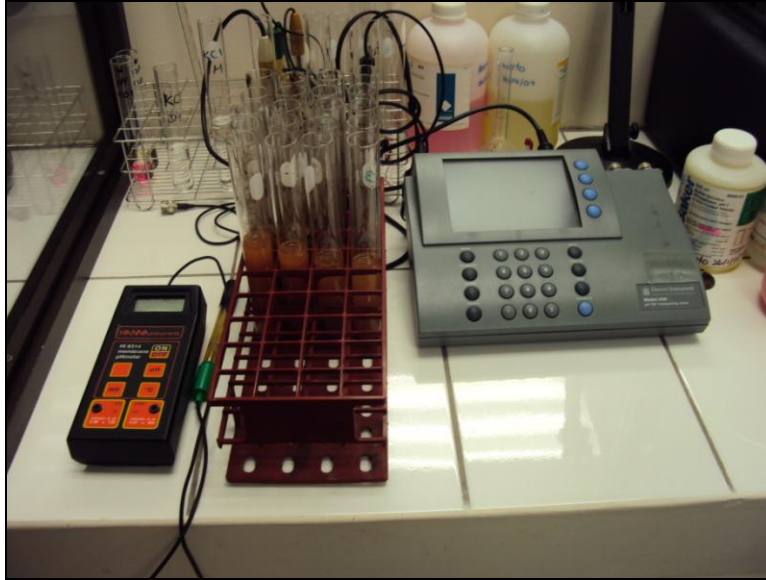
CLIENTE: Carlos Ramírez - I. T. C. R.

PROVINCIA: Alajuela CANTON: San Carlos DISTRITO:

No. LAB.	IDENT. DE CAMPO	mg/L						mg/L				pH	mS/cm Conductividad Eléctrica
		N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn		

M-05-11	Sustrato	1.47	1.19	3.55	Tr	4.64	2.93	3.91	0.05	0.02	0.32	7.2	0.05
---------	----------	------	------	------	----	------	------	------	------	------	------	-----	------

**ANEXO 3.** pH metro y conductímetro utilizados para la medición de pH y conductividad eléctrica de los sustratos.



**ANEXO 4.** *Análisis de varianza para la variable peso seco de frutos por planta en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	9298.188	3099.4	12.1575	0.0006*
Error	12	3059.25	254.94		
C. Total	15	12357.438			

**ANEXO 5.** *Análisis de varianza para la variable número de frutos por planta en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	236.1875	78.7292	18.6158	<.0001*
Error	12	50.75	4.2292		
C. Total	15	286.9375			

**ANEXO 6.** *Análisis de varianza para la variable número de frutos de segunda calidad en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	4353	1451	8.024	0.0034*
Error	12	2170	180.83		
C. Total	15	6523			

**ANEXO 7.** *Análisis de varianza para la variable peso total de frutos en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	172445474	57481825	11.9429	0.0006*
Error	12	57756788	4813065.6		
C. Total	15	230202262			

**ANEXO 8.** *Análisis de varianza para la variable peso seco total en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	49624.688	16541.6	7.0926	0.0054*
Error	12	27986.75	2332.2		
C. Total	15	77611.438			

**ANEXO 9.** *Análisis de varianza para la variable peso seco hojas en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	9051.688	3017.23	7.3888	0.0046*
Error	12	4900.25	408.35		
C. Total	15	13951.938			

**ANEXO 10.** *Análisis de varianza para la variable peso seco tallos en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).*

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	1573	524.333	2.5882	0.1014
Error	12	2431	202.583		
C. Total	15	4004			

**ANEXO 11.** Análisis de varianza para la variable número de frutos de primera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	21.1875	7.0625	1.1812	0.3579
Error	12	71.75	5.97917		
C. Total	15	92.9375			

**ANEXO 12.** Análisis de varianza para la variable número de frutos de tercera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	1526.25	508.75	12.8391	0.0005*
Error	12	475.5	39.625		
C. Total	15	2001.75			

**ANEXO 13.** Análisis de varianza para la variable peso de frutos de primera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	1596848.4	532283	1.164	0.3639
Error	12	5487625.6	457302		
C. Total	15	7084474			

**ANEXO 14.** Análisis de varianza para la variable peso de frutos de tercera en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	9545193	3181731	13.19	0.0004*
Error	12	2894669	241222		
C. Total	15	12439862			

**ANEXO 15.** Análisis de varianza para la variable CE 3 en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	109942.69	36647.6	14.7761	0.0002*
Error	12	29762.25	2480.2		
C. Total	15	139704.94			

**ANEXO 16.** Análisis de varianza para la variable peso seco de raíz en el cultivo de tomate ( $p \leq 0,05$ ).

FV	gl	SC	CM	F	p-valor
Niveles	3	279.5	93.1667	1.1568	0.3664
Error	12	966.5	80.5417		
C. Total	15	1246			

**ANEXO 17.** Contrastes ortogonales para la variable peso fresco de frutos de segunda calidad.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
NF 2da	20	0.73	0.66	21.37

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6952.2	4	1738.05	10.08	0.0004
Sustrato_Nivel	6952.2	4	1738.05	10.08	0.0004
Error	2586.75	15	172.45		
Total	9538.95	19			



Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	19.75	780.13	1	780.13	4.52	0.0504
Total		780.13	1	780.13	4.52	0.0504

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaVolc_100	1
Compost_0	0
Compost_100	-1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 18.** *Contrastes ortogonales para la variable número de frutos por planta.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
NF/PL	20	0.87	0.83	15

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	401.5	4	100.38	24.48	<0.0001
Sustrato_Nivel	401.5	4	100.38	24.48	<0.0001
Error	61.5	15	4.1		
Total	463	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-3.25	21.13	1	21.13	5.15	0.0384
Total		21.13	1	21.13	5.15	0.0384

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 19.** *Contrastes ortogonales para la variable peso seco de frutos por planta.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PS Frutos/PL	20	0.52	0.39	50.48

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	6433.7	4	1608.43	4.04	0.0204
Sustrato_Nivel	6433.7	4	1608.43	4.04	0.0204
Error	5979.25	15	398.62		
Total	12412.95	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-6.25	78.13	1	78.13	0.2	0.6643
Total		78.13	1	78.13	0.2	0.6643

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 20. Contrastes ortogonales para la variable peso total de fruto**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PTF	20	0.77	0.71	19.02

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	258000703.7	4	64500176	12.44	0.0001
Sustrato_Nivel	258000703.7	4	64500176	12.44	0.0001
Error	77754388.5	15	5183625.9		
Total	335755092.2	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-3931.75	30917316	1	30917316	5.96	0.0275
Total		30917316	1	30917316	5.96	0.0275

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0

Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 21. Contrastes ortogonales para la variable peso seco de tallo**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PS Tallo	20	0.33	0.16	24.56

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1582.8	4	395.7	1.87	0.1673
Sustrato_Nivel	1582.8	4	395.7	1.87	0.1673
Error	3165.75	15	211.05		
Total	4748.55	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	0.5	0.5	1	0.5	2.40E-03	0.9618
Total		0.5	1	0.5	2.40E-03	0.9618

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 22. Contrastes ortogonales para la variable peso seco de hojas.**

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PS Hojas	20	0.57	0.45	26.38

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	9051.8	4	2262.95	4.88	0.0101
Sustrato_Nivel	9051.8	4	2262.95	4.88	0.0101
Error	6949	15	463.27		
Total	16000.8	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	12	288	1	288	0.62	0.4427
Total		288	1	288	0.62	0.4427

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 23.** *Contrastes ortogonales para la variable peso seco total.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PST	20	0.55	0.43	26.71

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1582.8	4	395.7	1.87	0.1673
Sustrato_Nivel	1582.8	4	395.7	1.87	0.1673
Error	3165.75	15	211.05		
Total	4748.55	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-0.5	0.5	1	0.5	2.40E-03	0.9618
Total		0.5	1	0.5	2.40E-03	0.9618

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	1
Compost_0	0
Compost_100	-1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 24.** *Contrastes ortogonales para la variable número de frutos de tercera.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
NF 3era	20	0.7	0.62	48.66

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2016.3	4	504.08	8.75	0.0008
Sustrato_Nivel	2016.3	4	504.08	8.75	0.0008
Error	864.5	15	57.63		

Total	2880.8	19			
-------	--------	----	--	--	--

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	3.5	24.5	1	24.5	0.43	0.5243
Total		24.5	1	24.5	0.43	0.5243

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 25.** Contrastes ortogonales para la variable número de frutos de primera.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
NF 1era	20	0.24	0.03	82.79

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	24	4	6	1.16	0.3682
Sustrato_Nivel	24	4	6	1.16	0.3682
Error	77.75	15	5.18		
Total	101.75	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-0.5	0.5	1	0.5	0.1	0.7604
Total		0.5	1	0.5	0.1	0.7604

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 26.** Contrastes ortogonales para la variable peso de frutos de primera.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PF 1era	20	0.2	0	83.31

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1601170.2	4	400292.5	0.94	0.4687
Sustrato_Nivel	1601170.2	4	400292.5	0.94	0.4687
Error	6401455.9	15	426763.7		
Total	8002626.1	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	-346.13	239605	1	239605	0.56	0.4653
Total		239605	1	239605	0.56	0.4653

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 27.** *Contrastes ortogonales para la variable peso de frutos de tercera.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PF 3era	20	0.63	0.53	56.65

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	11398989	4	2849747	6.44	0.0032
Sustrato_Nivel	11398989	4	2849747	6.44	0.0032
Error	6636887	15	442459.1		
Total	18035876	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	503.75	507528.1	1	507528.1	1.15	0.3011
Total		507528.1	1	507528.1	1.15	0.3011

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 28.** *Contrastes ortogonales para la variable conductividad eléctrica tres.*

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
CE 3	20	0.7	0.62	36.02

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	110686.3	4	27671.57	8.65	0.0008
Sustrato_Nivel	110686.3	4	27671.57	8.65	0.0008
Error	47994.35	15	3199.62		
Total	158680.6	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	76.25	11628.13	1	11628.13	3.63	0.0759
Total		11628.13	1	11628.13	3.63	0.0759

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 29.** *Contrastes ortogonales para la variable peso seco de raíz.*

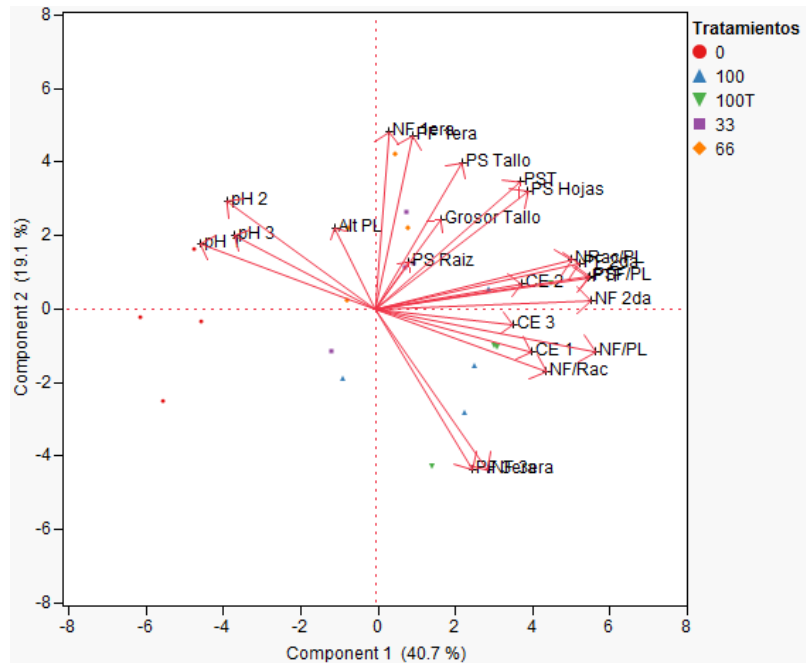
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
PS Raiz	20	0.26	0.07	52.17

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	351.7	4	87.93	1.34	0.3022
Sustrato_Nivel	351.7	4	87.93	1.34	0.3022
Error	987.25	15	65.82		
Total	1338.95	19			

Sustrato_Nivel	Contraste	SC	gl	CM	F	p-valor
Contraste1	9.25	171.13	1	171.13	2.6	0.1277
Total		171.13	1	171.13	2.6	0.1277

Sustrato_Nivel	Ct.1
ArenaRoja_100	-1
Compost_0	0
Compost_100	1
Compost_33	0
Compost_66	0

**ANEXO 30.** *Vectores para las viables de respuesta y las variables independientes.*



**ANEXO 31.** “Loadings” o “factores de carga” para las 23 variables para los componentes 1 y 2.

