

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y EL  
CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE

Tesis

Que presenta JORGE ENRIQUE CANALES ALMENDARES  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila


Julio 2017


IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y EL  
CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE

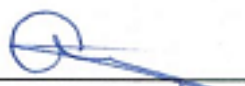
Tesis


Elaborado por JORGE ENRIQUE CANALES ALMENDARES como requisito  
parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN  
HORTICULTURA con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dra. América Berenice Morales Díaz  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Subdirector de Postgrado  
UAAAN

Saltillo, Coahuila

Julio 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi esposa, por su apoyo incondicionalmente, paciencia y darme siempre lo mejor.

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, por ser parte fundamental de mi formación profesional.

Al CONACYT, por el apoyo y la confianza que brindó para continuar mi preparación.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza, por ser parte de mi formación profesional y brindarme su apoyo en todo momento y asesorías.

Al Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente, por su apoyo.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, por su apoyo.

Al MC. William Alfredo Narváez Ortiz, por ser amigo, compañero, colega y por brindarme su tiempo y conocimientos.

A todo el cuerpo académico de la Maestría en Ciencias en Horticultura, por recibirme y formarme de la mejor forma posible de manera profesional.

A todos los demás profesores y demás personas, con quienes tuve el gusto de convivir y aprender, por su apoyo en todo momento.

Al personal administrativo del departamento de Postgrado, por todo su apoyo y orientación.

A Ruben, Irma, Juan, Homero, Paola, Hugo, Emma, Julia y todos mis amigos y compañeros que compartieron conmigo su amistad, tiempo y conocimientos.

## **DEDICATORIA**

A mi esposa e hijos por su amor y alegrías.

A mi padre y madre por su apoyo.

A mis hermanos Allan, Javier, Carlos, Milagros, Cristhoper y Kensy por apoyarme siempre.

Familiares y amigos a quienes les adeudo la ternura y las palabras de aliento y el abrazo; el compartir con todos ellos la factura que nos presenta la vida, paso a paso.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN .....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Hipótesis .....	2
REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
Suelos calcáreos .....	3
Problemática nutrimental de los suelos calcáreos .....	3
Panorama del estudio de la solución del suelo .....	4
Factores que modifican la concentración de la solución del suelo.....	5
Temperatura del suelo.....	5
La liberación de los nutrientes en la fase solida.....	6
Movimiento de los nutrientes a través del suelo .....	7
La absorción de nutrientes por el sistema radicular.....	8
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
Localización geográfica.....	10
Establecimiento .....	10
Tratamientos .....	11
Metodología estadística .....	13
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	14
Comportamiento dinámico de la composición de la solución del suelo .....	14
Conductividad Eléctrica.....	14
pH de la Solución del Suelo .....	16
Nitratos en la Solución del Suelo .....	18
N total y K <sup>+</sup> en la Solución del Suelo.....	20
Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> y S en la Solución del Suelo.....	21
Acumulación de Biomasa vegetal.....	25

CONCLUSIONES ..... 28  
REFERENCIAS ..... 29

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Problemática nutrimental de los suelos (calcáreos).....	3
<b>Tabla 2.</b> Propiedades fisicoquímicas de los suelos.....	10
<b>Tabla 3.</b> Características del agua de riego utilizada en el experimento. ....	11
<b>Tabla 4.</b> Concentración de elementos en té de vermicomposta (mg L <sup>-1</sup> ). ....	11
<b>Tabla 5.</b> Concentración de elementos en la solución del suelo para dos tipos de suelo (mg L <sup>-1</sup> ). ....	22
<b>Tabla 6.</b> Acumulación de biomasa fresca y seca en tres muestreos de tejido vegetal del cultivo de tomate con tres diferentes regímenes de fertilidad y su significancia estadística.....	26
<b>Tabla 7.</b> Matriz de correlación de la concentración de iones en la solución del suelo con las variables de crecimiento del cultivo de tomate en un suelo de bosque con fertilizante sólido.....	27

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Valores medios y error estándar de la conductividad eléctrica en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas. .... 15
- Figura 2.** Valores medios y error estándar del pH en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas. .... 18
- Figura 3.** Valores medios y error estándar del  $\text{NO}_3^-$  en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas. .... 19
- Figura 4.** Valores medios y error estándar de la concentración de N total y  $\text{K}^+$  en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas. .... 22
- Figura 5.** Valores medios y error estándar de la concentración de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , S y  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de la planta. .... 24



RESUMEN

IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y EL  
CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE

Por

JORGE ENRIQUE CANALES ALMENDARES

MAESTRIA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA.-ASESOR

Saltillo, Coahuila

Julio 2017

Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de determinar el impacto de distintos tipos de fertilizantes sobre la composición de la solución del suelo y sobre la acumulación de la biomasa en plantas de tomate. Se usaron plantas bajo invernadero cultivadas en macetas con suelo calcáreo y suelo de bosque aplicando tres tipos de fertilización: solución nutritiva Steiner, fertilizantes sólidos y té de vermicompost. Se tomaron muestras de la solución del suelo una vez por semana utilizando sondas de succión durante 22 semanas y se complementaron con tres muestreos para determinar la biomasa y composición mineral de las plantas. La concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y S aumentaron con el tiempo donde los valores más altos fueron registrados para el tratamiento con fertilizantes sólidos (549, 122, 421, 49 y 154  $\text{mg L}^{-1}$ ) y Steiner (203, 96, 313, 49, 67 y 203  $\text{mg L}^{-1}$ ), lo cual coincidió con la acumulación significativa de biomasa (631 y 1181 gramos) para estos tratamientos respectivamente, en cambio las bajas concentraciones de nitratos (72, 63, 150, 29, 84 y 115  $\text{mg L}^{-1}$ ) en la composta fueron proporcionales a la acumulación de biomasa 210 gramos en este tratamiento. Tanto el tipo de fertilizantes como el tipo de suelo fueron factores significativos que modificaron tanto la composición de la solución del suelo como la acumulación de la biomasa en el cultivo de tomate.

### **Palabras clave**

Agua del suelo, solución de los poros del suelo, calcisoles, nutrición mineral, *Solanum lycopersicum* L.

ABSTRACT

IMPACTO DE LOS FERTILIZANTES EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO Y EL  
CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE

Por

JORGE ENRIQUE CANALES ALMENDARES

MAESTRIA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA  
UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. ADALBERTO BENAVIDES MENDOZA.- ASESOR

Saltillo, Coahuila

Julio 2017

This study was carried out with the objective of determining the impact of different types of fertilizers on the composition of the soil solution and on the accumulation of biomass in tomato plants. Plants were grown under greenhouse in pots with calcareous soil and forest soil applying three types of fertilization: Steiner nutrient solution, solid fertilizers and vermicompost tea. Samples of the soil solution were taken once a week using suction cups for 22 weeks and supplemented with three samplings to determine the biomass and mineral composition of the plants. The concentration of  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  and S increased with time. The highest values were recorded for the treatment with solid fertilizers (549, 122, 421, 49 and 154  $\text{mg L}^{-1}$ ) and Steiner (203, 96, 313, 49, 67 and 203  $\text{mg L}^{-1}$ ) according to the significant accumulation of biomass (631 And 1181 grams) for these treatments respectively; in contrast with the low nitrate concentrations in the compost (72, 63, 150, 29, 84 and 115  $\text{mg L}^{-1}$ ) that were proportional to the accumulation of biomass of 210 grams in this treatment. Both the type of fertilizers and the type of soil were significant factors that modified both the composition of the soil solution and the accumulation of biomass in the tomato crop.

**Keywords:** Solanum lycopersicum L., water soil, mineral nutrient, Calcisols, solution of soil pores.

## INTRODUCCIÓN

El uso de fertilizantes constituye una parte importante de los sistemas de producción agrícola. La disponibilidad de nutrimentos depende de las interacciones entre los componentes del sistema edáfico, el cultivo y el clima (Hernandez *et al.*, 2014). Cuando los fertilizantes se añaden al suelo, las concentraciones en la solución del suelo de los iones presentes en el fertilizante aumentan, pero las de los iones que no están presentes en el fertilizante también se ven afectadas por procesos de intercambio iónico y equilibrio electroquímico. Los procesos de intercambio son regulados a menudo por la concentración de  $\text{NO}_3^-$ , usualmente el anión dominante en la solución del suelo (Bouldin, 1989, Yanai *et al.*, 1996). Sin embargo, otros elementos aplicados en los fertilizantes también modifican la composición de la solución del suelo (Narvaéz *et al.*, 2016). La forma química del fertilizante, por lo tanto, afectará la composición de la solución del suelo y, por lo tanto, la absorción de nutrientes y el crecimiento de las plantas. El estudio de la solución del suelo (SS) permite un acercamiento al estado real de la disponibilidad de los nutrimentos liberados por los fertilizantes y contenidos en el suelo.

La SS es la interface entre la fase sólida del suelo y las células de las raíces que absorben los nutrientes. Es especialmente importante entender las condiciones dinámicas, en lugar de las estáticas en la solución del suelo, ya que los cambios en la composición pueden ocurrir rápidamente, especialmente durante la absorción de nutrientes por las plantas. (Narvaéz *et al.*, 2016).

El estudio del comportamiento dinámico de la SS permite establecer un índice de disponibilidad de nutrientes minerales, así como su impacto en las características agronómicas del tomate (Granados *et al.*, 2013). Por lo tanto, la solución del suelo es la fase clave para la interrelación de la fase sólida del suelo y la aplicación de fertilizantes con el crecimiento de las plantas (Yanai *et al.*, 1995). El estudio de la composición química de la SS puede llevarse a cabo por diferentes técnicas, una de ellas es la colocación de sondas de succión que permiten la toma y cuantificación de la muestra de SS *in situ* (Salas *et al.*, 2009).

Este trabajo se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el efecto de la dinámica de la solución del suelo en la acumulación de biomasa durante el ciclo del cultivo de tomate.

### **Objetivo general**

Estudiar la composición de la solución del suelo, el comportamiento dinámico de los minerales disueltos y su asociación con el crecimiento, reparto selectivo de biomasa y composición mineral de la materia seca de plantas de tomate.

### **Hipótesis**

Diferentes tratamientos de fertilidad modifican la dinámica de la SS y por lo tanto el rendimiento y calidad del cultivo.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Suelos calcáreos

México tiene regiones con suelos calcáreos y materiales sedimentarios que aproximadamente representan la tercera parte del territorio nacional. Los problemas que enfrenten los cultivos que aquí se desarrollan son problemas nutrimentales de hierro y fósforo. Aproximadamente entre 12 y 15 millones de hectáreas son suelos de tipo calcáreos (I.E.P.E.S., 1976), aunque estos suelos pueden representar el 3% de la superficie total del país, equivalente a 7.1 millones de ha (Ortiz, 1981).

### Problemática nutrimental de los suelos calcáreos

En la Tabla 1. Se anotan los problemas nutrimentales de los suelos (calcáreos). Destacan las deficiencias del fósforo, debido a los procesos de adsorción y precipitación con los componentes de los suelos alcalinos (partículas de carbonato de calcio y los cationes calcio y magnesio), según (Rodríguez, 2011). A lo anterior se suman las deficiencias de micronutrientos, especialmente hierro, zinc y manganeso, debido a los procesos de oxidación y/o precipitación con el carbonatos e hidróxidos presentes en los suelos alcalinos (Rodríguez, 2011) es por ello importante tomar en cuenta que las propiedades físicas particulares de cada suelo influyen en la concentración de los iones en la solución del suelo.

Tabla 1. Problemática nutrimental de los suelos (calcáreos).

Deficiencias Nutrimiento	Causas
Macronutrientos	
P ( $\text{HPO}_4^{2-}$ )	(adsorción y precipitación)
N ( $\text{NO}_3^-$ y $\text{NH}_4^+$ )	(agotamiento de MO + volatilización del $\text{NH}_3$ + desnitrificación de $\text{NO}_3$ )
Micronutrientos	
Fe ( $\text{Fe}^{3+}$ )	(oxidación + precipitación)
Mn ( $\text{Mn}^{3+, 4+}$ ) Zn ( $\text{Zn}^{2+}$ )	(precipitación)
Cu ( $\text{Cu}^{2+}$ )	(adsorción + quelatación)
B ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )	(adsorción en arcillas y precipitación)

Fuente: Rodríguez, 2011.

## **Panorama del estudio de la solución del suelo**

El tomate es una de las principales hortalizas en México debido a su alto volumen de exportación, pero su producción a nivel suelo se ve limitada por su complejidad y por la interacción de todos sus factores físicos, químicos y biológicos, que influyen en la disponibilidad de los nutrientes y afectan el desarrollo del cultivo (Cih-Dzul *et al.*... 2011). Cada vez la producción de cultivos tanto intensiva como extensiva se está polarizando hacia condiciones de cultivo cada vez más controladas considerando los conceptos básicos de la fertilidad y la química de suelo: como son los conceptos de pH, potencial redox, el papel de los coloides del suelo así como las características de disociación del mismo y la dinámica de los nutrientes, todo esto para poder razonar una adecuada Cadahia *et al.*, (2005). Sin embargo hay que tomar en cuenta todas las interacciones físico-químicas existentes en el suelo, la solución nutritiva aplicada, la solución del suelo (es un medio natural para las plantas), la relación planta-ambiente y factores que afectaran la solución del suelo final difiriendo de la requerida por las plantas (Lao *et al.*, 2004). Dicha solución final (solución de suelo) es de vital importancia para un manejo adecuado de la nutrición de los cultivos, es por ello importante entender la dinámica de la composición de la solución del suelo (SS), ya que la absorción de nutrimentos por las plantas se da a partir de la solución del suelo que origina cambios importantes en el desarrollo del cultivo (Yanai *et al.*, 1995) y facilita la corrección de deficiencias durante el desarrollo de este.

El estudio de la solución del suelo es una herramienta útil tanto para el diagnóstico nutrimental del suelo-planta así como para la toma de decisiones en los programas de nutrición, y que nos da información real del contenido disponible nutrimental en el suelo a comparación de los tradicionales análisis de suelo con tendencia de la predicción de la disponibilidad de nutrientes de las plantas por el análisis químico de un cantidad de suelo, Cameron (1911) hizo hincapié en que mucho más se debe prestar atención al estudio de la solución del suelo. Dijo que debe haber un reconocimiento general de que los fenómenos del suelo son esencialmente dinámico en carácter, y que la investigación de las propiedades de la SS y su relación con la producción de cultivos es un procedimiento



determinado para producir resultados de valor positivo. Mediante la comparación de los resultados de la solución de los experimentos de cultivo con las soluciones del suelo obtenidos a partir de distintos tipos de suelo, se asumió que la solución del suelo es normalmente de una concentración ampliamente suficiente para apoyar las plantas de cultivo y que se mantiene en concentración mineral suficiente de nutrientes. (Okajima *et al.*, 2001) Uno de los métodos más conocidos para el muestreo de la SS es mediante el uso de lisímetros o sondas de succión que nos permite la toma de muestra *in situ* sin ser un método destructivo tanto para el suelo como para las raíces del cultivo. (Van der Ploeg y Beese, 1977), y en la actualidad, el uso de la sonda de succión en horticultura tienen una gran importancia dentro del campo de la nutrición como alternativa a otros métodos de extracción de la solución del suelo (Lao *et al.*, 2003).

Hay que considerar que en la actualidad no se presentan gran diversidad de estudios relacionados con la dinámica de la composición de la solución del suelo a través del tiempo así como su correlación con el contenido nutrimental del cultivo del tomate y su producción, de manera que su aporte en la solución nutritiva real y el contenido en la solución de suelo con sondas de succión nos ofrezca una orientación de la demanda y disponibilidad de estos nutrientes. (Hernández *et al.*, 2014).

## **Factores que modifican la concentración de la solución del suelo**

### **Temperatura del suelo**

La temperatura interactúa continuamente con componentes bióticos y abióticos del sistema suelo-planta tanto en el espacio como en el tiempo (Pregitzer *et al.*, 2000). Por ejemplo, la temperatura del suelo no solo influye en las constantes de velocidad de las reacciones químicas, el contenido de agua y el transporte de nutrientes en el suelo, también afecta simultáneamente a los aspectos fisiológicos de la planta como la absorción de iones, crecimiento radicular y composición y función de las comunidades microbianas del suelo. De hecho, prácticamente todos los procesos que ocurren en el suelo, desde el desgaste de los minerales primarios hasta la nutrición de las plantas y el almacenamiento de

carbono orgánico, están fuertemente influenciados por la temperatura del suelo (BassiriRad, 2005).

La capacidad de un suelo para suministrar nutrientes para el crecimiento de las plantas es una función de la cantidad total de nutrientes contenidos en la fase sólida (capital nutritivo) y una fracción más pequeña que está en equilibrio entre la solución del suelo y los sitios de intercambio de partículas de arcilla y materia orgánica. A largo plazo, los suelos con un régimen de temperatura térmico o hipertérmico experimentan velocidades aceleradas de degradación y descomposición minerales, aumentando el contenido de arcillas de baja actividad y disminuyendo la materia orgánica (En primer lugar, las arcillas altamente degradadas (por ejemplo, la caolinita) se componen principalmente de hidróxidos de hierro y de aluminio, habiendo perdido desde hace tiempo la mayor parte de los elementos importantes para la nutrición de las plantas, como el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$ . Por lo tanto, las reservas de nutrientes del suelo están gravemente agotadas. En segundo lugar, estas arcillas tienen baja capacidad de intercambio catiónico, y por lo tanto baja capacidad para retener nutrientes que pueden estar disponibles a partir de la mineralización de materia orgánica o deposición atmosférica. A corto plazo, la temperatura del suelo influye en la absorción de nutrientes de las plantas a través de los efectos en el agua del suelo, las tasas de reacciones químicas y el transporte de nutrientes (BassiriRad, 2005).

### **La liberación de los nutrientes en la fase sólida**

La liberación de la fase sólida a la solución del suelo se produce bioquímicamente (mineralización e inmovilización) o fisicoquímica (adsorción y desorción, precipitación y disolución). La mineralización e inmovilización de los elementos son transformaciones de sus formas orgánicas a inorgánicas. Estas transformaciones son funciones del régimen de temperatura de suelo, régimen de aireación del suelo, régimen del agua del suelo y la calidad de la materia orgánica de la que el nutriente es mineralizable. Sin embargo, un tema que a menudo no se considera es el papel comparativo que la mineralización juega en la regulación de la concentración de N, P y S en la solución del suelo. En sistemas

del suelo ampliamente administrado, la mineralización de nutrientes puede ser el componente dominante total lábil del ecosistema, particularmente el N. La reacción del nitrógeno con el complejo de superficie mineral-orgánica de suelo es químicamente distinta de la de P y S. Cuando el nitrato es la especie primaria de N producidos por la mineralización, la mineralización controla la concentración de nitrato de la solución del suelo. Puesto que hay muy poco o ninguna sorción de nitrato sobre la fase sólida. (Singh and Jones, 1976). Sin embargo, el amonio, fosfato y sulfato pueden sorber a la superficie del suelo mineral posterior a la mineralización. Cuanto mayor sea la capacidad de sorción del suelo, mayor debe ser el potencial para el ion mineralizado a adsorberse sobre la superficie mineral. Por lo tanto, el papel de la mineralización debe ser (1) controlar la concentración de la solución del suelo directamente cuando el nutriente no tiene sorción sobre el suelo mineral, o (2) contribuir a la concentración de la solución del suelo y la concentración de nutrientes en la superficie mineral del suelo cuando capacidad de sorción del suelo es mayor que cero. En este último caso, la distribución de nutrientes entre la solución y la superficie del mineral debe estar relacionada con la afinidad de nutrientes para la superficie mineral (BassiriRad, 2005).

### **Movimiento de los nutrientes a través del suelo.**

Los nutrientes se mueven a las raíces a través de la fase de solución. El movimiento ocurre por flujo masivo o difusión, o ambos. El flujo de masa se define como la cantidad de nutriente que fluye al sistema radicular con la corriente de transpiración. Por lo tanto, los controles más obvios del flujo masivo son el régimen hídrico del suelo, o cómo el contenido de agua del suelo y su estado energético cambian con el tiempo, y los procesos de desorción-mineralización que determinan la concentración de la solución del suelo. Esto es seguido por la distribución del tamaño del poro del suelo, que determina los cambios de conductividad hidráulica con el contenido de agua en el suelo.

Cualquier nutriente podría ser suministrada por cualquiera de mecanismo, si las condiciones del suelo son apropiadas. El suministro de nitrato se considera comúnmente que por el flujo masivo. Si se producen deficiencias, sin embargo,

como en muchos ecosistemas terrestres naturales, el nitrato debería tener un componente difusivo significativo. A la inversa, el fosfato debe ser suministrado por difusión debido a la alta capacidad de absorción de la mayoría de los suelos. Sin embargo, si se supera la capacidad de sorción del suelo, a continuación, las concentraciones de fosfato son altas y se proyecta de flujo de masa (BassiriRad, 2005).

### **La absorción de nutrientes por el sistema radicular**

Las características de raíz que definen la biodisponibilidad de nutrientes son (1) la dinámica del crecimiento y desarrollo de la raíz, (2) la morfología de la raíz, (3) la competencia inter-raíz, y (4) la cinética de absorción de la raíz. En primer lugar, la absorción de nutrientes es, con pocas excepciones, sensible a la cantidad de raíz, y menos sensible a sus características de absorción (Smethurst y Comerford 1993a, Barber 1995; Yanai 1996). Esto es particularmente cierto para las plantas que sufren una deficiencia de nutrientes. En segundo lugar, un activo infravalorado de sistemas de raíces es la química que se suma al ambiente del suelo, sobre todo la rizosfera. Esto puede influir en la biodisponibilidad cambiando el patrón de liberación de nutrientes directamente, o cambiando la microflora de la rizosfera, que a su vez influye en la dinámica de los nutrientes en esa zona. Los principales cambios químicos inducidos por los sistemas de raíces que influyen en la biodisponibilidad de nutrientes son (1) cambio de pH del suelo en la rizosfera (Hinsinger 2001), (2) aumento de los niveles de fosfatasa para P mineralización (Grierson et al. 2004), y (3) la exudación de ácidos orgánicos, ácidos particularmente bajo peso molecular (Grierson et al., 2004). Cambios en el pH del suelo se producen a través de respiración de las raíces y la producción de iones de bicarbonato, o el mantenimiento del equilibrio de iones durante la absorción de nutrientes (Shen et al., 2004). Tras administración de nitratos en la captación de protones o exudación hidroxilo. Ambas cosas resultan en un aumento del pH. Captación de amonio es equilibrada por la exudación de protones y resulta en una disminución del pH. El pH puede influir en la

concentración de equilibrio de los nutrientes en la fase sólida, el resultado puede ser un aumento en la biodisponibilidad de nutrientes (Hinsinger *et al.*, 2003).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización geográfica

La presente investigación se llevó a cabo en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Se utilizó como material experimental plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*) híbrido de la variedad Toro, con hábito de crecimiento determinado.

### Establecimiento

Las plantas se establecieron bajo invernadero durante el periodo octubre-abril en macetas de polietileno de 12 litros con dos tipos de suelo: un suelo calcáreo no agrícola ubicado en un área sin presencia de vegetación y un suelo negro de bosque ubicado en un área con reforestación de 20 años con *Pinus halepensis*. Los suelos fueron recolectados de los terrenos pertenecientes a la universidad, situados en las coordenadas 25°21'14.87"N y 101° 2'23.25"O para el suelo calcáreo y 25°21'6.81"N y 101° 1'27.69"O para el suelo negro de bosque; posterior a su muestreo los suelos fueron caracterizados desde el punto de vista fisicoquímico de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) (Tabla 2).

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Suelo	pH <sup>a</sup>	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Densidad	Carbonatos		P-Olsen mg L <sup>-1</sup>
	H <sub>2</sub> O		aparente g/cm <sup>3</sup>	Totales %	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg L <sup>-1</sup>	
Calcáreo	8.08	0.9	1.04	39.8	23.1	19
Bosque	7.59	0.58	0.95	29.7	2.72	15
	Cationes	Intercambiables	(mg L <sup>-1</sup> )		Textura	Materia O
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Clase	%
Calcáreo	6536	714	107	296	Franco	0.97
Bosque	6364	341	101	599	Franco	4.90

<sup>a</sup> pH (1:2 agua)

También se analizó el agua de riego con el fin de tomar en cuenta los valores para el cálculo de los fertilizantes (Tabla 3).

*Tabla 3. Características del agua de riego utilizada en el experimento.*

Variable	Valor	Variable	Valor
pH	8.06	Mg <sup>2+</sup>	24.1 mg L <sup>-1</sup>
CE	770 (μS cm <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup>	20.5 mg L <sup>-1</sup>
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.96 mg L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	81.7 mg L <sup>-1</sup>
K <sup>+</sup>	6.24 mg L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	256 mg L <sup>-1</sup>
Ca <sup>2+</sup>	95.8 mg L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	34.2 mg L <sup>-1</sup>

### Tratamientos

Los tratamientos iniciaron inmediatamente después del trasplante a los 7 días después del trasplante y consistieron en tres tipos de aporte nutrimental al suelo durante el tiempo de crecimiento de las plantas (22 semanas):

Los tratamientos iniciaron inmediatamente después del trasplante a los 7 días después del trasplante y consistieron en tres tipos de aporte nutrimental al suelo durante el tiempo de crecimiento de las plantas (22 semanas):

Tratamiento 1. Testigo. Aporte continuo de una solución nutritiva Steiner (Steiner, 1968) mediante el riego. Este tratamiento se aplicó en concentración de 25% durante la etapa vegetativa, se elevó a 50% durante la etapa de floración, 100% durante el amarre de fruto y 120% al iniciar la cosecha.

Tratamiento 2. Aporte semanal de nutrientes mediante fertilizantes sólidos. La cantidad aplicada fue equivalente, en términos de elementos minerales, a lo aplicado en el Tratamiento 1 por medio de la solución Steiner.

Tratamiento 3. Aporte orgánico mediante el riego, con un té de vermicomposta de origen vacuno con una CE de 2000 (μS cm<sup>-1</sup>). La CE fue ajustada por dilución hasta igualar a la CE de la solución Steiner aplicada en el Tratamiento 1, la composición del té de vermicomposta se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentración de elementos en té de vermicomposta (mg L<sup>-1</sup>).

NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	S	Na <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	B	Cu <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>
50	9.3	440.2	96.5	42.8	154.5	186	0.3	0.05	1.2	<0.005	<0.025

Para determinar los cambios temporales en la composición de la solución del suelo se llevaron a cabo 21 muestreos de la solución del suelo, uno cada semana, usando tres repeticiones para cada tratamiento. Para la caracterización de la SS se ubicaron tres sondas de succión en cada tratamiento, se eligieron tres plantas al azar para colocar las sondas en el interior de la maceta a 15 cm de profundidad y 10 cm de la planta. Para tomar la muestra de SS se siguió el siguiente procedimiento: transcurridos 15 minutos después de un riego se aplicó una presión de succión de 75 centibares. Al día siguiente se extrajo la muestra de SS de la sonda con una jeringa. El volumen de la muestra obtenida osciló entre 20 y 30 ml. Las muestras obtenidas fueron sometidas primeramente a un análisis *in situ* para determinar: pH con un potenciómetro de la marca Horiba modelo B-713; la conductividad eléctrica (C.E) con un equipo de la marca Horiba modelo Spectrum Cardy Twin; el potencial de óxido reducción (ORP) se midió con un electrodo de la marca OMEGA modelo PHH-7011 y la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) fue determinada mediante un equipo de ion-selectivo de la marca Horiba modelo B-743. Posteriormente las muestras de SS fueron analizadas en el laboratorio para determinar el contenido de nitrógeno total (N) mediante la técnica de micro kjeldahl (AOAC 1980), la de P por espectrofotometría visible (AOAC 1980), y la concentración de potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), azufre total (S), sodio ( $\text{Na}^+$ ) y boro (B) utilizando la técnica de calcinación por vía húmeda (Fick *et al.*, 1976) y un equipo ICP-OES de la marca Perkin Elmer modelo optima 8300.

Las plantas utilizadas en el experimento fueron colocadas en densidad de 9 plantas por  $\text{m}^2$ , fueron mantenidas en el invernadero durante 22 semanas después de su trasplante y recibieron los cuidados estandar como tutoreo, poda, monitoreo y control de plagas y enfermedades. En las plantas se llevaron a cabo tres muestreos colectando tres plantas elegidas al azar en cada tratamiento a los 40, 60 y 90 días después del trasplante (ddt). Las plantas fueron separadas en tallos, hojas y raíces para determinar su peso fresco usando una balanza digital. Las muestras frescas fueron colocadas en bolsas de papel y se secaron en una



estufa de deshidratación a 70 °C durante 72 horas hasta peso constante para luego determinar el peso seco usando una balanza digital.

### **Metodología estadística**

Con el fin de dilucidar la interacción de los iones en la dinámica de la composición de la solución del suelo con las variables de crecimiento del cultivo, se preparó una matriz de correlación con una significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$  (Ver tabla 7).

El arreglo estadístico utilizado fue completamente al azar con 30 repeticiones por tratamiento, la unidad experimental fue una planta en una maceta, obteniéndose un total de 180 plantas.

Los resultados de la composición mineral de la solución del suelo se presentaron en graficas de dispersión contra el tiempo. Los datos de la biomasa de la planta se analizaron con el software R, para cada una de las variables de la biomasa se realizó un análisis de varianza y la prueba de medias de Fisher con un valor de significancia de  $\alpha \leq 0.05$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Comportamiento dinámico de la composición de la solución del suelo

#### Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica (CE) fue diferente desde un punto de vista dinámico para las dos clases de suelo como para los tipos de fertilización (Figura 1). La CE refleja los cambios globales de la SS tanto en concentración como en composición (Yanai *et al.*, 1996, 1997).

Durante la fase de crecimiento vegetativo (primeros 40 días después del trasplante) la mayor CE se presentó en los tratamientos Steiner y sólido mientras que el tratamiento con composta presentó los valores más bajos. Steiner y sólido no mostraron, salvo en unos cuantos muestreos, diferencias entre los valores de CE, mientras que el tratamiento de vermicomposta mostró de forma casi constante valores más bajos. Esta diferencia podría deberse a la diferente composición elemental de la vermicomposta (Tabla 3) así como al aporte de materia orgánica que pudo modificar el balance de intercambios iónicos en el suelo, dando lugar a un perfil diferente de iones disponibles (Narvaez-Ortíz *et al.*, 2016). La aplicación de fertilizantes tuvo un efecto directo sobre los valores de la CE, los cuales al ser altos podrían potencialmente disminuir el potencial hídrico del agua del suelo y por lo tanto inhibir el crecimiento de las plantas (Liu *et al.*, 2014). Durante la etapa reproductiva los valores de CE aumentaron para todos los tratamientos, esto independientemente al tipo de suelo, si bien el tratamiento de vermicomposta tuvo los valores más bajos. Este resultado parece una consecuencia lógica del incremento en la cantidad de fertilizantes aplicados conforme las plantas crecieron y avanzaron hacia la cosecha. Por otra parte, las diferencias en los valores de CE entre tratamientos dentro de cada tipo de suelo probablemente constituyan un reflejo del mayor trabajo metabólico de intercambio con la matriz del suelo por parte de un volumen más grande de raíces (Marschner, 2011).

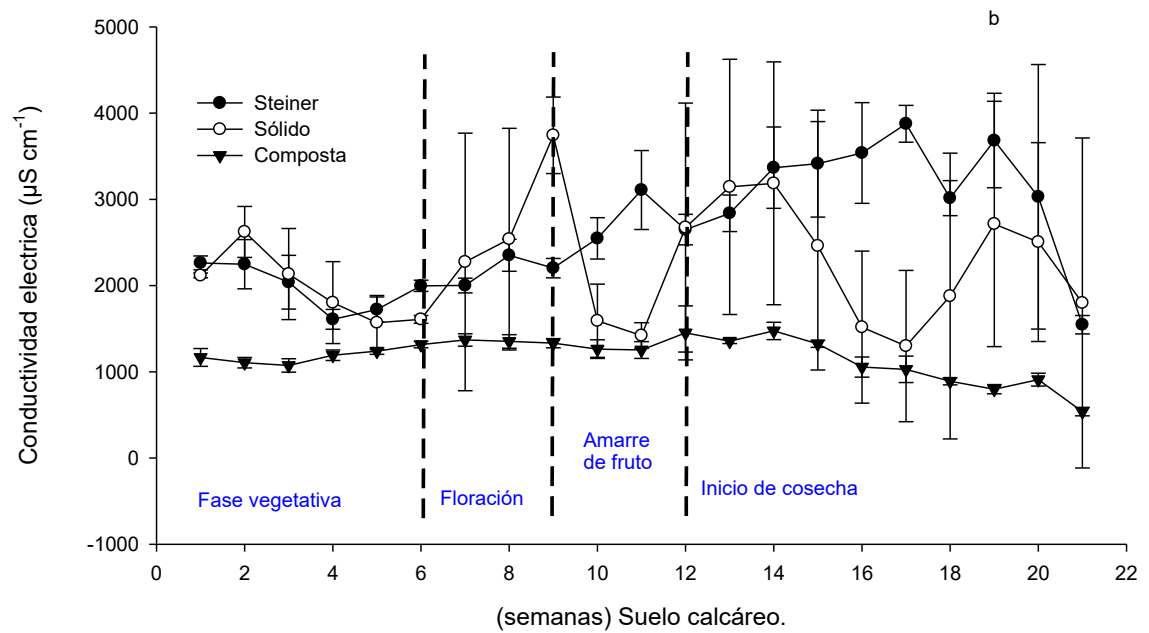
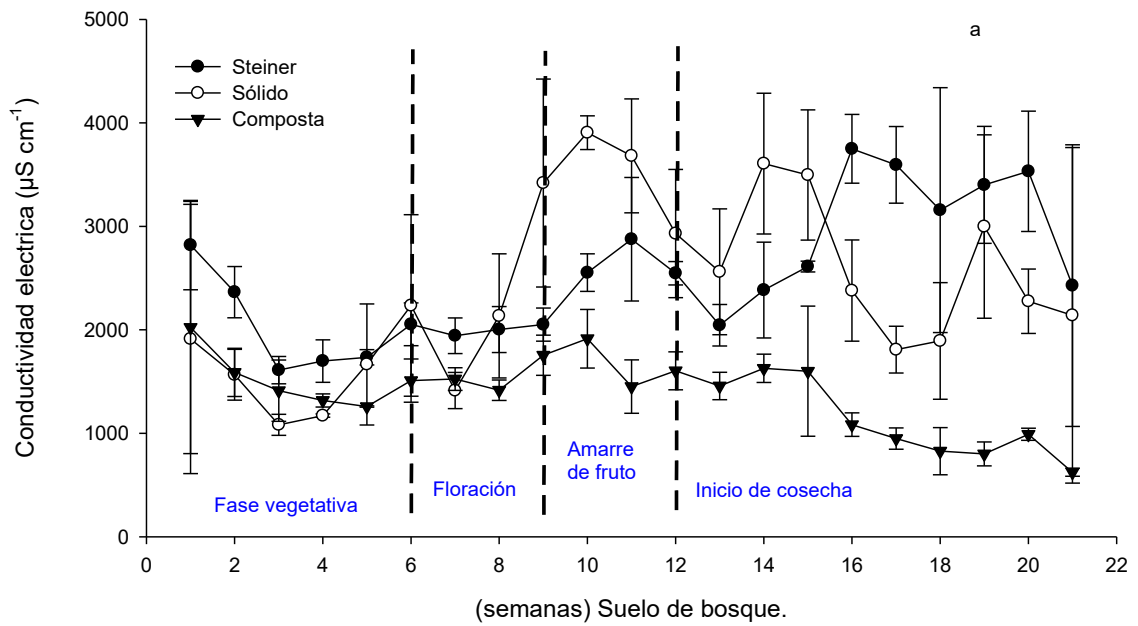


Figura 1. Valores medios y error estándar de la conductividad eléctrica en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes

tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas.

Así como de la interacción entre los diferentes tipos de fertilización y la posiblemente distinta capacidad buffer de cada suelo (Chen, et al., 2008).

### **pH de la Solución del Suelo.**

El ajuste del pH en la solución nutritiva modificó el pH de la solución de suelo dando un promedio de 7.4, inferior al señalado en el análisis químico para el suelo calcáreo (Figura 2). Este promedio fue inclusive menor al observado para el pH de la SS en los tratamientos aplicados en el suelo de bosque. Una posible explicación es que el suelo de bosque es un calcisol con una cantidad significativa de materia orgánica que le otorga mayor capacidad buffer para el pH (Marschner, 2011). En general, la utilización de ácidos inorgánicos u orgánicos para neutralizar los carbonatos en suelos calcáreos es una práctica que puede mejorar la disponibilidad de algunos iones (Hernandez., *et al* 2014).

De forma general, para los dos suelos y los diferentes tratamientos, el pH aumentó durante la etapa vegetativa, disminuyó durante la floración y amarre de fruto y aumentó de nuevo al llegar la cosecha de frutos, sin presentar diferencias significativas entre los tratamientos. Los cambios en los valores del pH entre etapas de crecimiento de las plantas fueron debidas seguramente a cambios en la actividad metabólica de la planta que originó modificaciones en los iones intercambiados con el suelo (Yanai *et al.*, 1995; Marschner, 2011). Por otra parte, una explicación para la poca diferencia en los valores de pH entre tratamientos la aportan Lao *et al.* (2004) quienes mencionan que la capacidad de amortiguamiento del suelo mantiene el pH dentro de ciertos límites inclusive utilizando soluciones nutritivas de diferente composición. Sin embargo, estos autores señalan que no ocurren diferencias entre etapas de crecimiento de las plantas de tomate, mientras que en el presente trabajo si ocurrieron. Las diferencias fueron seguramente debidas al volumen de suelo utilizado, ya que Lao *et al.* (2004) realizaron su estudio en campo abierto, sin restricción en el volumen de suelo, mientras que en presente experimento se usaron macetas.

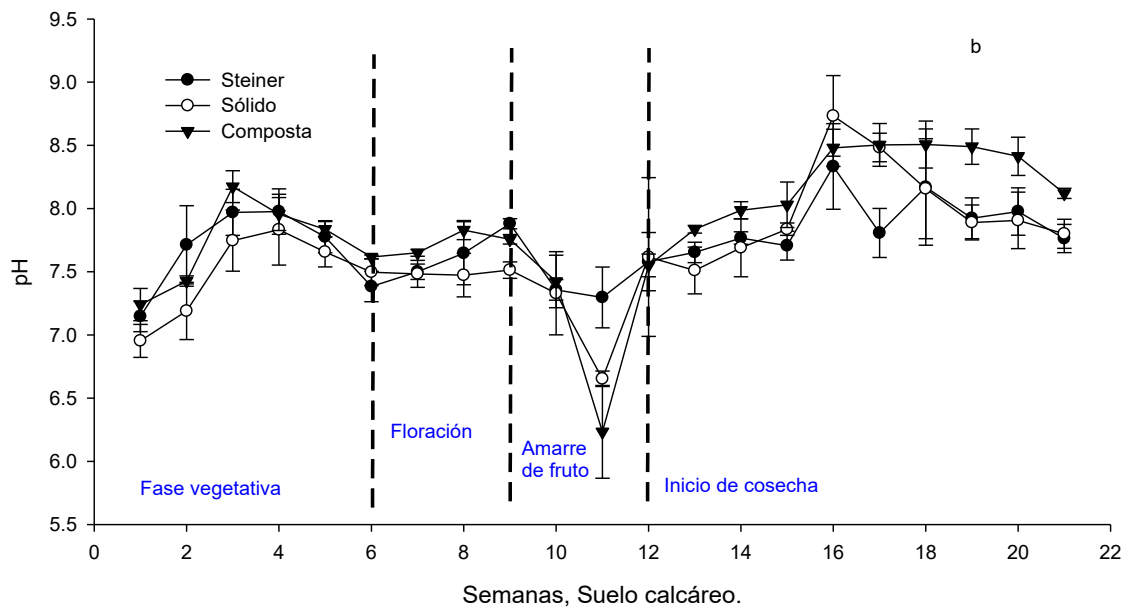
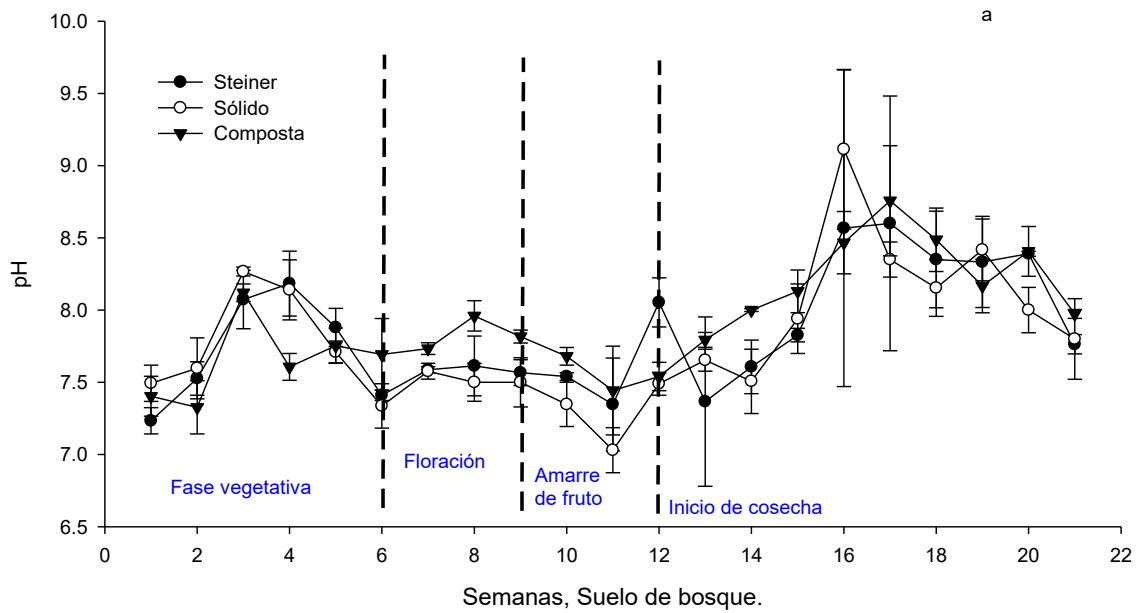


Figura 2. Valores medios y error estándar del pH en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas.

### **Nitratos en la Solución del Suelo**

El valor promedio de concentración del  $\text{NO}_3^-$  ( $404.28 \text{ mg L}^{-1}$ ) estuvo muy por encima del valor determinado en el suelo ( $12.91 \text{ mg L}^{-1}$ ), correspondiendo las concentraciones más altas a los tratamientos de sólido y Steiner (promedio  $582.34 \text{ mg L}^{-1}$ ), mientras que el tratamiento con composta dio lugar a un promedio de  $48.17 \text{ mg L}^{-1}$ , concentración que se encuentra por debajo del umbral de  $62 \text{ mg L}^{-1}$  que se considera la mínima que induce transportadores de nitrato de baja afinidad (Vert y Chory, 2009) (Figura 3).

En los fenómenos de intercambio entre la solución y la matriz sólida del suelo el nitrato cumple un importante papel no solo como fuente de N, sino en el equilibrio de cargas, por tratarse del anión más abundante en la SS. Sin embargo, los valores muy altos pueden dar lugar a lixiviación por su gran movilidad, con la consiguiente contaminación del agua subterránea, o bien a excesiva acumulación de nitrato en los tejidos vegetales (Bouldin 1989; Yanai *et al.*, 1995; Hernandez., *et al.*, 2014). En este sentido, los resultados señalan que la solución Steiner es una mejor alternativa en comparación con la fuente sólida.

Cabe notar el comportamiento dinámico del  $\text{NO}_3^-$  en la SS tanto en el suelo calcáreo como en el suelo de bosque. Para el tratamiento de composta la concentración es relativamente estable, mientras que para los otros tratamientos muestra un rango de variación muy amplio, sobre todo para el caso del fertilizante sólido. Igualmente es notable una tendencia a mostrar valores más altos de concentración de  $\text{NO}_3^-$  en el período de cosecha, lo cual puede indicar alguna asociación entre los procesos fisiológicos de la planta y la composición de la SS, posiblemente a través de los exudados radicales (Keiluweit *et al.*, 2015).

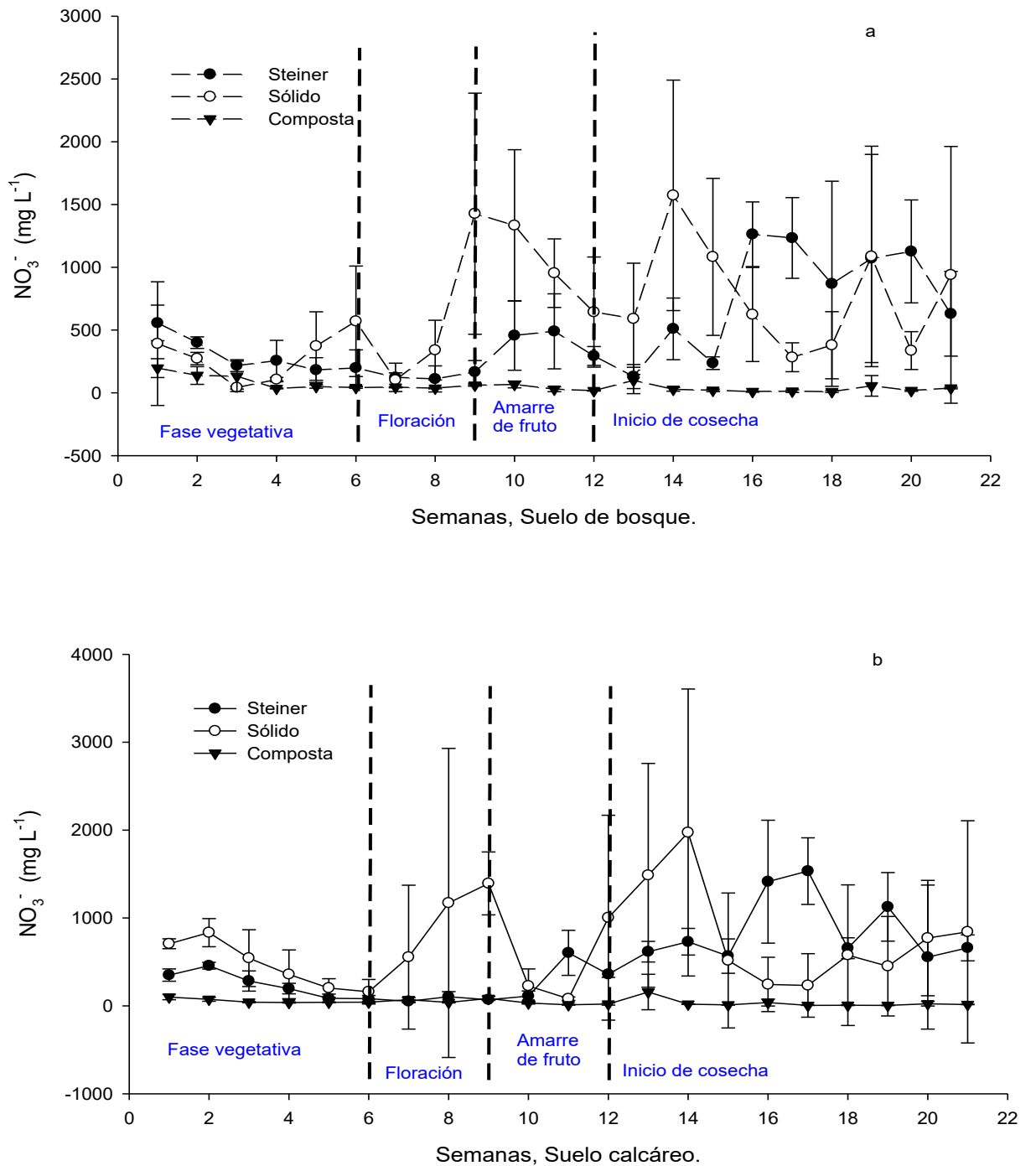


Figura 3. Valores medios y error estándar del NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas.

Por otra parte, una posible explicación basada en la tendencia a una mayor mineralización al variar el contenido relativo de agua del suelo (Paul *et al.*, 2003) no suena plausible, ya que no se permitió que el agua del suelo disminuyera en su disponibilidad para las plantas y se sabe que la mayor disponibilidad de nitrato ocurre en sistemas óxicos con poros del suelo con menor volumen de agua (Alvarez y Steinbach, 2009). Este resultado muestra la necesidad de ajustar las aplicaciones de nitrato en los fertilizantes usando los datos de la solución del suelo como fuente de información. Igualmente señala que los fertilizantes sólidos son menos eficientes que la solución Steiner como fuente de N.

### **N total y K<sup>+</sup> en la Solución del Suelo.**

Los valores promedio ( $\text{mg L}^{-1}$ ) para el N total en la SS fueron de 79, 81 y 79 para los tratamientos de Steiner, sólido y vermicomposta, respectivamente. Al contrario que lo observado con el  $\text{NO}_3^-$  el N total tuvo una dinámica mucho más estable y sin diferencias significativas entre los diferentes tratamientos para ambos suelos (Figura 4). Cabe resaltar que para ambos tipos de suelo los valores más bajos de N total se presentaron en la fase de la cosecha de fruto, es decir, al contrario que lo observado para el  $\text{NO}_3^-$  (Figura 3), lo cual pudiera indicar alguna asociación entre los procesos químicos y biológicos que aportan diferentes formas de N a la SS y el comportamiento fisiológico de la planta, en este caso posiblemente la tasa de exudación de metabolitos por la raíz (Keiluweit *et al.*, 2015) o por el aumento en la tasa de mineralización que ocurre frente al mayor contenido relativo de agua (Paul *et al.*, 2003).

En cuanto a la concentración del  $\text{K}^+$  el promedio para el suelo de bosque y el suelo calcáreo fue de 256 y  $241 \text{mg L}^{-1}$ , respectivamente la diferencia fue significativa fue 53 y 77. El comportamiento dinámicos del  $\text{K}^+$  en la SS fue diferente para cada tratamiento (Figura 4), ya que el tratamiento de composta mostró valores prácticamente inalterables, pero con una pequeña tendencia a elevarse en las fases de floración y llenado del fruto, mostrando un promedio general de concentración de  $\text{K}^+$  de  $60 \text{mg L}^{-1}$ . En cambio el tratamiento con solución Steiner presentó una tendencia positiva constante, alcanzando los



valores más altos durante la cosecha de frutos y presentando un promedio general de  $344 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{K}^+$ . Para el tratamiento con sólidos se encontró la misma tendencia positiva, pero con picos de concentración que se presentaron después de la floración. Pudiera esperarse que la tendencia positiva en la disponibilidad de potasio haya resultado de la mayor disponibilidad resultante de un mayor contenido relativo de agua del suelo (Venterink *et al.*, 2002), pero la misma tendencia debería de observarse en el tratamiento en donde se aplicó vermicomposta, sin que ocurriera así. Es probable entonces que el aporte adicional de materia orgánica de este último fertilizante modificara la adsorción del  $\text{K}^+$  en los coloides del suelo (Chenu *et al.*, 2000).

### **$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y S en la Solución del Suelo.**

Los valores promedio de concentración del  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{SO}_4^-$  en la solución del suelo para cada tipo de suelo y tratamiento se muestran en la Tabla 5. Cabe remarcar que el comportamiento dinámico del  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  (Figura 5) fue parecido al mostrado por el  $\text{K}^+$  (Figura 4), por lo que parece tratarse de un comportamiento asociado a los procesos de intercambio de estos cationes mayores. Los valores más altos para la concentración de calcio se encontraron con la aplicación de fertilizante sólido. Al comparar las fluctuaciones del  $\text{Ca}^{2+}$  con las del  $\text{Mg}^{2+}$  es posible observar una mayor estabilidad alrededor del promedio por parte del  $\text{Mg}^{2+}$ , mostrando el  $\text{Ca}^{2+}$  una mayor cantidad de picos con mayor concentración y un rango de variación de cientos de  $\text{mg L}^{-1}$  en comparación con el  $\text{Mg}^{2+}$  que mostró un rango de variación de decenas de  $\text{mg L}^{-1}$ , con las variaciones más amplias de nuevo para el fertilizante sólido. El comportamiento dinámico del  $\text{Na}^+$  fue diferente al del  $\text{Ca}^{2+}$  y con cierto parecido al del  $\text{Mg}^{2+}$ , mostrando fluctuaciones y picos de concentración de decenas de  $\text{mg L}^{-1}$ , pero mostrando ahora los valores más bajos en el fertilizante sólido y los mayores para Steiner y la vermicomposta. En este último caso el resultado se explica por la gran cantidad de sodio encontrado de origen en el fertilizante.

Tabla 5. Concentración de elementos en la solución del suelo para dos tipos de suelo ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

Suelo	T. Fertilizante	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	S
Bosque	Steiner	353.69	68.08	69.75	235.90
	Sólido	376.03	69.62	49.11	163.51
	Composta	118.98	28.39	73.84	98.63
Calcáreo	Steiner	253.85	125.01	75.31	257.22
	Sólido	238.99	97.65	49.14	143.22
	Composta	45.47	48.57	64.67	82.811

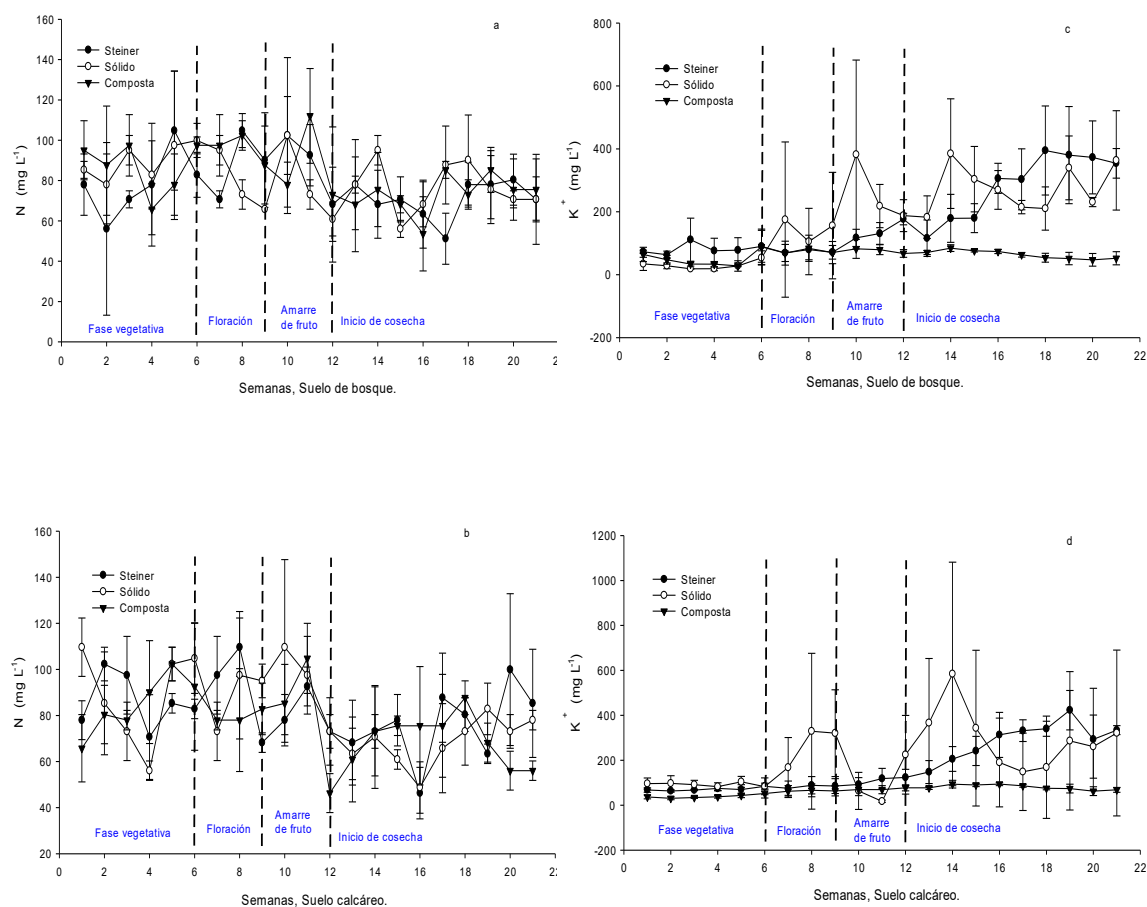


Figura 4. Valores medios y error estándar de la concentración de N total y K<sup>+</sup> en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de las plantas.

En cuanto al S este elemento mostró igualmente grandes variaciones en escalas de cientos de  $\text{mg L}^{-1}$  pero sin mostrar una tendencia definida a través del tiempo salvo para el tratamiento de vermicomposta que disminuyó al llegar la cosecha (Figura 5). Para ambos suelos los valores más altos se encontraron durante la cosecha para el tratamiento Steiner, siendo seguramente resultado del proceso de acidificación de la solución nutritiva. El tratamiento con aplicación de fertilizante sólido se ubicó en una posición intermedia entre Steiner y vermicoposta, sin mostrar alguna tendencia temporal obvia.

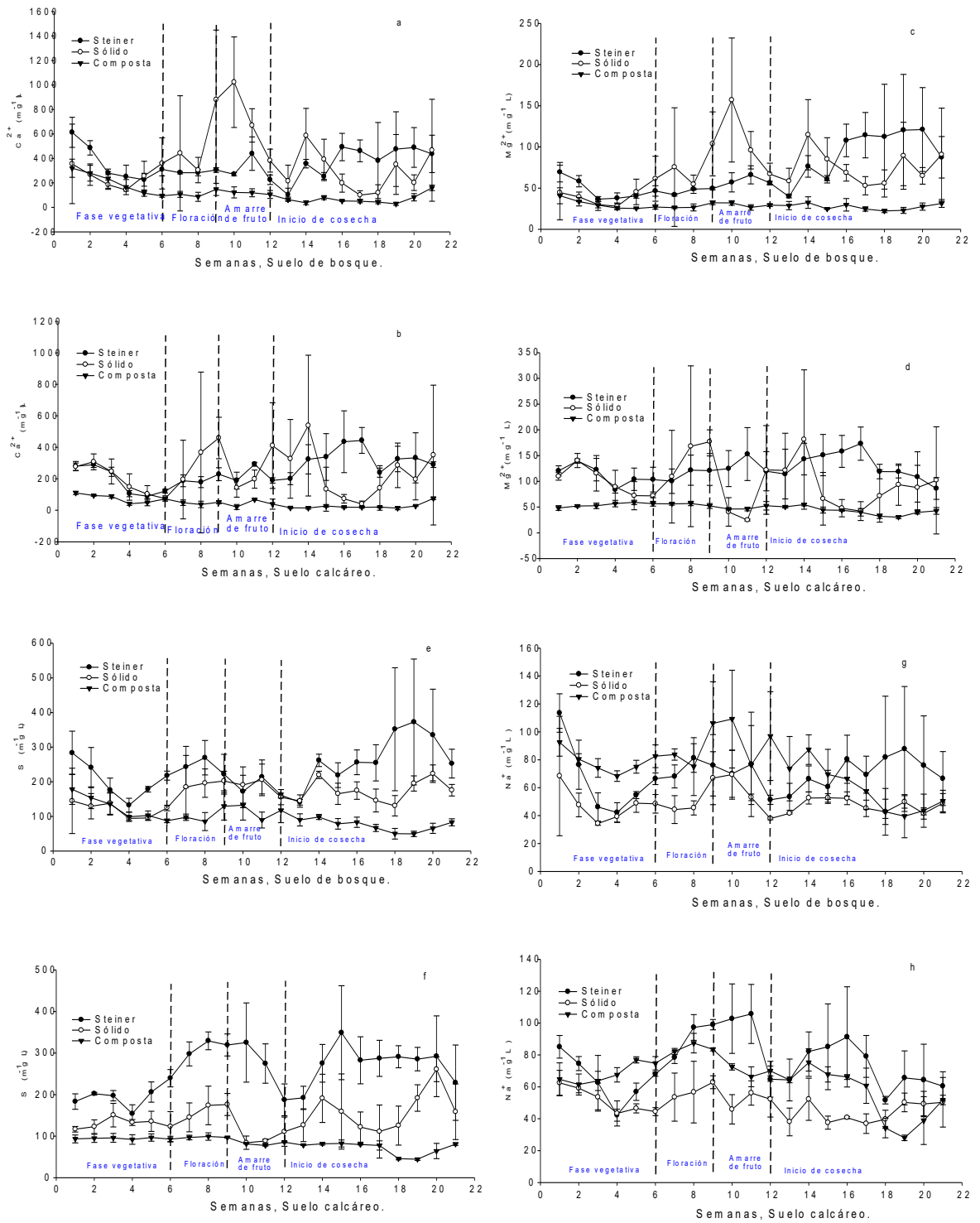


Figura 5. Valores medios y error estándar de la concentración de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, S y Na<sup>+</sup> en la solución del suelo a través del tiempo para dos clases de suelo con diferentes tipos de aplicación de fertilizantes en plantas de tomate. Las líneas verticales punteadas marcan etapas de desarrollo de la planta.

### **Acumulación de Biomasa vegetal.**

Los valores promedios de la biomasa fresca y seca acumulada para cada tipo de suelo y tratamiento a los 40, 60 y 90 después del trasplante se describen en la Tabla 4. La acumulación de biomasa mostro significancia estadística ( $p \leq 0.05$ ) donde los valores más altos se presentaron en los tratamientos de Steiner y sólido mientras que los valores más bajos en el tratamiento con composta esto estaría influenciado por la enorme variación de los iones en la concentración de la solución del suelo la cual se vio afectada fuertemente por aportación de nutrientes de los diferentes fertilizantes aplicados al cultivo.

La mayor tasa de crecimiento en el cultivo en cada uno de los tratamientos se presentó entre los 40 y 60 días donde se acumuló el 60% del peso fresco total, este crecimiento ocurrió durante la etapa de floración del cultivo, cabe notar que la concentración de iones en los órganos vegetales de una edad determinada de la planta corresponde a una concentración definida en la solución del suelo, que la planta al controlar la absorción de nutrientes, es capaz de mantener concentraciones variables en la solución del suelo.

Por otro lado la composición de la solución del suelo se vio afectada por el crecimiento de la planta es decir la composición de los aniones y cationes así como sus concentraciones mostraron cambios dinámicos con el crecimiento de la planta figuras 1-5, esto mismo fue reportado por (Yanai., *et al* 1995) en un cultivo de maíz. Con un suministro óptimo de nutrientes, los cultivos de crecimiento rápido tienen mayor tasa de captación de nutrientes por unidad de peso de raíz. Esta conclusión fue corroborada por Christie y Moorby (7666y). Esto no quiere decir que los cultivos de rápido crecimiento crecen más rápido porque su tasa de captación de nitrato u otros iones es alta. Más bien, la rápida absorción puede ser el resultado de su alta tasa de crecimiento. A un suministro óptimo en tiempo y forma como en el tratamiento con Steiner la tasa de absorción de iones se determina, al menos en parte, por la demanda del cultivo (Rodgers y Barneix, 1988).

La poca biomasa acumulada en el tratamiento con composta en ambos suelo podría tener relación a la baja concentración de elementos en la solución del

suelo a través del tiempo como se ha mostrado en las figuras anteriores, así como su gasto de energía en mantener sus procesos metabólicos en un ambiente poco favorables producido por la clorosis inducida por la alta concentración de carbonatos 39.8% (ver Tabla 2).

Tabla 6. Acumulación de biomasa fresca y seca en tres muestreos de tejido vegetal del cultivo de tomate con tres diferentes regímenes de fertilidad y su significancia estadística.

Suelo	T. Fertilizante	Biomasa fresca (g)			Biomasa seca (g)		
		40 ddt	60 ddt	90 ddt	40 ddt	60 ddt	90 ddt
Bosque	Steiner	297.5 <sup>a</sup>	978.04 <sup>a</sup>	1181.4 <sup>a</sup>	35.5 <sup>a</sup>	120.2 <sup>a</sup>	185.9 <sup>a</sup>
	Sólido	147.8 <sup>c</sup>	490.03 <sup>bc</sup>	631.9 <sup>bc</sup>	21.4 <sup>b</sup>	65.4 <sup>bc</sup>	87.5 <sup>bc</sup>
	Composta	82 <sup>de</sup>	159.63 <sup>de</sup>	210.7 <sup>d</sup>	12.4 <sup>d</sup>	15 <sup>de</sup>	30.1 <sup>cd</sup>
Calcáreo	Steiner	206.3 <sup>b</sup>	614.6 <sup>b</sup>	886.7 <sup>b</sup>	21 <sup>bc</sup>	69.2 <sup>b</sup>	106.9 <sup>b</sup>
	Sólido	89.03 <sup>d</sup>	333.4 <sup>cd</sup>	479.7 <sup>c</sup>	13.1 <sup>cd</sup>	42.3 <sup>cd</sup>	66.7 <sup>bcd</sup>
	Composta	32.2 <sup>e</sup>	65.8 <sup>e</sup>	81.6 <sup>d</sup>	5.3 <sup>d</sup>	8.8 <sup>e</sup>	11.4 <sup>d</sup>

Significancia de  $\alpha \leq 0.05$ .

La Tabla 7 muestra los resultados para el tratamiento sólido en el suelo de bosque en el que se observó un crecimiento adecuado de las plantas. Las correlaciones positivas entre la biomasa de la raíz y la CE, cationes ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y aniones  $\text{NO}_3^-$  y S) muestran las relaciones de actividad para diversos cationes en solución de suelo, los que se rigen principalmente por equilibrios de intercambio entre cationes disueltos y absorbidos para dos cationes de la misma valencia (Hansen, 1972) de igual manera para los aniones (S,  $\text{NO}_3^-$ ) esto sugiere la presencia de interrelaciones de iones en la dinámica y la acumulación de biomasa en el cultivo, en cuanto a la acumulación de biomasa en el tallo y hoja se presentaron valores más bajos lo que sugiera que no hay una relación directa entre la concentración de iones de la solución del suelo y la concentración de biomasa.

Ya que el  $\text{NO}_3^-$  es el anión presente en mayor cantidad así como catión  $\text{Ca}^{2+}$ , se concluye que la concentración de estos iones ejercen la mayor influencia en la

composición de la solución del suelo (Yanai *et al.*, 1995).

Tabla 7. Matriz de correlación de la concentración de iones en la solución del suelo con las variables de crecimiento del cultivo de tomate en un suelo de bosque con fertilizante sólido.

	Biomasa Raíz	Biomasa Tallo	Biomasa Hoja
Ca <sup>2+</sup>	0.75	0.42	0.63
Mg <sup>2+</sup>	0.75	0.37	0.60
Na <sup>+</sup>	0.42	0.02	0.23
K <sup>+</sup>	0.85	0.43	0.73
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.78	0.47	0.63
S	0.72	0.18	0.53
N	-0.25	-0.11	-0.30
ORP	0.87	0.68	0.83
pH	-0.88	-0.72	-0.80
CE	0.80	0.50	0.67

Umbral del 0.6833 para la significancia estadística de  $\alpha \leq 0.05$ .

La acumulación de biomasa en los cultivos agrícolas es un proceso que se ve afectado por muchos factores tanto climáticos, edáficos y fisiológicos, uno de los factores es la concentración de los nutrientes en la solución del suelo. (Hernández *et al.*, 2014) encontró diferencias significativas en un estudio realizado en los niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo en un cultivo de tomate bajo condiciones protegidas en dos épocas de producción, estas diferencias se presentaron tanto la concentración de iones en la solución del suelo como la acumulación de biomasa, en la etapa de floración durante la primavera (marzo-junio) reporta valores para el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> de 371.3 mg L<sup>-1</sup>, Ca<sup>2+</sup> 58.2 mg L<sup>-1</sup>, K<sup>+</sup> 123.24 mg L<sup>-1</sup>, Mg<sup>2+</sup> 16.08 mg L<sup>-1</sup>, pH 7.23 y CE 1300 (μS cm<sup>-1</sup>) con una producción de materia seca total 206.53 (g/m<sup>2</sup>).

## CONCLUSIONES

La dinámica de la solución del suelo a través del tiempo se ve afectada por el efecto de la concentración y forma de aplicación de los fertilizantes, lo cual se ve reflejado en la producción de biomasa del cultivo en donde los valores más altos se presentaron con el tratamiento Steiner con promedios durante todo el ciclo de  $\text{NO}_3^-$  de  $490 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$   $351.87 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$   $87.40$ ,  $\text{K}^+$   $354.16 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{Na}^+$   $69.65 \text{ mg L}^{-1}$ , S  $234.45 \text{ mg L}^{-1}$ , pH 7.8 y CE de  $2514 (\mu\text{S cm}^{-1})$ .



## REFERENCIAS

- Alvarez R, Steinbach HS (2009) A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research* 104: 1-15.
- Barber SA (1995) *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*, 2nd edn. Wiley, New York.
- BassiriRad H (2005) *Nutrient acquisition by plants: an ecological perspective* (Vol. 181) Springer Science & Business Media.
- Bouldin DR (1989) A multiple ion uptake model. *European Journal of Soil Science* 40: 309–319.
- Cadahía, C. 2005. *Fertirrigación de cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. 3ª Edición. Mundi Prensa. Madrid-España. 68-69 pp.
- Cameron FK (1911) *The soil solution*. Williams Norgate, London, 136pp.
- Chen ZJ, Wang YQ, Xu AM, Zhang LB, Zhou JB (2008) Effects of the application of different nitrogen fertilizers on the ion compositions in solution of the greenhouse soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 5: 015.
- Cih-Dzul IR, Jaramillo-Villanueva JL, Tornero-Campante MA, Schwentesius-Rindermann R (2011) Caracterización de los sistemas de producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en el Estado de Jalisco, México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14: 501-512.
- Chenu C, Le Bissonnais Y, Arrouays D (2000) Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1479-1486.
- Christie EK, Moorby J (1975) Physiological responses of semi-arid grasses. I. The influence of phosphorus supply on growth and phosphorus absorption. *Australian Journal of Agricultural Research* 26: 423-436.
- Granados MR, Thompson RB, Fernández MD, Gallardo M, Gázquez JC (2005) Uso de sondas de succión para el manejo de la fertilización nitrogenada en un cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero. *Sistemas de recomendación de abonado* (Ramos C. et al., eds). Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Córdoba, Spain, 79-85.
- Grierson PF, Smithson P, Nziguheba G, Radersma S, Comerford NB (2004) Phosphorus dynamics and mobilization by plants. In: van Noordwijk M, Cadisch G, Ong CK (eds) *Below-ground interactions in tropical*

agroecosystems: concepts and models with multiple plant components. World Agroforestry Centre (ICRAF), Nairobi, Kenya, pp 127–142.

- Hansen EM (1972) Studies on the chemical composition of isolated soil solution and the cation absorption by plants. *Journal on Plant and Soil* 37: 589-607.
- Hernández-Díaz MI, Chailloux-Laffta M, Moreno-Placeres V, Igarza-Sánchez A, Ojeda- Veloz A (2014) Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia Arica* 32: 79-88.
- IEPES, 1976. (Instituto de estudios políticos y sociales del partido revolucionario institucional) 1er. Ciclo de conferencias sobre problemas agropecuarios, México, D.F.
- Hinsinger P (2001) Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review *Plant Soil* 237:173–195.
- Hinsinger P, Plassard C, Tang CX, Jaillard B (2003) Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints. a review *Plant Soil* 248:43–59.
- Huerta Pérez, J. Mejoradores potenciales de pH para suelos ácidos y alcalinos (No. Tesis).
- Keiluweit M, Bougoure JJ, Nico PS, Pett-Ridge J, Weber PK, Kleber M (2015) Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates. *Nature Climate Change* 5: 588.
- Marschner H (2012) Marschner's mineral nutrition of higher plants. Third Edition. Academic press. MA, USA. 315-330p.
- Narváez-Ortiz WA, Morales-Díaz AB, Benavides-Mendoza A, Reyes-Valdés MH (2016) Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2016: 2383-2397.
- Lao MT, Jiménez S, Eymar E, Fernández EJ (2004) Nutrient levels of the soil solution obtained by means of suction cups in intensive tomato cultivation. *Phyton (Buenos Aires)* 73: 29-37.
- Lao MT, Jiménez S, Eymar E, Fernández EJ (2003) Determination of spatial variability of nutrient composition of soil solutions in greenhouses by using suction cups. *Soil Science and Plant Analysis* 34: 865-879.

- Liu CW, Sung Y, Chen BC, Lai HY (2014) Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International journal of environmental research and public health* 11: 4427-4440.
- Okajima H, (2001) Historical significance of nutrient acquisition in plant nutrition research. In *Plant Nutrient Acquisition* (pp. 3-31): Springer Japan.
- Ortiz SCA (1981) Evaluación de aptitud de las tierras de México para la producción de maíz y sorgo en condiciones de temporal. CEDAF. Colegio de posgraduados, Chapingo, Edo de México.
- Paul KI, Polglase PJ, O'connell AM, Carlyle JC, Smethurst P J, Khanna PK (2003) Defining the relation between soil water content and net nitrogen mineralization. *European Journal of Soil Science* 54: 39-48.
- Pregitzer KS, King JS, Burton AJ, Brown SE (2000) Responses of tree fine roots to temperature. *New Phytol* 147:105–115.
- Rodríguez NF (1988) Problemática de los suelos alcalinos: deficiencias y toxicidades nutrimentales; clorosis férrica en los suelos calcáreos. *Revista TERRA*. pp. 187-199.
- Rodgers CO, Barneix AJ (1988) Cultivar differences in the rate of nitrate uptake by intact wheat plants as related to growth rate. *Physiologia Plantarum* 72: 121-126.
- Salas MC, Vargas JB, Sánchez-Romer J (2009) Using suction cup to improve the monitoring of soil solution in a greenhouse fertigated crop. *Acta Horticulturae* 807: 301-306.
- SEMARNAT. (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Norma mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. *Diario Oficial de la Federación* del 2000 14: 17.
- Shen J, Tang C, Rengel Z, Zhang F (2004) Root-induced acidification and excess cation uptake by N<sub>2</sub>-fixing *Lupinus albus* grown in phosphorus-deficient soil. *Plant Soil* 260: 69–77.
- Singh BB, Jones JP (1976) Phosphorus sorption and desorption characteristics of soil as affected by organic residues. *Soil Sci Soc Am J* 40: 389–394.
- Smethurst PJ, Comerford NB (1993b) Potassium and phosphorus uptake by competing pine and grass: observations and model verification. *Soil Sci Soc Am J* 57: 1602–1610.

- Van der Ploeg RR, Beese F (1977) Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Science Society of America Journal* 4: 466-470.
- Venterink HO, Davidsson TE, Kiehl K, Leonardson L (2002) Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil. *Plant and Soil* 243: 19-130.
- Vert G, Chory J (2009) A toggle switch in plant nitrate uptake. *Cell* 138: 1064-1066.
- Yanai J, Araki S, Kyuma K (1995) Effects of plant grow on the dynamics of the soil composition in the root zone of maize in four Japanese soil. *Soil Science and Plant Nutrition* 41: 195-206.
- Yanai J, Linehan DJ, Robinson D, Young IM, Hackett CA, Kyuma K, et al. (1996) Effects of inorganic nitrogen fertilizer on the dynamics of the soil composition in the root zone of wheat. *Plant Soil* 180: 1-9.
- Yanai J, Kosaki T, Nakano A, Kyuma K (1997) Application effects of controlled-availability fertilizer on dynamics of soil solution composition. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1781-1786.