

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DESARROLLO DE MODELOS MATEMATICOS PARA EL ESTUDIO DE LA  
CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN LA SOLUCIÓN DEL SUELO

**Tesis**

Que presenta WILLIAN ALFREDO NARVAEZ ORTIZ  
como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS EN AGRICULTURA PROTEGIDA


Saltillo, Coahuila

Julio 2017

DESARROLLO DE MODELOS MATEMATICOS PARA EL ESTUDIO  
DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS EN LA SOLUCIÓN DEL  
SUELO.


**Tesis**

Elaborada por WILLIAN ALFREDO NARVAEZ ORTIZ como requisito parcial para  
obtener el grado de Doctor en Ciencias en Agricultura Protegida con la supervisión y  
aprobación del Comité de Asesoría




---

Dr. Adalberto Benavides Mendoza  
Asesor Principal



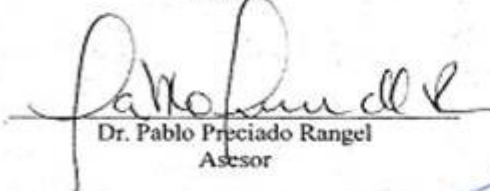
---

Dr. Manuel Humberto Reyes Valdés  
Asesor




---

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar  
Asesor




---

Dr. Pablo Preciado Rangel  
Asesor




---

Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente  
Asesor



---

Dr. Antonio Juárez Maldonado  
Asesor



---

Dr. Alberto Sandoval Rangel  
Subdirector de Postgrado

Saltillo, Coahuila, México

Julio 2017

## AGRADECIMIENTOS

A mi “**ALMA TERRA MATER**” la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por haberme formado como persona y como profesional.

Al **Gobierno de México** quien a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) me otorgó la beca para realizar los estudios de postgrado.

Al Programa de **Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida** y a la academia de maestros.

Al **Dr. Adalberto Benavides Mendoza** por todo lo aprendido durante este tiempo, por su apoyo brindado tanto desde el ámbito académico como personal. Siendo un ejemplo a seguir en el ámbito profesional.

Al **Dr. Manuel Humberto Reyes Valdés** por su tiempo y paciencia brindada durante la estancia y el desarrollo del presente trabajo; así como por todo el aprendizaje compartido.

Al **Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Antonio Juárez Maldonado, Dr. Marcelino Cabrera de la Fuente**, por su apoyo, facilidades y contribuciones para la finalización del presente trabajo.

Al **T.L.Q. Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel y la Lic. Ma. del Socorro Guillermo** por el apoyo otorgado y la asesoría brindada durante el trabajo de laboratorio.

Ema Laura García Enciso por su tiempo, dedicación y paciencia brindada en todo momento.

A mis compañeros de generación: Lucina Gómez, Viviana Sosa, Yesica Alvarado, Rebeca Casique, Lino Ramírez.

A los funcionarios de Control Escolar y la Subdirección de Postgrado de la UAAAN (Cony Tello Quintero, María Guadalupe Rodríguez, Dra. Rosa María Garza, Dr. Alberto Sandoval) por sus amables atenciones y facilidades otorgadas.

## DEDICATORIAS

### *A mis padres:*

María Adelaida Ortiz

Manuel Moisés Narváez Medina<sup>(†)</sup>

### *A mis hermanos:*

Johanna Araceli Narváez Ortiz

Edwin Esteban Narváez Ortiz

A pesar que la distancia nos ha impedido estar juntos como familia todos estos años, les estoy eternamente agradecidos por todo su apoyo, confianza y paciencia. Dedico este logro a todos ustedes con todo cariño por que son los seres que más amo, respeto y admiro.

# CARTAS DE ACEPTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS



Journal of Soil Science and Plant Nutrition

[HOME](#) [ABOUT](#) [USER HOME](#) [ANNOUNCEMENTS](#) [##BIOREN-UFRO##](#)

[Home](#) > [User](#) > [Author](#) > [Submissions](#) > [#3550](#) > [Summary](#)

## #JSSPN-2808 Multiple linear and polynomial models for the study of the dynamics of the soil solution

[SUMMARY](#) [REVIEW](#) [EDITING](#)

### Submission

**Authors** Willian Alfredo Narvaez-Ortiz, Adalberto Benavides-Mendoza, Luis Alonso Valdez-Aguilar, Marcelino Cabrera-De la Fuente, Pablo Preciado-Rangel, Manuel Humberto Reyes-Valdés

**Title** Multiple linear and polynomial models for the study of the dynamics of the soil solution

**Original file** [JSSPN-2808-3550-11763-1-SM.DOCX](#) 2017-06-11

**Supp. files** [JSSPN-2808-3550-11764-3-SP.JPG](#) 2017-06-11 [ADD A SUPPLEMENTARY FILE](#)  
[JSSPN-2808-3550-11765-1-SP.JPG](#) 2017-06-11  
[JSSPN-2808-3550-11766-1-SP.JPG](#) 2017-06-11  
[JSSPN-2808-3550-11767-1-SP.JPG](#) 2017-06-11  
[JSSPN-2808-3550-11768-1-SP.JPG](#) 2017-06-11  
[JSSPN-2808-3550-11769-1-SP.JPG](#) 2017-06-11

**Submitter** Willian Alfredo Narvaez Ortiz

**Date submitted** June 11, 2017 - 03:03 AM

**Section** RESEARCH ARTICLES

**Editor** None assigned

### Status

**Status** Awaiting assignment

**Initiated** 2017-06-11

**Last modified** 2017-06-14

### Submission Metadata

#### Authors

**Name** Willian Alfredo Narvaez-Ortiz

**Affiliation** Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

**Country** Mexico

**Competing interests** —  
[CI POLICY](#)

**Bio statement** —

**Name** Adalberto Benavides-Mendoza

**Affiliation** Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

**Country** Mexico

**Competing interests** —  
[CI POLICY](#)

#### USER

You are logged in as...

**william87**

[My Journals](#)  
[My Profile](#)  
[Log Out](#)

#### NOTIFICATIONS


[View \(4 new\)](#)  
[Manage](#)

#### AUTHOR

**Submissions**

[Active \(1\)](#)  
[Archive \(0\)](#)  
[New Submission](#)

Bio statement —

Name Luis Alonso Valdez-Aguilar 

Affiliation Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Country Mexico

Competing interests —

[CI POLICY](#)

Bio statement —

Name Marcelino Cabrera-De la Fuente 


Affiliation Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Country Mexico

Competing interests —

[CI POLICY](#)

Bio statement —

Name Pablo Preciado-Rangel 


Affiliation Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Country Mexico

Competing interests —

[CI POLICY](#)

Bio statement —

Name Manuel Humberto Reyes-Valdés 

Affiliation Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Country Mexico

Competing interests —

[CI POLICY](#)

Bio statement —

Principal contact for editorial correspondence.

## Title and Abstract

Title Multiple linear and polynomial models for the study of the dynamics of the soil solution

Abstract

The objective of the present work was to study the soil solution throughout time in pots under greenhouse conditions. The work consisted in monitoring the solution of a calcareous soil and a forest soil without a vegetal crop, with different types of fertilization: treatment 1: absolute control (irrigation water); treatment 2: Steiner nutrient solution; treatment 3: solid fertilizers; and treatment 4: Vermicompost tea (aqueous extract). The samples were collected weekly using lysimeters for 14 weeks and were analyzed to determine: nitrate content, total nitrogen, calcium, potassium, magnesium, sodium, sulfur, zinc, boron, pH, electrical conductivity and oxide-reduction potential. In order to understand the interactions between treatments, soil type, and time over ion behavior and availability, linear and polynomial models were used, selected by a cross-validation method, which resulted in robust models, where it was found that the pH behavior is associated with the type of fertilization and soil type, with the elapsed time being a non-significant factor. The use of mentioned models showed robust models. It was found that the behavior of the pH is associated with the type of fertilization and soil type, with the elapsed time as a factor not significant. On the other hand, time influenced the behavior of the remaining ions as well as their availability.

## Indexing

Academic discipline and sub-disciplines —

Keywords linear models, soil pore water, nutrient biodisponibility, calcareous soil, forest soil.

Language en

### Supporting Agencies

Agencies UAAAN, CONACYT

#### **Chilean Society of Soil Science**

Scientific and Technological Bioresource Nucleus BIOREN-UFRO  
Universidad de La Frontera  
Avenida Francisco Salazar 01145  
P.O. Box 54-D  
Temuco, Chile.



[jssp@ufromail.cl](mailto:jssp@ufromail.cl)

## INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
El suelo.....	5
El suelo como sistema abierto y disperso .....	6
Los subsistemas que conforman el sistema edáfico .....	8
El sistema edáfico y su impacto sobre la composición de la solución del suelo.....	9
El estudio de la solución del suelo .....	12
REFERENCIAS.....	16
ARTICULO .....	22
Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México .....	22
ARTICULO .....	38
Multiple linear and polynomial models for the study of the dynamics of the soil solution.....	38
CONCLUSIÓN GENERAL.....	75



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la flora y la fauna se concentra alrededor de la rizósfera o suelo que es abundante en biodiversidad y es considerado un sistema abierto, que es el resultado de un proceso natural anterior formando parte de una continua interacción con más sistemas como lo son: la hidrósfera, litósfera, atmósfera y biósfera, permitiendo el intercambiando de materia y energía, lo cual ocasiona cambios en su entropía permitiendo el desarrollo de procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología (forma) y propiedades (Degioanni, 2008).

El sistema suelo está conformado por tres fases que corresponden con los estados físicos de la materia: una sólida que presenta los componentes minerales y orgánicos; una fase gaseosa y una fase líquida. Las fases del suelo no se comportan de forma individual y cada una de ellas está conformada por infinidad de elementos relativamente idénticos que interactúan entre sí para el funcionamiento tanto de sus fases así como de todo el sistema suelo, esto con la finalidad de alcanzar determinados propósitos; desde el enfoque agrícola uno de los objetivos primordiales del sistema suelo es el crecimiento y desarrollo de las plantas, debido a que las plantas toman de ahí varios nutrientes y es donde se inicia y se termina la cadena alimentaria (Mengel and Kirkby, 2001), El mencionado material de formación de las plantas está compuesto de: materia orgánica, agua y minerales, la proporción de estos tres componentes puede variar pero siempre en el siguiente orden de magnitud: el agua en un 70%, el material orgánico en un 20% y el contenido mineral con un 3%, todo esto en base al peso fresco. Las tres fases influyen en el suministro de nutrientes a las raíces de las plantas. La fase sólida es el principal depósito de nutrientes por su contenido de partículas orgánicas e inorgánicas. La fase líquida es el responsable del transporte de nutrientes en el suelo a las raíces de las plantas y la fase gaseosa está involucrada en el intercambio gaseoso que se produce entre los numerosos organismos vivos del suelo (raíces de plantas, bacterias, hongos y animales) y la atmósfera (Akinrinde, 2004). Por lo tanto es evidente que la fase sólida a pesar de ser el reservorio de nutrientes no es el único componente del sistema involucrado en el abastecimiento de los nutrientes hacia las plantas, recordando también que solo una pequeña parte de cada nutriente estará en forma disponible para las plantas, del total de nutrientes presentes en la fase sólida

(mineral y orgánica) (Thompson and Troeh, 2002). Entonces la disponibilidad de los nutrientes dependerá del resultado de las interacciones de varios elementos y/o componentes que conforman el sistema suelo (Badillo Y Rodríguez, 1975; Navarro y Navarro, 2003), como lo son: el contenido de materia orgánica involucrada en la capacidad de adsorción y fuerza de ligando con la mayoría de elementos metálicos (McBride, 1999); así como en las reacciones del pH del suelo debido a los diversos grupos activos que aportan grado de acidez, a las bases de cambio y al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos aportados al suelo (Aguilera, 2000). La capacidad de intercambio catiónico (C.I.C) responsable de procesos de adsorción y desorción de cationes del complejo coloidal con la fase líquida del suelo (Fuentes, 1971). El tipo de arcilla es un factor importante en el procesos de C.I.C debido a que poseen cargas electrostáticas negativas que los absorben (Arias-Jiménez, 2007). Los microorganismos involucrados en la disponibilidad de nutrientes mediante procesos de mineralización (Hernández *et al.*, 2006). La capacidad buffer responsable de reponer lo que se ha removido de la solución del suelo por medio de la fase sólida (Barber, 1984; Van Rees *et al.*, 1990; Comerford, 1999; Tinker y Nye, 2000). Estas y otras características del suelo en su conjunto rigen sobre la disponibilidad de nutrientes (Thompson and Troeh, 2002). El resultado de todas estas series de procesos e interacciones se ven reflejadas en la composición de la solución del suelo (Jenny, 1961; Olarte *et al.*, 2001), la solución del suelo está en contacto directo con las raíces de las plantas y es de donde las plantas toman los nutrientes, dicha solución del suelo se encuentra en homeostasis química con la materia orgánica y la fase mineral del suelo (Mengel and Kirkby, 2001).

A pesar de lo antes mencionado, en la actualidad aún se vienen realizando los análisis de suelo enfocados al estudio de la fase sólida, mismos estudios solo indican la capacidad potencial de aporte de nutrimentos minerales de la fase sólida hacia la solución del suelo (Mengel and Kirkby, 2001); en cambio los análisis de la solución del suelo presentan los valores reales de la concentración de elementos disponibles para las plantas (Mengel and Kirkby, 2001).

Desde un punto de vista práctico el conocer la composición de la solución del suelo permitirá saber el nivel de nutrientes disponibles en el suelo y podrá revelar el aporte relativo y específico que el suelo puede proporcionar a la planta luego de alcanzar un

equilibrio fisicoquímico en este estado de humedad (Figuroa *et al.*, 1994). Un método para la determinación de la disponibilidad de nutrimentos en el suelo es mediante un análisis de extracto de pasta de saturación, el cual no es factible por que el suelo pasa a ser un objeto de muestreo constante, es por eso que el uso de lisímetros para el análisis de la solución del suelo es ideal por ocasionar pocos trastornos en la zona de la raíz (Neilsen *et al.*, 1998), siendo un método no destructivo y que nos permite obtener muestras *in situ*, lo que presenta indudables ventajas (Rhoades y Oster, 1986; Starr, 1985) ya que mediante este método se garantiza que las muestras sean similares a lo que ocurre en condiciones naturales en la zona radical (Mendoza-Grimón *et al.*, 2003). Como ya se explicó el proceso físico-químico determina la composición del agua del suelo que es un sistema muy complejo. Múltiples factores físicos, químicos y biológicos tanto del sistema edáfico como del clima y la comunidad vegetal, así como el propio manejo agronómico del hombre, vuelven muy difícil desarrollar modelos mecanísticos predictivos que permitan predecir la composición química de la solución del suelo, para ello debería de determinarse un buen número de variables del suelo, introducirlo en un modelo y llevar a cabo el contraste de los valores reales de concentraciones de iones minerales. El problema es que los resultados tendrían una aplicación limitada ya que cambios mínimos en el sistema físico-químico-biológico del suelo darían lugar a grandes cambios en la composición de la solución del suelo, lo que se traduciría en un pobre poder predictivo (De Willigen, 1991), esta característica de no computabilidad de las propiedades del sistema global a partir de sus componentes individuales es compartida por muchos sistemas complejos (García, 2006). Es por ello que se propuso el estudio de la composición de la solución del suelo a través del tiempo, mediante la ayuda de equipos lisímetros, como una posible herramienta de manejo para mejorar la productividad agrícola, mediante modelos matemáticos que permitan modelar y predecir las propiedades y comportamientos de la solución del suelo, para combinaciones específicas del tipo de suelo y cultivo. La utilización de métodos multivariados es una herramienta robusta para el análisis de datos, como lo es el método de análisis de componentes principales el cual nos permite reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, permitiéndonos estudiar la dinámica de la concentración iónica de la solución del suelo como un solo conjunto, logrando crear una función lineal que explica el comportamiento multivariado del sistema constituido por la solución del suelo (James

*et al.*, 2014); otra herramienta dentro de los análisis multivariados es el uso de modelos múltiples lineales y polinomiales con fines predictivos utilizando variables categóricas y numéricas que nos permitan predecir el comportamiento individual de los diferentes iones en la solución del suelo bajo determinadas condiciones de manejo y tipo de suelo (James *et al.*, 2014).

En este estudio se utilizaron las metodologías mencionadas para analizar y modelizar la concentración de elementos en la solución del suelo para su predicción.

### **OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar modelos matemáticos útiles para la predicción de la composición de la solución del suelo.

#### **Objetivos específicos**

Describir la relación existente entre los diferentes iones, así como su comportamiento tanto a nivel individual como colectivo.

Caracterizar la dinámica de la composición de la solución del suelo bajo diferentes regímenes de manejo y diferentes cultivos mediante un modelo matemático.

#### **Hipótesis**

Mediante un modelo matemático basado en muestreos repetitivos de la solución del suelo, es posible predecir el comportamiento del pH, Conductividad eléctrica, potencial oxido reducción y de los diferentes iones en la misma.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### **El suelo**

Dado que el sistema edáfico o suelo es el resultado de diversas reacciones físico, químicas y biológicas es de común creencia que el suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas, no sujetas a ninguna organización. Pero que en realidad se trata de un conjunto con una organización definida y con propiedades que varían "vectorialmente". Esta variación en sus propiedades cambia más rápidamente en forma vertical que en la horizontal (perfil del suelo) (Badillo y Rodríguez, 1975; Navarro y Navarro, 2003), formando de este modo macro características pedogénicas en la fase sólida a largo plazo (Targulian and Krasilnikov, 2007), diferenciándose horizontes de los componentes minerales y orgánicos que se diferencia del material parental en su morfología, en sus propiedades físicas, químicas y características biológicas (Jenny, 1941). Dada toda esta organización los suelos son considerados como formaciones geológicas naturales desarrolladas bajo condiciones muy diversas de climas y materiales de origen lo cual justifica su continua evolución y su gran variedad. (Yallon, 1975; Navarro y Navarro, 2003). Haciendo del suelo un cuerpo natural, dinámico y en equilibrio, tanto con el medio exterior (medio ambiente) así como un sistema cuyos componentes están física y químicamente en un equilibrio dinámico (Joffe, 1936; Kellog, 1936; Camargo y Vageler, 1938). Por tal motivo el suelo no puede ser considerado como un sistema estático sino más bien como un sistema dinámico (Jenny, 1941).

Por todas las características y propiedades que presenta el suelo, este debe ser considerado un sistema o en su caso como un meta sistema, su funcionamiento como sistema está determinado por la interacción entre sus subsistemas y sistemas circundantes (Dijkerman, 1974); al ser un sistema es el resultado de interacciones mutuamente transformadas y englobadas de dos o más sistemas. Por tal motivo cuando se habla del suelo no solamente nos referimos a un cuerpo natural con determinadas propiedades definidas sino también a su posición geográfica y sus alrededores, es decir el clima, la vegetación y la vida animal. (Jenny, 1941).

### **El suelo como sistema abierto y disperso**

Al ser un sistema, el suelo se cataloga como un sistema abierto y disperso que acumula e intercambia materia y energía térmica con su entorno. Lo cual es indicativo que dichos flujos de materia y energía no solamente provienen del material parental, sino también de factores como el tiempo, clima, topografía así como de los mismos microorganismos que pueden ser parte de la atmósfera (Jenny, 1941). Por lo tanto, el sistema suelo se mantiene lejos de un equilibrio termodinámico y está en constante evolución (Nicolodi and Gianello, 2015). Ocasionalmente que el estado termodinámico del sistema suelo sea extremadamente complejo poseedor de una gran número de propiedades y que estará definido por los factores de formación del suelo, mismos que están íntegramente relacionados para la formación del sistema suelo mediante una serie de procesos geológicos destructivos y pedológicos creativos como son los físicos (intemperismo), químicos y biológicos (Jenny, 1941), que están en función del tiempo (Dokuchaev, 1967), durante esta etapa, el suelo incorpora y almacena más energía que la que cede disminuyendo su entropía interna y adquiriendo, de esta manera un determinado nivel de energía libre cuando alcanza el equilibrio energético cuasi-estacionario (Smeck *et al.*, 1983) y que en gran medida determinan las propiedades físicas y químicas del suelo. Todos estos procesos termodinámicos se consideran mecanismos de transducción de energía (Karnani and Annala, 2009), y ocasionan o producen un aumento en la entropía del sistema debido a las alteraciones biogeoquímicas de las rocas para la formación y organización de los horizontes del suelo. Los cambios en la entropía del sistema suelo dan lugar a un sistema complejo que es controlado por las vías de desarrollo convergentes y divergentes (Phillips, 2000).

La complejidad y diversidad del sistema suelo está influenciada por sus propiedades cuyos valores numéricos dependen de la cantidad de material en el suelo (volumen y entropía); estas propiedades son: extensivas que no dependen de la materia del suelo (presión, densidad, temperatura), y las propiedades intensivas que son variables del campo matemático (sus valores están asociados con puntos en el espacio que se encuentran en el suelo), esta última propiedad es la responsable de la ya famosa heterogeneidad del suelo siempre y cuando cualquiera de sus propiedades intensivas varíen de un punto al otro.

Tanto desde los efectos de los procesos químicos del suelo así como de los efectos directos del campo gravitacional de la tierra (Sposito, 1981).

Las propiedades del sistema suelo están fundamentalmente relacionadas entre sí, se dice que el sistema asume diferentes estados en gran medida impredecibles hacia un estado casi estable o estacionario y del emergen propiedades con determinadas funcionalidades (Mengel and Kirkby, 2001).

Chesworth (1973, 1976) indica que los estados estacionarios en los sistemas del suelo sólo pueden ser efímeros debido a los flujos externos y gradientes termodinámicos que cambian constantemente. Se sigue entonces que el sistema suelo debe estar en un estado de ajuste constante a flujos variables. Sin embargo, se puede contrarrestar que los estados estacionarios no requieren flujos constantes, sólo un estado independiente del tiempo del sistema. Cuando uno o más de sus propiedades sufren cambios, en teoría el cambio más pequeño en cualquiera de sus propiedades dará lugar a un nuevo suelo, conociéndose a los diferentes estados del sistema suelo como “tipos de suelo” (Mengel and Kirkby, 2001, Bremeen y Buurman), lo que significa que un suelo tiene más de una posible vía de desarrollo (Phillips, 1998; Huggett, 1998).

Por tal motivo el sistema suelo no puede ser percibido como un componente estable ni como un sistema estático, sino más bien como un sistema dinámico (Jenny, 1941), constantemente perturbado por fuerzas internas y externas. Las perturbaciones (externas-internas) pueden ocasionar dentro del sistema, constantes interacciones originando fenómenos de desorden y orden (autorganización) o como se conoce en la pedogénesis como dinámicas evolutivas progresivas y regresivas; las primeras responsables del desarrollo del perfil, favoreciendo la formación de horizontes y la segunda provocando un rejuvenecimiento o simplificación del perfil de suelo, lo que se traduce en una pérdida de horizontes:  $S = (P,R)$ , donde S: suelo; P: pedogénesis progresiva; y R: pedogénesis regresiva, (Johnson y Watson Stegner, 1987).

### **Los subsistemas que conforman el sistema edáfico**

El sistema suelo se caracteriza por lo que se le puede llamar organización jerárquica, esto significa que puede estar constituido por diversos subsistemas con estructura y dinámica diferentes (Whyte *et al.*, 1969). Cada sistema o subsistema es un conjunto de objetos unidos por alguna forma de interacción o interdependencia de tal manera que forman una totalidad o un todo (Patten, 1971). El funcionamiento del sistema se puede entender a partir de la identificación de sus principales funciones o propósitos tanto como un sistema, como de sus subsistemas y de la interacción entre ellos. Por lo tanto, para comprender su funcionamiento, es importante conocer los elementos principales, las fuerzas e interacciones que estimulan los procesos que permiten al sistema suelo el ejercicio de sus funciones. Una de sus funcionalidades es actuar como un almacén de nutrientes y ponerlos de forma disponible para el desarrollo de las plantas (Nicolodi and Gianello, 2015).

Vistos desde el enfoque termodinámico catalogan al sistema suelos como un sistema multicomponente y multifuncional, conformado por subsistemas que corresponden a los estados físicos de la materia: sólido, líquido y gaseoso; así como un repositorio de campos electromagnéticos y gravitacionales. (Kibblewhite *et al.*, 2008, Sposito, 1981, Mengel and Kirkby, 2001).

Los subsistemas o fases que forman parte del sistema suelo presentan características propias pero son dependientes una de la otra, presentando elementos que son relativamente idénticos. La fase sólida que es el principal depósito de nutrientes por su contenido de minerales y materia orgánica responsables de dar lugar a la composición y propiedades del suelo (Buscot, 2005). Una fase líquida o agua del suelo responsable del transporte de nutrientes en el suelo a las raíces de las plantas y la fase gaseosa involucrada en el intercambio gaseoso que se produce entre los numerosos organismos vivos del suelo (raíces de plantas, bacterias, hongos y animales) y la atmósfera (Akinrinde, 2004). Todas las fases en conjunto ocupan determinado espacio y se caracterizan por horizontes.



### **El sistema edáfico y su impacto sobre la composición de la solución del suelo**

La composición y la dinámica de la solución del suelo es muy variable y compleja, ya que está regida por la intensidad, tiempo y tipo de reacciones que sucedan en la fase sólida con la interacción del agua que ingrese al sistema suelo (todo lo que representa el sistema edáfico). Su heterogeneidad depende de factores tales como la composición de la fase sólida (mineral-orgánica), profundidad del suelo, el contenido de agua del suelo, pH, capacidad de intercambio catiónico, potencial redox, poder amortiguador o buffer del suelo, la cantidad de materia orgánica del suelo, la actividad microbiológica, intercambio iónico, adsorción, desorción, precipitación, disolución, difusión, presencia de la zona radical de cultivos, la estación y la aplicación de fertilizantes, así como por los gradientes que resultan entre los sitios de absorción y los iones que se suministran en forma de fertilizantes o los que forman parte de los componentes de la fase sólida etc (Marschner, 2011; Bolt, 2013).

La fase sólida mineral es uno de los factores principales que influyen en los procesos que dan como resultado la solución del suelo, esta fase está constituida por sustancias inorgánicas y naturales, que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de sus átomos e iones (Badillo Y Rodríguez, 1975). Estas características están íntimamente relacionadas con su tamaño, donde existen partículas gruesas así como fracciones finas, limos y arcillas presentes en diferentes proporciones dando origen a la textura del suelo (Navarro y Navarro, 2003). Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio, de magnesio, hierro u otros metales hidratados. La solución del suelo o agua del suelo depende directamente del tipo y cantidad de arcilla que esté presente en el sistema y es la que indicará la capacidad de retención del agua (Badillo y Rodríguez, 1975). La fase sólida orgánica es otro componente de la fase sólida del suelo que interviene en la composición de la solución del suelo, modificando la estabilidad de agregados en el sistema suelo así como su estructura que están relacionados directamente con el volumen del agua del suelo en la solución del suelo (Bolt, 2013). Dentro de los componentes orgánicos se presentan las sustancias húmicas que intervienen en la movilización de los iones metálicos del suelo (McBride 1999), y por ende también afectan a la biodisponibilidad y la toxicidad de estos iones en el medio (solución del suelo). Además el contenido de materia orgánica afecta la reacción

del pH de la solución debido a los diversos grupos activos que aportan grados de acidez, a las bases de cambio y al contenido de nitrógeno presente en los residuos orgánicos aportados al suelo (Aguilera, 2000). Estos procesos de protonación y desprotonación influyen sobre el comportamiento de las sustancias húmicas, estas relaciones son de particular importancia en los suelos orgánicos en los que la capacidad de intercambio catiónico se origina principalmente de humatos (Mengel and Kirkby, 2001).

El contenido y la composición de los componentes coloidales (mineral-orgánico), presentes en la fase sólida juegan un papel importante en la retención de humedad y la liberación de nutrientes por los suelos hacia la solución del suelo (Sposito, 1981). Poseen la capacidad para retener y liberar especies iónicas que es una parte esencial de su funcionamiento en la biosfera terrestre (Sposito, 1981). Los coloides minerales y los orgánicos son poseedores de cargas eléctricas negativas superficiales las cuales dependen de la intensidad de la carga, misma que está relacionada con la estructura y composición de la arcilla y contenido de materia orgánica (Benton, 2012). Los iones electrostáticamente son adsorbidos a la superficie de la partícula con carga negativa, dentro de los iones adsorbidos están los del agua ( $H^+$ ) y demás elementos químicos como los cationes  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $NH_4^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Al^{+++}$ ,  $Fe^{+++}$  y diversos oligoelementos (Badillo Y Rodríguez, 1975). Los cationes pueden ser retenidos por los coloides del suelo o estar libres y presentes en la solución del suelo pero en menor concentración. Existe un equilibrio que se establece entre los subsistemas de la fase sólida y la fase líquida, pero aun así pueden desplazarse en uno u otro sentido (Navarro y Navarro, 2003).

Los procesos que ocurren generalmente entre el líquido (agua del suelo) y las fases sólidas (fracción coloidal del suelo) (Mengel and Kirkby, 2001), se llama capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual modifica la fase iónica y están ligados a los procesos redox y el pH de la solución del suelo. La CIC actúa como un regulador y es probablemente la propiedad de mayor importancia en el sistema suelo y puede definirse como el proceso físico-químico por el cual el complejo coloidal adsorbe o desorbe cantidades equivalentes de cationes de la fase líquida o de contacto del suelo (Fuentes, 1971).

Los procesos de óxido-reducción (REDOX) y el pH del sistema edáfico, modifican la reactividad, movilidad cíclica y la solubilidad de diversos elementos en la solución del

suelo, como es el caso del hierro, manganeso, nitrógeno, carbono, azufre y otros elementos. Estas reacciones redox participan en una multitud de procesos químicos y biológicos del suelo (Navarro y Navarro, 2003, Benton, 2012). En cualquiera de los procesos de óxido reducción se presentan notables cambios químicos en el sistema suelo que influyen en la solución del suelo, especialmente con respecto a los óxidos e hidróxidos y la materia orgánica (Yunyu pan, 2014).

El sistema radicular de las plantas puede modificar la química de la rizósfera liberando y absorbiendo compuestos orgánicos, intercambio de gases ( $\text{CO}_2/\text{O}_2$ ) relacionado con la respiración de las raíces y de los microorganismos, también mediante la adsorción de nutrientes por las raíces, así como la liberación de agua y nutrientes, todo esto asociado con la absorción o extrusión de protones modificando de esta manera el potencial redox y el pH de la solución del suelo (Marschner, 2011).

Los cationes adsorbidos pueden perturbar el volumen del agua en la solución del suelo dada la naturaleza polarizada de los cationes de atraer moléculas de agua a diferente intensidad, la cual dependerá del tipo de cationes atraídos. El agua adsorbida por cada catión aumenta con la carga eléctrica de este y con su radio iónico. Las moléculas de agua no sujetas a la fase mineral por las fuerzas de superficie mantienen sus características usuales (agua libre o gravitacional) (Badillo y Rodríguez, 1975). El poder de adsorción más específicamente la superficie específica de las arcillas y su velocidad de adsorción se ven involucrados en la variación de la composición iónica de la solución del suelo (Bolt, 2013).

Una propiedad presente en el sistema edáfico es el poder buffer o amortiguador del suelo, este fenómeno es fundamental en el funcionamiento y comportamiento de la solución del suelo, porque nos indica la capacidad que tiene el sistema edáfico más en específico la fase sólida del suelo para reponer o mantener las concentraciones o niveles de determinado elemento en la solución del suelo (Barber, 1984; Van Rees *et al.*, 1990a; Comerford, 1999; Tinker y Nye, 2000). El conocer el poder amortiguador del suelo se ha utilizado para conocer la disponibilidad de nutrientes (Van Rees *et al.*, 1990). La C.I.C., el contenido de materia orgánica así como el tipo de arcilla está íntimamente relacionada con la capacidad buffer del suelo, ocasionando que el grado de variación de estas propiedades modifique el poder buffer del suelo (Suárez y Márquez, 1992).

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

El estudio de los niveles nutrimentales del sistema suelo se ha realizado desde un enfoque reduccionista el cual nos ha dado una comprensión profunda de las unidades simples del sistema suelo (Coveney & Fowler 2005), enfocándonos exclusivamente al estudio de determinadas propiedades físicas, químicas y biológicas del subsistema sólido, si bien el estudio de mencionado subsistema es un indicativo del contenido potencial de aporte mineral de la fase solida hacia la solución del suelo, más sin embargo lo importante es conocer el contenido nutrimental asequible para la planta “elementos asimilables”. Lo cual desde el análisis y estudio de la fase solida es difícil debido a lo antes mencionado y a la variabilidad de los métodos de análisis que dependen mucho del potencial extractor de las diferentes técnicas empleadas en los laboratorios agrícolas ya que este dependerá del tipo de suelo así como del cultivo presente, a sabiendas que los mecanismos extractores no son idénticos entre las diferentes especies vegetales (Navarro y Navarro, 2003).

Dentro de los subsistemas del suelo la fase solida es la fuente primordial de nutrientes y por ende es la más estudiada desde los diferentes puntos de vista tanto a nivel físico, químico y biológico (Benton, 2012). Situación dada debido a que la fase solida presenta mucho menos fluctuaciones internas y alta resistencia (Ponge, 2005), y puede servir, en términos generales para la caracterización del suelo así como el análisis desde una perspectiva de la fertilidad del suelo (Huggett, 1975). Situación contraria con lo que sucede en los subsistemas: líquido y gaseoso que presentan mayor variabilidad en su comportamiento haciendo que sea un conflicto al utilizarlas con finalidades de caracterización del suelo desde un enfoque de la fertilidad. (Navarro y Navarro, 2003).

Sin embargo desde el punto de vista nutrimental y del manejo de los cultivos la fase líquida o solución del suelo es de suma importancia, debido a que está en contacto directo con las raíces de las plantas y es de donde absorben los nutrientes (Menguel y Kirby, 2001). Y es el resultado integro de la interacción de todos los subsistemas del sistema suelo, y que puede ser catalogada como una propiedad emergente, la cual puede ser estudiada desde su composición mineral para poder comprender lo que realmente está sucediendo en el sistema suelo desde una perspectiva nutrimental. Mencionada propiedad emergente le permitirá al sistema edáfico llevar a cabo determinadas funciones (Vezzani, 2001;

Concepción, 2002; Schmitz, 2003). Dentro de ella, la función de proveer en forma asimilable los diferentes nutrientes para el crecimiento de las plantas y organismos presentes en sistema edáfico.

En cuanto a la solución del suelo es difícil hacer afirmaciones con respecto a su composición elemental, debido a la diversidad de la fase sólida del suelo y a su estado variable de agregación, y por el hecho de que esta fase está en contacto con una fase líquida del suelo, que es constante y rápidamente cambiante en cantidad. Sin embargo, algunas condiciones del contorno se pueden enumerar y con esto podrían indicarse ciertas tendencias y aproximaciones (Bolt, 2013). El grado de concentración elemental de la solución del suelo, es un indicador de la capacidad que presenta el sistema edáfico de proveer nutrientes hacia un medio acuoso, que está en contacto directo con raíces de las plantas (Mengel and Kirkby, 2001) y es de donde toman los nutrientes. Hay que considerar que esta propiedad emergente (concentración elemental de la solución del suelo), es fluctuante, y por lo tanto no podemos especificar ¿qué niveles son los adecuados para el crecimiento de las plantas?, más bien se le puede atribuir que tanto influye lo presente en la solución del suelo (concentración elemental) sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, y de esa forma poder con mayor detalle especificar niveles idóneos para determinados cultivos, el poder describir cuantitativamente el efecto de adicionar o eliminar determinada cantidad de materia del sistema edáfico y como está influye en la composición elemental de la solución del suelo nos ayudaría a comprender desde el punto de vista de la fertilidad de suelo la concentración de un determinado macro o micronutriente antes y después de haber sido sometido a todos los procesos del sistema edáfico (Bolt, 2013).

Para poder resolver todas estas incógnitas, el estudio de la composición elemental de la solución del suelo, resultaría una adecuada elección, de esta forma no caeríamos en el reduccionismo de los sistemas, sino más estaríamos estudiando el resultado de los efectos directos de las interacciones del sistema edáfico como un todo y no solo comprender de forma cuantitativa y detallada los procesos de interacción que rigen la composición de la solución del suelo (Bolt, 2013). La composición elemental de la solución del suelo al ser una propiedad emergente es *per se* dinámico y complejo que refleja el impacto global de todos los componentes bióticos y abióticos, incluyendo el proceso de nutrición de las

plantas (Snakin, 2001), y de naturaleza espacial, temporal o espaciotemporal, ocasionando que sea disipativo y no lineal (Coveney & Fowler, 2005).

Estos autores consideran de gran relevancia el estudiar la composición elemental de la solución del suelo como una propiedad emergente del sistema edáfico, analizando los diferentes iones presentes en la misma. Siendo una técnica idónea para la comprensión y determinación del grado de disponibilidad de los diferentes elementos, así como sus relaciones y distribuciones dentro de esta propiedad y cuya composición se asocia a grandes rasgos con los componentes inorgánico, orgánico y biótico del suelo (sistema edáfico) (Menguel y Kirby, 2001).

Debido a que la composición elemental de la solución del suelo es de gran variabilidad su estudio debe ser dinámico, y el tiempo de estudio de esta propiedad lo definirá el objetivo que se trace, pudieran ser periodos adecuados a las etapas fenológicas de los cultivos, a las épocas del año, al tiempo de monitoreo de técnicas de rehabilitación de suelos contaminados etc.

La implementación de modelos matemáticos en el estudio de los sistemas complejos, es de vital importancia para la comprensión de cualquier sistema, la recolección de muchos datos experimentales, no es indicativo que tenemos un gran conocimiento del sistema, sino solo gran cantidad de información. El paso crucial en estos estudios es la utilización de toda esta información desde una perspectiva predicativa y del cómo funciona el sistema. En el estudio de sistemas complejos y de sus propiedades emergentes se pueden utilizar enfoques multidisciplinarios que estudian las interacciones múltiples y complejas de y entre los componentes medidos en el sistema (Porrás & Bayman, 2011). Dentro de este tipo de estudios se encuentran los análisis multivariados, un detalle con este tipo de análisis es el uso de toda la información recolectada, con la cual existe el riesgo de usar información repetida que tenga alta colinealidad, misma que puede irse depurando para elegir determinadas variables (variables independientes o variables de acondicionamiento) que influyan más en el sistema y puedan explicar su funcionamiento (Jenny, 1941), en la estadística multivariada los métodos que pueden ser utilizados en el estudio del conocimiento de la composición elemental de la solución del suelo se encuentran:

Análisis no supervisados: 1). el análisis de componentes principales puede ser utilizado como herramienta descriptiva que reduce la dimensionalidad del conjunto de datos multivariados, remueve las interrelaciones existentes entre variables, organiza los datos en forma de vectores ortogonales con este método lo que se logra es crear una función lineal con la cual explicar el comportamiento multivariado del sistema constituido por la solución del suelo (James *et al.*, 2014). 2). Análisis de conglomerados (clusters) utilizado para el agrupamiento de variables y reconocer patrones jerárquicos y orientarnos a la reducción de la dimensión de estudio en grupos homogéneos en función de las similitudes o similitudes entre ellos (Peña, 2002).

Análisis predictivos: 1) regresiones múltiples que nos ofrecen la ventaja de utilizar toda la información en la construcción del modelo seleccionando las variables que influyan en la respuesta y descartando las variables que no aporten información y no tengan efectos significativos (James *et al.*, 2013). 2) correlaciones canónicas que tienen como finalidad estudiar la relación multivariante de dos grupos homogéneos de variables, en particular, los dos grupos pueden corresponder a las mismas variables medidas en dos momentos distintos en el tiempo y el espacio (Peña, 2002).

El uso de modelos de ecuaciones estructurales es otra opción a considerar como una herramienta para el estudio de la composición elemental de la solución del suelo, el cual nos permite el uso de dos o más estructuras (causa-efecto) para modelar las relaciones multivariantes (Grace, 2006), y nos representa las relaciones directas versus las indirectas, así como las contribuciones parciales de las variables explicativas correlacionadas e hipótesis alternativas. La metodología también permite la inclusión de variables latentes no observadas y el agrupamiento de efectos de variables múltiples en variables compuestas (Grace y Bollen, 2008). Además, puede utilizarse para derivar nuevas hipótesis.

El uso de modelo de redes neuronales es método confiable dentro del estudio de sistemas biológicos y se podría adaptar en el estudio de la solución del suelo, ya que puede reconocer y modelar complejas relaciones no lineales entre la entrada y la salida de un proceso biológico debido a su alta aptitud de aprendizaje (Hashimota, 1997; Nazmul Karim *Et al.*, 1997; Patnaik, 1999), construyendo sistemas capaces de aprender y adaptarse a condiciones variantes y hasta predecir el estado futuro de algunos modelos.

## REFERENCIAS

- Aguilera, S. M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín N° 14. Valdivia, Chile. p. 77-85.
- Akinrinde E. A. (2004). Soils: Nature, Fertility Conservation and Management. AMS Publishing. Austria. pp 113.
- Akinrinde, E. A. (2004). Soils: Nature, Fertility Conservation and Management. AMS Publishing. Austria. pp 113.
- Arias, Jiménez A. C. (2007). Suelos tropicales. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José Costa Rica. pp 188.
- Barber, S. A. (1984). Soil nutrient bioavailability. John Wiley. New York
- Benton-Jones, J. J. (2012). Plant nutrition and soil fertility manual (second edition). CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 271 p.
- Bolt, G. H., de Boodt, M. F., Hayes, M. H., McBride, M. B., y de Strooper, E. B. A. (Eds.). (2013). Interactions at the Soil Colloid: Soil Solution Interface (Vol. 190). Springer Science & Business Media. Netherlands. 604 pp.
- Box, G.E.P., Hunter, W.G., Hunter, J.S. (1999a). Modelado empírico. En: Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos. Editorial Reverté. Barcelona, España. pp. 301-315.
- Box, G.E.P.; Hunter, W.G.; Hunter, J.S. (1999b). Construcción mecanicista de modelos. En: Estadística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos. Editorial Reverté. Barcelona, España. pp. 555-570.
- Brady, N., y Weil, R. (1999). The nature and properties of soils. 12<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 881 p.
- Buscot, F. y Varma, A. (2005). Microorganisms in soils: roles in genesis and functions. Springer. Germany. 425 p.
- Camargo, T., y Vageler, P. (1938). Soil in its modern conception - O solo na sua concepção moderna. In Instituto Agrônômico do Estado (Ed.), The soils of São Paulo State II - Os solos do Estado de São Paulo II. Campinas, SP, Brazil: Imprensa Oficial do Estado



- Castellanos-Moncho, T., Tarquis-Alfonso, A., Morató-Izquierdo, C. y Garcia-Mouton E. (2006). Modelos estocásticos para la predicción de temperaturas mensuales en distintas estaciones de la comunidad de Madrid. *Eidenar*. 2(2): 41-46.
- Chesworth, W. (1973). The parent rock effect in the genesis of soil. *Geoderma*, 10: 215-225.
- Chesworth, W.(1976). Conceptual models in pedogenesis: A rejoinder. *Geoderma*, 16: 257-260.
- Comerford, N. (1999). Mecanismos de captación de nutrimentos en ecosistemas forestales: de cómo interpretar la fertilidad en el contexto de la conservación de recursos genéticos. pp. 127-135. In: Orellana, R., A. Escamilla y A. Larqué (eds.). *Ecofisiología vegetal y conservación de recursos genéticos*. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Mérida, Yucatán, México
- Coveney, P. V., y Fowler, P. W. (2005). Modelling biological complexity: a physical scientist's perspective. *Journal of the Royal Society Interface*. 2(4): 267-280.
- De Willigen, P. (1991). Nitrogen, turnover in soil-crop system; comparison of fourteen simulation model. *Pert. Res*. 27: 141-149.
- Dijkerman, J. C. (1974). Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. *Geoderma*, 11(2): 73-93.
- Fassbender, H. (1987). *Química de los suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica. 420 p.
- Figueroa, L. T., Tapia I. L., Bastías M. E., Escobar, A.H y Torres, H. A. (1994). Niveles de boro en aguas de riego y suelos que sustentan olivos en el norte de Chile. *IDESIA*. 13:63-67.
- France, J., Thornley, J.H.M. (1984). Role of mathematical models in agriculture and agricultural research. En: *Mathematical Models in Agriculture*. Butterworth & Co (Publishers) Ltd. London. pp. 1-14.
- Fuentes, F. R. (1971). Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánico. Tesis de grado de maestro en ciencias. Instituto Interamericano de ciencias agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. pp 180
- García, R. (1994). Interdisciplinariedad y sistemas complejos. *Ciencias sociales y formación ambiental*. 85-124.
- Grace, J.B. (2006). *Structural Equation Modeling and Natural Systems*. Cambridge University Press, Cambridge. UK. 378 pp.

- Grace, J.B., Bollen, K. A. (2008). Representing general theoretical concepts in structural equation models: the role of composite variables. *Environ. Ecol. Stat.* 15: 191–213.
- Halvin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. y Nelson, W.L. (1999). *Soil fertility and fertilizer. An introduction to nutrient management.* 6<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, New Jersey, USA. 497 p.
- Hashimota, Y. (1997). Applications of artificial neural networks and genetic algorithms to agricultural systems. *Comput. Electro. Agri.* 18, 71–72.
- Hernandez-Jimenez, A., Ascanio-Garcia, M. O., Morales-Diaz, M., Bojórquez-Serrano, J. I., Garcia-Calderon, N. E. y Garcia-Paredes J. D. (2006). *El suelo: fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo.* Universidad Autónoma de Nayarit, Nayarit, México. pp 261.
- Huggett, R. J. (1975). Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, 13(1): 1-22.
- Ibáñez, J., Jiménez, B. R., y García, A. (1990). Sistemología y termodinámica en edafogénesis I. Los suelos y el estado de equilibrio termodinámico. *Rev. Ecol. Biol. Sol.* 27 (4): 371-382.
- James, G., Witten, D., Hastie, T., y Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning (Vol. 6).* Springer. New York. USA. 426 pp.
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation: A system of quantitative pedology.* McGraw-Hill. New York, London. 281 pp.
- Joffe, J. S. (1936). *Pedology.* New Jersey, NJ, USA: Rutgers University Press.
- Johnson (D. L.) & Watson-Stenger (D.), (1987). Evolution model of pedogenesis. *Soil Sci.* 143: 349-366
- Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A. (1975). *Mecánica de suelos tomo 1: fundamentos de la mecanica de suelos (No. TA710. J82 2005).*
- Karnani, M. y A. Annila. (2009). Gaia again. *Biosystems* 95:82-87.
- Kellogg, C. E. (1936). *Development and significance of the great groups of the United States.* Washington, WA, USA: Department of Agriculture.
- Kibblewhite M. G., Ritz, K. y Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363: 685–701.
- Lasaga, A.C. y Lüttge, A. (2003). A model for crystal dissolution. *European Journal of Mineralogy* 15, 603-615.

- Marschner, H. (2011). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Third Edition. Academic press. 649 p.
- Mc Bride, M. B. (1999). Chemisorption and precipitation reactions. In M. E. Sumner: Handbook of Soil Science. CRC Press: Boca Raton, USA. pp. B265-B302.
- Mendoza-Grimón V., Rodríguez-Martín, R., Fernández-Vera J. R., Palacios Díaz M. P y Hernández-Moreno J. M. (2003). Estudio de la disponibilidad de fosforo y boro aportado por las aguas depuradas en la isla de Gran Canaria: Metodología y resultados preliminares. Estudio de la zona no saturada del suelo. ICIA. 6:355-360.
- Mengel, K. y Kirkby, E. A. (2001). Principles of Plant Nutrition (5th Edition). Springer. Dordrecht, The Netherlands. 807 p.
- Navarro-Blaya, S. y Navarro-García, G. (2003). Química Agrícola. 2 edición. Mundiprensa. Barcelona, España. 479 pp.
- Nazmul Karim, M., Yoshida, T., Rivera, S. L., Saucedo, V. M., Eikens, B., and Oh, G. S. (1997). Global and local neural network models in biotechnology: application to different cultivation processes. J. Ferment. Bioengg. 83, 1–11
- Neilsen, D., Parchomchuk, G. H., Neilsen and Hogue E. J. (1998). Using soil solution monitoring to determine the effects of irrigation management and fertigation on nitrogen availability in High-density apple orchards. J.Amer. Soc. Hort. Sci. 123(4): 706-713.
- Nicolodi, M., y Gianello, C. (2015). Understanding Soil as an Open System and Fertility as an Emergent Property of the Soil System. Sustainable Agriculture Research, 4(1), 94.
- Nielsen, S.N. y Muller, F. (2000). Emergent Properties of Ecosystems. In: Handbook of Ecosystem Theories and Management. Joergensen, S.E., Muller, F. (Eds.). Lewis Publishers, Boca Raton, London, pp. 195–216.
- Olarte-Ortíz, O., Almaguer-Vargas, G y Espinoza-Espinoza, J.R. (2001). Efecto de la fertilización foliar en el estado nutricional, la fotosíntesis, la concentración de carbohidratos y el rendimiento en naranjo 'valencia late'. Terra Latinoamericana. 18(4): 339-347
- Olson, C.G., Thompson, M.L. & Wilson, M.A. (2000). Phyllosilicates. In Handbook of 21 Soil Science (ed. Sumner, M.E.), pp. F77-F123. Boca Raton: CRC Press
- Pan, Y., Koopmans, G. F., Bonten, L. T., Song, J., Luo, Y., Temminghoff, E. J., y Comans, R. N. (2014). Influence of pH on the redox chemistry of metal (hydr) oxides and organic matter in paddy soils. Journal of soils and sediments. 14(10): 1713-1726.

- Patnaik, P. R. (1999). Applications of neural networks to recovery of biological products. *Biotechnol. Adv.* 17, 477–488.
- Patten, B. C. (1971). *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. 1st Edition. Bernard C. Patten, editors. Academic Press, New York, USA. 624 pp.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes*. Vol. 24. Madrid: McGraw-Hill, España. 529 pp.
- Phillips, J. D. (2000). Signatures of divergence and self-organization in soils and weathering profiles. *The Journal of geology*, 108(1), 91-102.
- Ponge, J. F. (2005). Emergent properties from organisms to ecosystems: towards a realistic approach. *Biological Reviews*, 80(3), 403-411.
- Porras-Alfaro, A. y Bayman, P. (2011). Hidden fungi, emergent properties: endophytes and microbiomes. *Annual review of phytopathology*. 49: 291-315.
- Rhoades, J. D. and J. D. Oster. (1986). *Methods of soil analysis*. 1. *Agronomy*, 9, 985-1006.
- Seoane, J. y Bustamante, J. (2001). Modelos predictivos de la distribución de especies: una revisión de sus limitaciones. *Ecología*, 15 (9): 21.
- Smeck, N. E., Runge, E. C. A., y Mackintosh, E. E. (1983). Dynamics and genetic modelling of soil systems. *Developments in Soil Science*, 11, 51-81.
- Snakin, V. V., Prisyazhnaya, A. A., y Kovács-Láng, E. (2001). *Soil Liquid Phase Composition*. Elsevier Science B. V. Amsterdam, The Netherlands. 319 pp.
- Sposito, G. (1981). *The thermodynamics of soil solutions*. Oxford Clarendon Press. New York, USA. 223 p.
- Starr, M. R. (1985). Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a Finnish forest soil. *Soil Sci.*, 140, 453-461
- Suárez, D. y Márquez, M. (1992). Estimación de las necesidades de encalado. *Agric. Téc. (Chile)*. 52:388-393.
- Targulian, V. O. y Krasilnikov, P. V. (2007). Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena*. 71(3):373-381.
- Thompson, L. M and Troeh F. R. (2002). *Los suelos y su fertilidad*. cuarta edición. Editorial reverté. Barcelona, España. pp 657.
- Tinker, P.B y P.H. Nye. (2000). *Solute movement in the rhizosphere*. Oxford University Press. New York.

- Van Rees, K.C.J., Comerford, N.B. y McFee, W.W. (1990). Modeling potassium uptake by slash pine seedlings from low-potassium-supplying soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1413-1421.
- Whyte, L.L., Wilson, A.G., Wilson, D. (Editors). (1969). *Hierarchical Structures. Proceedings of a Symposium.* American Elsevier. New York, USA. p 322.
- Yallon, D. H. (1975). Conceptual models in pedogenesis: can soil-forming functions be solved? *Geoderma*, 14, 189-205

## **ARTICULO**

**Dinámica de la composición de la solución del  
suelo en cultivos del occidente de México**

## Dinámica de la composición de la solución del suelo en cultivos del occidente de México\*

### Dynamics of soil solution composition in crops from western Mexico

Willian Alfredo Narváez-Ortiz<sup>1</sup>, América Berenice Morales-Díaz<sup>2</sup>, Adalberto Benavides-Mendoza<sup>1</sup> y Manuel Humberto Reyes-Valdés<sup>3§</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- Departamento de Horticultura y <sup>2</sup>Departamento de Fitomejoramiento Calzada Antonio Narro 1923, C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México. <sup>3</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Instituto Politécnico Nacional-Robótica y Manufactura Avanzada, Unidad Saltillo, Avenida Industria Metalúrgica 1062, C. P. 25900, Parque Industrial, Ramos Arizpe, Coahuila. (williamnarvaezo@hotmail.com; america.morales@cinvestav.edu.mx; abenmen@gmail.com). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: mathgenome@gmail.com.

#### Resumen

El presente estudio es un acercamiento preliminar y descriptivo al fenómeno del comportamiento dinámico de la solución del suelo. El objetivo del trabajo fue el estudio de la composición de la solución del suelo a través del tiempo, para ayudar al entendimiento de la disponibilidad de los diferentes iones, así como su comportamiento individual y colectivo mediante análisis de correlación y de componentes principales (ACP). El trabajo consistió en realizar colectas de información mediante muestreos repetitivos de la solución en diferentes tipos de suelo en zonas de producción intensiva ubicadas en el Occidente de México (Jalisco y Colima) para cinco cultivos (aguacate, arándano, fresa, papaya y pimienta). Las muestras de solución del suelo fueron recolectadas en intervalos de 15 días a través de todo el ciclo fenológico para los diferentes cultivos; a las muestras se les determinó el contenido de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodio ( $\text{Na}^+$ ), pH y conductividad eléctrica (C.E). Los resultados de las correlaciones mostraron patrones similares con un comportamiento decreciente entre los diferentes iones *versus* el tiempo. Los vectores de carga obtenidos mediante el método del ACP mostraron similitud en su comportamiento en todos los cultivos a excepción del cultivo de fresa, no obstante la dinámica del componente

#### Abstract

The present study is a preliminary and descriptive approach to the phenomenon of the dynamic behavior of soil solution. The objective was to study the composition of the soil solution over time, to help the understanding of the availability of different ions, as well as their individual and collective behavior through correlation and principal component analysis (PCA). The work consisted in gathering information by repetitive sampling of the solution in different soil types under intensive production areas located in Western Mexico (Jalisco and Colima) for five crops (avocado, cranberry, strawberry, papaya and pepper). The soil solution samples were collected every 15 days throughout the phenological cycle for the different crops; the samples were analyzed for nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), potassium ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) levels, pH and electrical conductivity (EC). The results of the correlations showed similar patterns with a decreasing behavior among different ions *versus* time. Loading vectors obtained by PCA showed similarity in their behavior in all crops except strawberry; however the dynamics from the principal component for all crops was similar showing concomitant variation over time with an ascending trend. This result indicates the feasibility to model in multivariate ways the dynamic behavior of the soil solution.

principal para todos los cultivos fue similar mostrando variación concomitante a través del tiempo con una clara tendencia ascendente. Este resultado indica la factibilidad de modelar de forma multivariada el comportamiento dinámico de la solución del suelo.

**Palabras clave:** componente principal, dinámica nutricional, solución del suelo.

## Introducción

El suelo es un cuerpo natural y un sistema complejo abierto desde el punto de vista de los flujos de energía y materia. Es el resultado de varios factores de formación, como son el tiempo, el material parental, el clima, la vegetación, los organismos y la topografía, integrados en un sistema con múltiples interacciones. Por tal razón el suelo no debiera conceptualizarse como un sistema estático sino como un sistema complejo y dinámico (Jenny 1994) que, para estudiarlo, lo fragmentamos en sus componentes ubicándolos en los ámbitos físico, químico y biológico. Los componentes desarrollan interacciones y transformaciones locales y generan el sistema edáfico (Hernández-Jiménez *et al.*, 2006) que utilizamos para la producción agrícola y que generalmente estudiamos desde un punto de vista físico (determinando textura, estructura, profundidad del perfil, la capacidad de retención de agua, drenaje, etc.), químico (determinando el pH, la C.E, nivel de disposición de elementos esenciales, capacidad de intercambio catiónico/aniónico, etc) o biológico (colectando y clasificando una pequeña parte de los organismos vivos que contiene el suelo en tipos de especies y poblaciones) caracterizando de esta forma la fertilidad de los suelos (Benton-Jones, 2012).

Los suelos están conformados por tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Sposito, 1981). La relación y la operación de las tres fases dependen de forma compleja de las interacciones y transformaciones físicas, químicas y biológicas. La fase sólida está conformada por diferentes partículas o agregados (Brady y Weil, 1999) de naturaleza inorgánica u orgánica de diferente granulometría. La parte inorgánica está relacionada con el contenido coloidal del suelo que proviene del material parental luego de verse sometido al intemperismo físico, químico y biológico que cambia sus propiedades fisicoquímicas (Gines-Navarro y Navarro, 2003). Las partículas o agregados orgánicos, denominados

**Keywords:** principal component, nutrient dynamics, soil solution.

## Introduction

Soil is a natural body and a complex open system from an energy and matter flow point of view. It is the result of several formation factors, such as the time, parent material, climate, vegetation, organisms and topography, integrated into a system with multiple interactions. For this reason, soil should not be conceptualized as a static system, but as a complex and dynamic system (Jenny 1994) that, in order to study it, we fragmented into its components, placing them in the physical, chemical and biological fields. The components develop interactions and local transformations and generate the edaphic system (Hernández-Jiménez *et al.*, 2006) that we use for agricultural production and generally studied from a physical point of view (determining texture, structure, depth profile, water capacity retention, drainage, etc.), chemical (determining pH, EC, disposition level of essential elements, cation / anion exchange capacity, etc.) or biological (collecting and sorting a small part of living organisms that soil contains in different species and populations) characterizing in this was soil fertility (Benton-Jones, 2012).

Soils are made up of three phases: solid, liquid and gaseous (Sposito, 1981). The relationship and operation of the three phases depend on complex physical, chemical and biological interactions and transformations. The solid phase consists of different particles or aggregates (Brady and Weil, 1999) of inorganic or organic nature with different granulometry. The inorganic part is related to the colloidal soil content coming from the parent material after being subjected to physical, chemical and biological weathering changing their physicochemical properties (Gines Navarro and Navarro, 2003). Organic particles or aggregates, collectively called organic matter, accumulate thanks to constant supply of material from organisms, either as waste or as a result of death.

This organic material is subjected to a series of complex transformations by soil microorganisms, resulting in the accumulation of colloids or organic molecules that contribute in a significant manner to the composition and soil fertility (Gines-Navarro and Navarro, 2003). Together the inorganic and organic components of the solid phase



en conjunto materia orgánica, se acumulan gracias al aporte constante de material proveniente de los organismos, ya sea en forma de desechos o como resultado de la muerte.

Este material orgánico es sometido a una serie de transformaciones complejas por parte de los microorganismos del suelo, resultando en la acumulación de coloides o moléculas orgánicas que aportan de manera relevante a la composición y fertilidad del suelo (Gines-Navarro y Navarro, 2003). En conjunto los componentes inorgánico y orgánico de la fase sólida dan lugar a la composición y propiedades del suelo (Buscot, 2005). La fase sólida del suelo posee una mayor estabilidad, menor capacidad de variación y puede servir, en términos generales, para la caracterización del suelo con propósitos taxonómicos. En comparación, la fase líquida y aún más la gaseosa, tienen fluctuaciones grandes y bruscas lo que las hace inadecuadas para la taxonomía de suelos (Gines-Navarro y Navarro, 2003).

Sin embargo desde el punto de vista nutricional y del manejo de los cultivos la fase líquida es de suma importancia, debido a que está en contacto directo con las raíces de las plantas y es de donde las plantas toman sus nutrientes (Khasawneh, 1971; Menguel y Kirby, 2001). Esta fase está constituida por el agua que se encuentra en los poros del suelo y se le conoce como solución del suelo, agua disponible o agua del suelo (Gines-Navarro y Navarro, 2003). Esta fase del sistema edáfico es *per se* un sistema dinámico y complejo que refleja el impacto global de todos los componentes bióticos y abióticos, incluyendo el proceso de nutrición de las plantas (Snakin, 2001). La teoría de sistemas complejos indica que ciertas propiedades o comportamiento generalmente no son predecibles a partir de las propiedades de los componentes individuales del sistema (García, 2006). Por tal razón, siendo el agua del suelo un sistema dinámico complejo se espera que los detalles específicos de su composición no serán predecibles a partir de las propiedades físicas y químicas de los componentes individuales de la fase sólida (Ryan, 2007). Por esa razón es que se propone estudiar la solución del suelo en su composición y variabilidad temporal, considerándola como la fuente primaria de agua y nutrimentos para las plantas y cuya composición se asocia a grandes rasgos con los componentes inorgánico, orgánico y biótico del suelo, pero sin depender en los detalles de la composición de los componentes individuales de la fase sólida; sino más bien de las interacciones entre sí de los componentes físicos, químicos y biológicos y de estos con el clima prevaleciente en un cierto ámbito temporal.

lead to soil composition and properties (Buscot, 2005). The solid phase of the soil has higher stability, lower capability to change and can serve, in general, for soil characterization with taxonomic purposes. In comparison, the liquid and even more gaseous phase, have large and strong fluctuations which make them unsuitable for soil taxonomy (Gines Navarro and Navarro, 2003).

However, from the nutritional and crop management point of view the liquid phase is critical, because it is in direct contact with plant roots and is where plants take their nutrients (Khasawneh, 1971; Menguel and Kirby, 2001). This phase is constituted by water found in soil pores and is known as soil solution, available water or soil water (Gines-Navarro and Navarro, 2003). This phase of the soil system is *per se* a complex and dynamic system that reflects the overall impact of all biotic and abiotic components; including plant nutrition process (Snakin, 2001). Complex systems theory indicates that certain properties or behaviors generally are not predictable from the properties of individual system components (García, 2006). For this reason, ground water being a complex dynamic system is expected that specific details of its composition will not be predictable from the physical and chemical properties of the individual components of the solid phase (Ryan, 2007). For this reason it is proposed to study soil solution in its composition and temporal variability, considering it as the primary source of water and nutrients for plants and whose composition is associated to large features with inorganic, organic and biotic components of the soil, but not dependent on details of the composition of the individual components of the solid phase; but rather from the interactions within each physical, chemical and biological components and between these with the prevailing climate in a certain time range.

To study the soil solution two properties are considered: the volume of liquid water and the composition of soil solution. The volume directly influences on composition and concentration of the soil solution, as if this change will affect ions concentration (Menguel and Kirby, 2001). Determining water volume is made through physical methods such as wet gravimetric method or by bulk density ( $D_a$ ) and true density ( $D_s$ ) of the soil solid phase (Narro-Farias, 2004). The composition of soil solution is still a more complex situation, due to their dynamic behavior and its multicomponent nature (Khasawneh, 1971), which makes it difficult or even impossible to predict its behavior from the original components which are water and soil solid phase.

Para el estudio de la solución del suelo se consideran dos propiedades: el volumen del agua líquida y la composición de la solución del suelo. El volumen influye directamente sobre la composición y concentración de la solución del suelo ya que si este cambia afectará la concentración de los iones (Menguel y Kirby, 2001). La determinación del volumen del agua se lleva a cabo por medio de métodos físicos como el método gravimétrico de humedad, o mediante la relación densidad aparente ( $D_a$ ) y la densidad real ( $D_s$ ) de la fase sólida del suelo (Narro-Farías, 2004). La composición de la solución del suelo es todavía una situación más compleja, debido a su comportamiento dinámico y a su naturaleza multicomponente (Khasawneh, 1971), lo que hace difícil o hasta imposible predecir su comportamiento a partir de los componentes originales que son el agua y la fase sólida del suelo.

Este tema de la composición de la solución del suelo ha sido estudiado con cierto detalle en el caso de suelos contaminados y tecnosoles, en donde se han reportado predicciones en la solubilidad de Cu, Zn, Cd y Pb (McBride *et al.*, 1997), así como en los niveles de Cd y Zn en la solución del suelo mediante procesos de fitoextracción con *Thlaspi caerulescens* (Knight *et al.*, 1997) y rábano (Lorenz *et al.*, 1997). Pero en el caso de suelos agrícolas no se dispone hasta donde sabemos de información publicada sobre su comportamiento dinámico.

El presente estudio es un acercamiento preliminar y descriptivo al fenómeno del comportamiento dinámico de la solución del suelo. El objetivo fue realizar un análisis de la composición de la solución del suelo a través del tiempo durante las diferentes etapas fenológicas de cinco cultivos en condiciones de producción intensiva en la zona Occidente de México, el cual nos permita describir la relación presente entre los diferentes iones, así como su comportamiento individual y colectivo mediante un análisis de componentes principales (ACP).

## Metodología

El estudio descriptivo de la solución del suelo se realizó en la zona Occidente de México en los estados de Jalisco y Colima, iniciando en la temporada verano-otoño del 2013 y terminando durante el invierno del 2014. Se realizaron monitoreos de la solución del suelo en cultivos ya establecidos en diferentes empresas agrícolas. Los cultivos evaluados para este estudio fueron: aguacate (*Persea americana* Mill.) y

This topic of the composition of soil solution has been studied in some detail for polluted soils and technosols, where predictions in solubility of Cu, Zn, Cd and Pb (McBride *et al.*, 1997) have been reported, as well as levels of Cd and Zn in the soil solution through phytoextraction with *Thlaspi caerulescens* (Knight *et al.*, 1997) and radish (Lorenz *et al.*, 1997). But for agricultural soils there is no published information available on dynamic behavior.

The present study is a preliminary and descriptive approach to the phenomenon of dynamic behavior of soil solution. The aim was to perform an analysis of the composition of soil solution over time during different growth stages in five crops under intensive production in western Mexico, which allows us to describe the present relationship between the different ions as well as their individual and collective behavior through a principal component analysis (PCA).

## Methodology

The descriptive study of soil solution was performed in the West area of Mexico in the states of Jalisco and Colima, starting in the summer-autumn 2013 and ending in the winter of 2014. Monitoring soil solution was conducted in crops established in different agricultural enterprises. Crops evaluated for this study: avocado (*Persea americana* Mill.) and cranberry (*Vaccinium* sp.) located in Ciudad Guzman Jalisco at 19° 40' 43.2" N latitude, 103° 32' 06.9" W longitude and 19° 40' 53.13" N latitude, 103° 32' 41.77" W longitude respectively, strawberry (*Fragaria* L.) located in Tapalpa Jalisco (19° 55' 03.3" N latitude, 103° 42' 11" W longitude), papaya (*Carica papaya* L.) in the municipality of Tecoman Colima (18° 48' 17.58" N latitude, 103° 45' 9.13" W longitude) and pepper (*Capsicum annuum*) in Sayula Jalisco (19° 54' 05.4" N latitude, 103° 35' 09.7" W longitude). At the time of study avocado was 5 years old while cranberry was one year old. For the rest of the crops monitoring began from planting stage.

The study included an analysis of the composition of soil solution over time. To do so, soil lysimeters Irrometer were installed. Six sampling stations were established for each crop and in each sampling station a replication was performed. For this reason, two lysimeters were placed on each station at a depth of 20 cm, at a distance of 20 cm from

arándano (*Vaccinium* sp) ubicados en Ciudad Guzmán Jalisco en las coordenadas 19° 40' 43.2" latitud norte, 103° 32' 06.9" longitud oeste y 19° 40' 53.13" latitud norte, 103° 32' 41.77" longitud oeste respectivamente, fresa (*Fragaria* L.) localizado en Tapalpa Jalisco (19° 55' 03.3" latitud norte, 103° 42' 11" longitud oeste), papaya (*Carica papaya* L.) en el municipio de Tecoman Colima (18° 48' 17.58" latitud norte, 103° 45' 9.13" longitud oeste) y el cultivo de pimiento (*Capsicum annum*) en la localidad de Sayula Jalisco (19° 54' 05.4" latitud norte, 103° 35' 09.7" longitud oeste). En el momento del estudio el aguacate tenía cinco años de establecimiento, mientras que el arándano tenía un año. Para el resto de los cultivos el monitoreo se inició desde la etapa de plantación.

El estudio comprendió el análisis de la composición de la solución del suelo a través del tiempo. Para ello se instalaron extractores pasivos de solución del suelo tradicionales denominados lisímetros de la marca Irrrometer. Se establecieron seis estaciones de muestreo para cada cultivo y en cada estación de muestreo se realizó una repetición. Por esta razón, se colocaron dos lisímetros por estación, a una profundidad de 20 cm y a una distancia de 20 cm de la planta, la distancia mínima entre una estación y otra fue de 500 m. La toma de las muestras se efectuó cada 15 días a través de todo el ciclo fenológico de los cultivos (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Número de muestreos por etapa fenológicas para los diferentes cultivos.**  
**Table 1. Number of samples per phenological stage for different crops.**

Cultivo	Numero de muestreos por etapa fenológica				
	Crecimiento vegetativo	Floración y fructificación	Desarrollo de fruto	Cosecha	Total de muestras
Aguacate	5	3	3	11	22
Arándano	5	3	3	11	22
Fresa	3	2	1	9	15
Pimiento	3	2	2	15	22
Papaya	4	2	2	14	22

Una vez instalados los lisímetros la obtención de la muestras se realizó efectuando un vacío de -70 kPa. Esta actividad se llevó a cabo en condiciones de capacidad de campo una vez terminada la aplicación del fertirriego. Para determinar la capacidad de campo se contó con un tensiómetro de la marca irrometer modelo R. La recolección de las muestras se efectuó 24 horas después de haber realizado el vacío.

Las muestras de solución de suelo obtenidas fueron analizadas *in situ* mediante equipos portátiles. El pH se determinó con un potenciómetro de la marca Hanna modelo

the plant, the minimum distance between one station and another was 500 m. Samples collection was made every 15 days throughout the crop cycle (Table 1).

Once installed the lysimeters obtaining samples was made by performing a vacuum of -70 kPa. This activity was carried out under field capacity conditions once fertigation was done. To determine field capacity counted with a tensiometer Irrrometer R. The samples collection was performed 24 hours after vacuum.

Soil solution samples were analyzed *in situ* by portable equipment. pH was determined with a potentiometer Hanna HI98130, electrical conductivity (EC) was assessed using an equipment Horiba Spectrum Cardy Twin; ions were analyzed with ion-selective Horiba; for nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) the B743 model was used; calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) with the B751 model; potassium ( $\text{K}^+$ ) with B731 model and sodium ( $\text{Na}^+$ ) with model B722.

### Statistical analysis

An exploratory analysis, scatter plots and Pearson correlation matrix was performed. An unsupervised statistical analysis of principal components (ACP) with standardized values was made. PCA has many advantages (Broschat, 1979), is a

technique that reduces the dimensionality of a set of multivariate data, removes existing interrelationships between variables, organizes data in orthogonal vectors where each of the variables within the vector behaves in a similar manner based on their correlations, each of these vectors is called a principal component. The first components express most of variance of orthogonal data and are a useful tool to simplify the analysis and interpretation of large amount of variables considered in an exhaustive assessment. Calculations were performed with the language and environment for statistical computing R version 3.1.1 (James *et al.*, 2014).

HI98130, la conductividad eléctrica (C.E) se evaluó con un equipo de la marca Horiba modelo Spectrum Cardy Twin; los iones se analizaron con equipos ión-selectivos de la marca Horiba; para los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) se utilizó el modelo B743; calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) con el modelo B751; potasio ( $\text{K}^+$ ) con el modelo B731 y sodio ( $\text{Na}^+$ ) con el modelo B722.

### Análisis estadístico

Se realizó un análisis exploratorio, con diagramas de dispersión y matrices de correlación de Pearson. Se efectuó un análisis estadístico no supervisado de componentes principales (ACP) con valores estandarizados. El ACP presenta múltiples ventajas (Broschat, 1979), es una técnica que reduce la dimensionalidad de un conjunto de datos multivariados, remueve las interrelaciones existentes entre variables, organiza los datos en forma de vectores ortogonales en donde cada una de las variables dentro del vector se comporta en forma similar con base en sus correlaciones, a cada uno de estos vectores se le llama componente principal. Los primeros componentes expresan la mayor parte de la varianza de los datos ortogonales, y son una herramienta útil para simplificar el análisis e interpretación de la gran cantidad de variables consideradas en una evaluación exhaustiva. Los cálculos se realizaron con el lenguaje y ambiente de cómputo estadístico R versión 3.1.1 (James *et al.*, 2014).

## Resultados y discusión

### Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para los diferentes cultivos

Al observar la dinámica nutrimental de las diferentes variables de la solución del suelo a través del tiempo (Figuras 1 a 5) se logra apreciar en los diferentes sitios patrones similares tanto en el comportamiento con respecto al tiempo como en los valores y concentraciones de las distintas variables. Para todos los casos el pH mostró valores fluctuantes, pero siempre manteniendo una tendencia positiva conforme los muestreos fueron avanzando, los valores abarcaron desde 5 hasta 7.8. La C.E mostró tendencia negativa versus el tiempo para el caso del aguacate, arándano y pimiento con niveles iniciales de 0.8, 1.74 y 1.41 respectivamente y decreciendo hacia las etapas finales a valores de 0.4  $\text{dSm}^{-1}$  para el caso del aguacate y arándano y de 1  $\text{dSm}^{-1}$  en pimiento. En cambio para los cultivos de fresa y papaya la tendencia de la C.E fue positiva iniciando en valores de 0.6 y 0.87 a 1.4 y 1.8 respectivamente. La concentración de

## Results and discussion

### Dynamics of chemical variables over time for different crops

By observing nutritional dynamics of the different variables of soil solution over time (Figures 1-5) it can be appreciated in the different sites similar patterns in behavior regarding time and values and concentrations of different variables. In all cases pH values fluctuated, but always keeping a positive trend as samplings advanced, the values ranged from 5 to 7.8. EC showed a negative trend versus time for avocado, cranberry and pepper with initial levels of 0.8, 1.74 and 1.41 respectively, decreasing towards final stages to values of 0.4  $\text{dSm}^{-1}$  for avocado and cranberry and 1  $\text{dSm}^{-1}$  for pepper. For strawberry and papaya the trend in EC was positive initiating with of 0.6 and 0.87 to 1.4 and 1.8 respectively. The concentration of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  showed a decreasing trend for all crops, showing fluctuations in certain samplings; for avocado, cranberry and strawberry  $\text{Na}^+$  values remained on an average range of 154 to 15  $\text{mg L}^{-1}$  and  $\text{K}^+$  levels for the three cases showed increases in their early sampling dates of up to 296  $\text{mg L}^{-1}$  as for cranberry,  $\text{K}^+$  levels decreased from 231, 296 and 76 to 17, 84 and 28  $\text{mg L}^{-1}$  respectively. For papaya and pepper  $\text{Na}^+$  range was higher, taking values of 487 and 475 to 43 and 136  $\text{mg L}^{-1}$ , respectively, while  $\text{K}^+$  showed a milder decrease, starting in concentrations of 190 to 29  $\text{mg L}^{-1}$  for papaya and from 62 to 2  $\text{mg L}^{-1}$  for pepper.  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  showed the same dynamic pattern, decreasing in all crops except where papaya levels reached 580 and 620  $\text{mg L}^{-1}$  respectively. For the rest of the crops  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  concentration in soil solution decreased showing ranges from 381 to 34  $\text{mg L}^{-1}$  and 418 to 112  $\text{mg L}^{-1}$  (avocado), 250 to 18  $\text{mg L}^{-1}$  and 430 to 65  $\text{mg L}^{-1}$  (cranberry), 180 to 59  $\text{mg L}^{-1}$  and 547 to 271  $\text{mg L}^{-1}$  (strawberry) and from 430 to 27  $\text{mg L}^{-1}$  and 360 to 45  $\text{mg L}^{-1}$  (pepper).

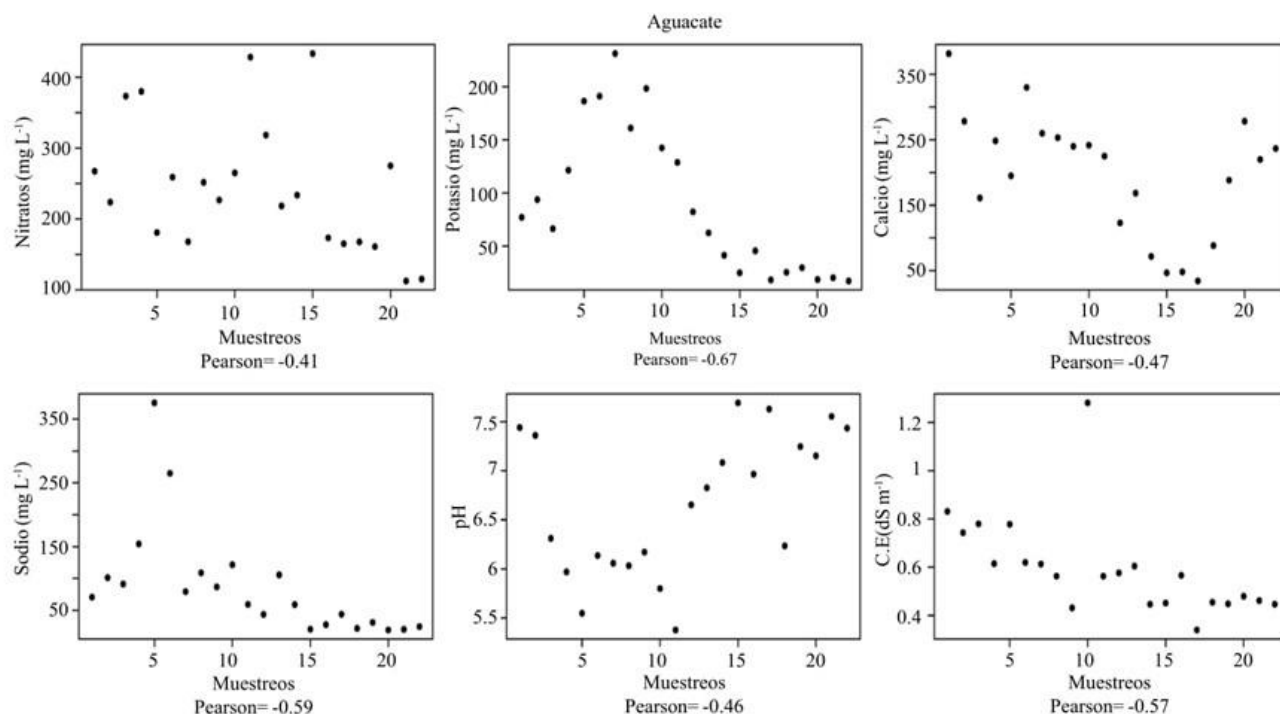
The results found for  $\text{NO}_3^-$  in soil solution for most crops can be given by leaching processes and radical absorption (Navarro-Blaya and Navarro-García, 2003). Both processes may be associated not only with decreased  $\text{NO}_3^-$  but also with other ions ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) and in general EC of soil solution.

For papaya (Figure 5) an opposite behavior in EC apparently associated to an increase in  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$  present in soil solution was observed (Charley and McGarity, 1964; Menguel and Kirby, 2001).

Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> exhibió tendencia decreciente para todos los cultivos, mostrando fluctuaciones en determinados muestreos; para los cultivos de aguacate, arándano y fresa los valores de Na<sup>+</sup> se mantuvieron en un rango promedio de 154 a 15 mg L<sup>-1</sup> y los niveles del K<sup>+</sup> para los tres casos presentaron incrementos en sus primeras fechas de muestreo de hasta 296 mg L<sup>-1</sup> como es para el caso del arándano, los niveles del K<sup>+</sup> disminuyeron desde 231, 296 y 76 a 17, 84 y 28 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Para la papaya y el pimiento el rango de Na<sup>+</sup> fue mayor, tomando valores de 487 y 475 a 43 y 136 mg L<sup>-1</sup> respectivamente, mientras el K<sup>+</sup> mostró una disminución más suave, iniciando en concentraciones de 190 hasta 29 mg L<sup>-1</sup> para el primer caso y de 62 a 2 mg L<sup>-1</sup> para el pimiento. El Ca<sup>2+</sup> y los NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mostraron el mismo patrón dinámico, siendo decrecientes en todos los cultivos a excepción de la papaya donde sus niveles alcanzaron hasta 580 y 620 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Para el resto de los cultivos la concentración de Ca<sup>2+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la solución del suelo disminuyó mostrando rangos de: 381 a 34 mg L<sup>-1</sup> y 418 a 112 mg L<sup>-1</sup> (aguacate), 250 a 18 mg L<sup>-1</sup> y 430 a 65 mg L<sup>-1</sup> (arándano), 180 a 59 mg L<sup>-1</sup> y 547 a 271 mg L<sup>-1</sup> (fresa) y de 430 a 27 mg L<sup>-1</sup> y 360 a 45 mg L<sup>-1</sup> (pimiento).

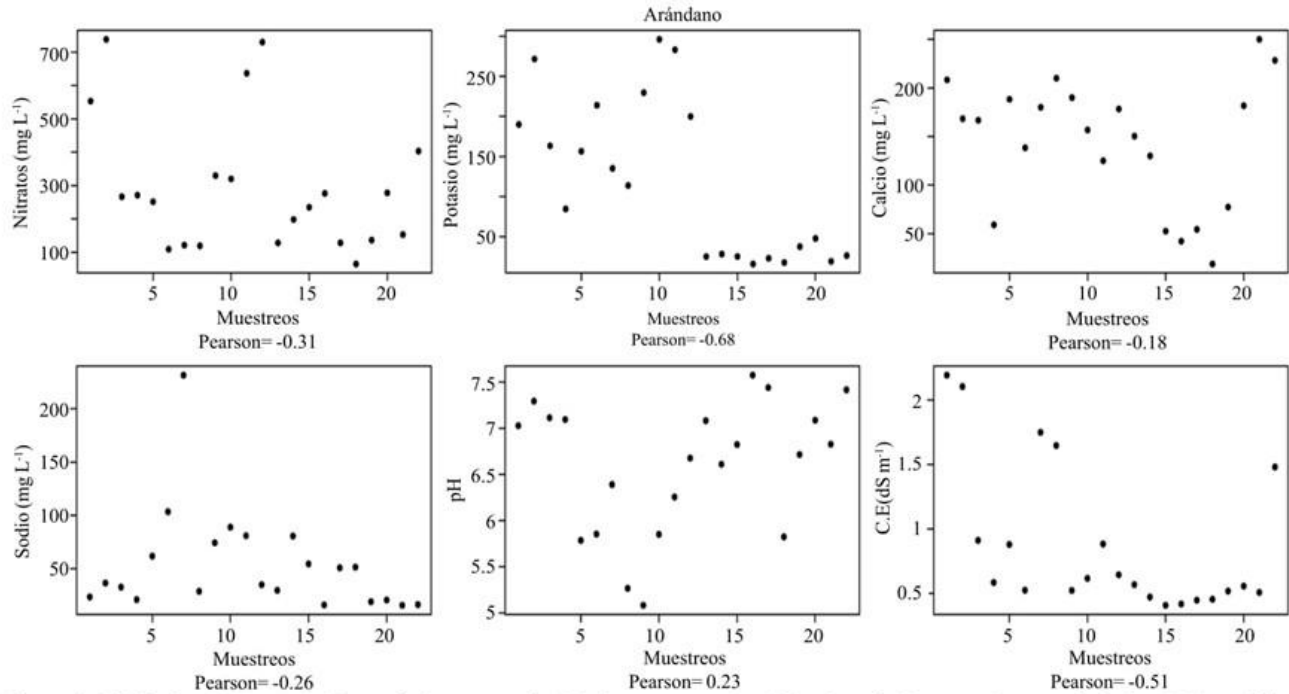
For strawberry (Figure 3) the highest concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and K<sup>+</sup> in soil solution is present in early stages, which was described by the absorption curves studied by Molina *et al.* (1993), who pointed out that in its early stages the absorption is very low, increasing simultaneous to fructification. The increasing dynamics from pH of soil solution, observed in all cultures studied, could be due to the alkalinizing effect of nitrates from fertilizers applied (Snakin, 2001). Decreases in Ca<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup> ions in soil solution is probably due to increased absorption as the crop passes from the vegetative stage to flowering and fruit set, this due to a preference in the absorption of these ions by avocado plants (Figure 1) (Maldonado-Torres *et al.*, 2007), cranberry (Figure 2) (Ferreira *et al.*, 2001) and papaya (Figure 4) (Fallas, 2014).

This decreasing effect on ions present in the soil solution could be related to an increase in the absorption rate of nutrients as the crop grows as observed in strawberry case (Figure 3) (Avitia-García *et al.*, 2014) and pepper (Figure 5) (Rincón *et al.*, 1995).



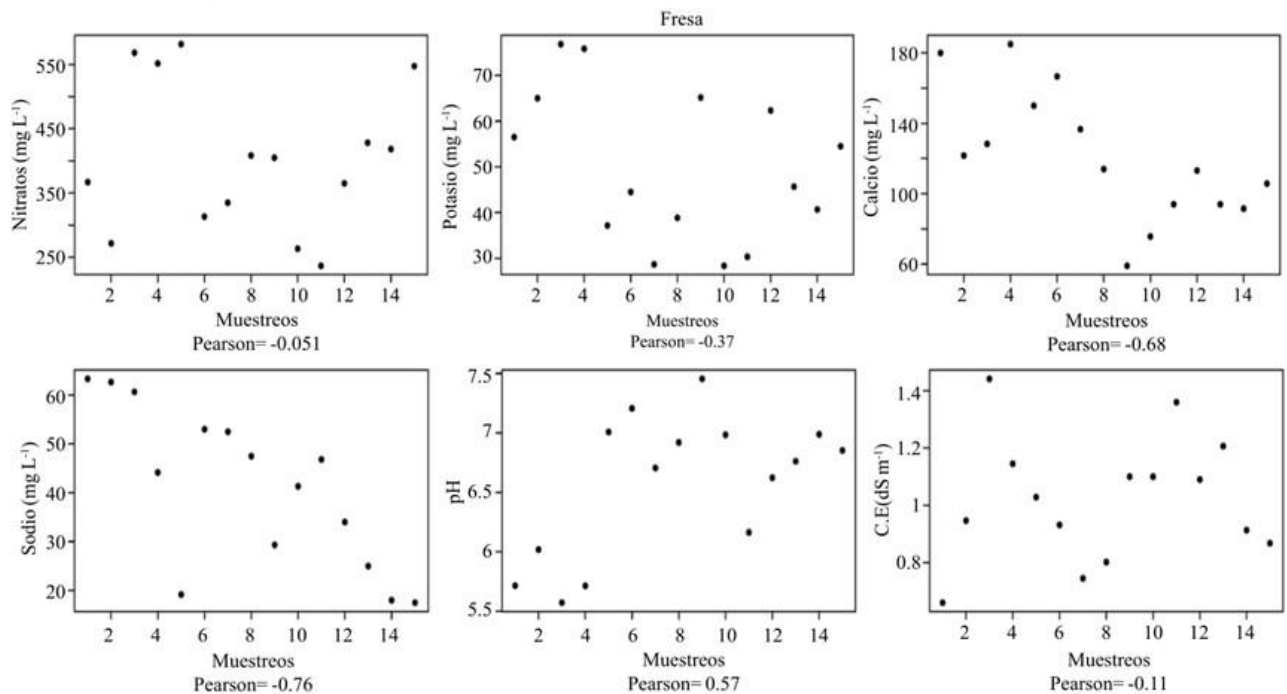
**Figura 1.** Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de aguacate, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.

**Figure 1.** Dynamics of chemical variables over time for growing avocado, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.



**Figura 2. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de arándano, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

**Figure 2. Dynamics of chemical variables over time for growing blueberry, at the bottom of the graphic Pearson correlation coefficient indicated.**



**Figura 3. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de fresa, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.**

**Figure 3. Dynamic chemical variables over time for the strawberry crop, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.**

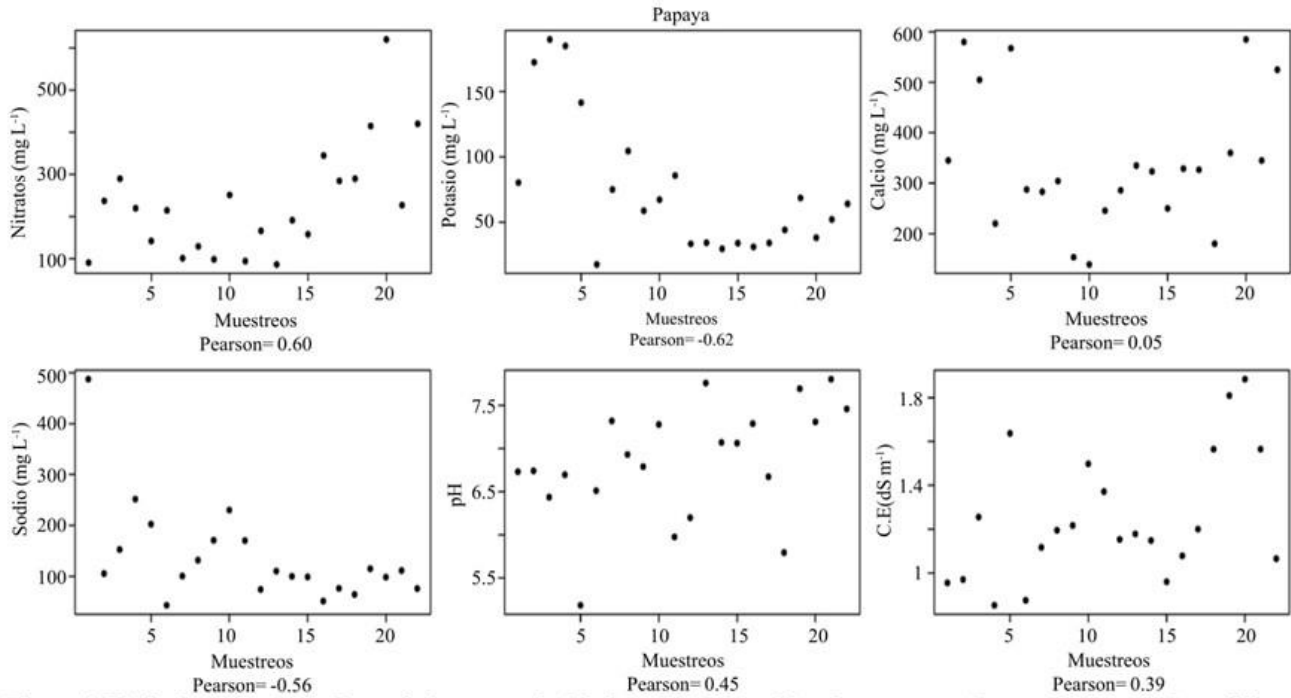


Figura 4. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de papaya, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.

Figure 4. Dynamic chemical variables over time for growing papaya, at the bottom of the graphs the Pearson correlation coefficient indicated.

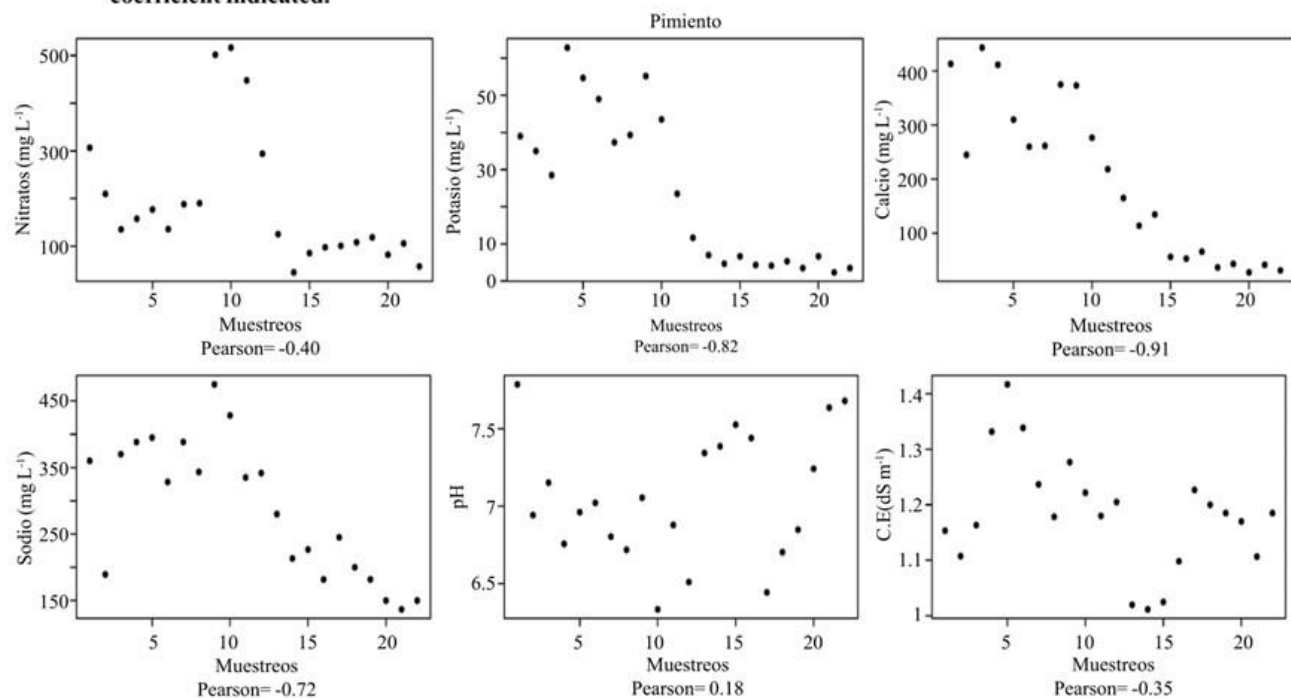


Figura 5. Dinámica de las variables químicas a través del tiempo para el cultivo de pimiento, en la parte inferior de las gráficas se indica el coeficiente de correlación de Pearson.

Figure 5. Dynamics of chemical variables over time for the pepper crop, at the bottom of the graphic Pearson correlation coefficient indicated.

Los resultados encontrados para el  $\text{NO}_3^-$  en la solución del suelo para la mayoría de los cultivos pueden estar dados por los procesos de lixiviación y absorción radical (Navarro-Blaya y Navarro-García, 2003). Ambos procesos pudieron asociarse no solamente con la disminución del  $\text{NO}_3^-$  sino también con la otros iones ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ) y en general con la C.E de la solución del suelo.

Para el caso de la papaya (Figura 5) se observó un comportamiento contrario en la C.E asociado aparentemente al incremento de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{NO}_3^-$  presente en la solución del suelo (Charley y McGarity, 1964; Menguel y Kirby, 2001).

En el caso de la fresa (Figura 3) la mayor concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{K}^+$  en la solución del suelo se presentó en las primeras etapas lo cual fue descrito por las curvas de absorción estudiadas por Molina *et al.* (1993), quien indica que en sus primeras etapas la absorción es muy baja, incrementándose posteriormente en forma coincidente con la fructificación. La dinámica ascendente del pH de la solución del suelo, observada en todos los cultivos estudiados, pudiera deberse al efecto alcalinizante de los nitratos aplicados con los fertilizantes (Snakin, 2001). Las disminuciones de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  en la solución del suelo, es probablemente debida al aumento de absorción conforme el cultivo pasa de la etapa vegetativa a la de floración y llenado de frutos, esto debido a una preferencia en la absorción de estos iones por las plantas de aguacate (Figura 1) (Maldonado-Torres *et al.*, 2007), arándano (Figura 2) (Ferreyra *et al.* 2001) y papaya (Figura 4) (Fallas 2014).

Este efecto decreciente en los iones presentes en la solución del suelo pudiera relacionarse con un incremento en la tasa de absorción de nutrientes a conforme el cultivo se desarrolla como se observa en el caso de la fresa (Figura 3) (Avitia-García *et al.*, 2014) y del pimiento (Figura 5) (Rincón *et al.*, 1995).

Para el arándano otro factor posiblemente involucrado en la reducción de los iones en la solución del suelo (Figura 2), sería por una parte la fijación en las partículas del suelo o bien, en el caso de suelos arenosos, por la lixiviación (Hancock y Draper, 1989). Para el caso de la disminución de  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo (Figura 2) se ha reportado que el arándano tiende a absorberlo en niveles altos en los tejidos foliares, esto debido a que carece de un mecanismo de regulación de la absorción de este elemento (Spiers, 1983).

For cranberry another factor possibly involved in the reduction of ions in the soil solution (Figure 2), would on one hand the fixation in soil particles or in the case of sandy soils through leaching (Hancock and Draper, 1989). For decreasing  $\text{Na}^+$  in the soil solution (Figure 2) it has been reported that cranberry tends to absorb it in high levels in leaf tissue, this because it lacks a mechanism of regulating the uptake of this element (Spiers, 1983).

### First principal component analysis

Data obtained in the study from the dynamics of the composition of soil solution for five different crops, underwent an unsupervised multivariate statistical analysis called principal component. Consisted in the creation of new variables called principal components from the original variables ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , pH and EC). With this method accomplished to create a linear function with which was possible to explain the multivariate behavior of the system comprised by the soil solution. For this purpose the values of the principal components were obtained and defined using only the first principal component which groups the highest variance. For avocado groups 50%, cranberry 40%, strawberry 40%, papaya 33% and pepper 62%.

The load vectors obtained for the first principal component (Table 2) were identified the highest absolute value for each crop studied, determining with this which variable contributed the most to the variation of the first component. For avocado and cranberry was the most important variable was  $\text{K}^+$ , for strawberry pH, for papaya  $\text{NO}_3^-$  and pepper  $\text{Na}^+$ . These characters of the soil solution could rule as conditioning variables (independent variables) (Jenny, 1994), in the dynamic behavior of the system and presumably are different in each culture for being different soils and geographical sites.

Despite soil and crops diversity, it was found in the behavioral set of load vectors a pattern in all crops: the values of load coefficients were positive for pH and negative for most of the remaining cases (Table 2). This result indicates that in all cases pH tends to rise during crop growth, indicating a deficit in the protonation of soil solution, possibly resulting from the absence of a suitable concentration of organic matter, which is known to be the repository for exchanging  $e^-/\text{H}^+$  (Menguel and Kirby, 2001) and the aforementioned effect of alkalization by applying  $\text{NO}_3^-$  in fertilizers (Snakin, 2001). The rest of the coefficients, of negative sign, indicate the trend towards decline in the availability of mineral nutrients in soil solution. A possible explanation for this would be insufficient capacity of



### Análisis del primer componente principal

A los datos obtenidos en el estudio de la dinámica de la composición de la solución del suelo para los cinco diferentes cultivos, se les realizó un análisis estadístico multivariado no supervisado llamado componentes principales. Consistió en la creación de nuevas variables, denominadas componentes principales, a partir de las variables originales ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , pH y C.E). Con este método lo que se logró fue crear una función lineal con la cual explicar el comportamiento multivariado del sistema constituido por la solución del suelo. Para ello se obtuvieron los valores de los componentes principales y se determinó utilizar solo el primer componente principal el cual agrupa la mayor varianza. Para el caso del aguacate agrupa el 50%, arándano el 40%, fresa el 40%, papaya el 33% y pimienta 62%.

A los vectores de carga obtenidos para el primer componente principal (Cuadro 2) se les identificó el mayor valor absoluto para cada cultivo estudiado, determinando con esto cual variable fue la que más contribuyó a la variación del primer componente. Para el caso del aguacate y arándano la variable más importante fue  $\text{K}^+$ , para el caso de la fresa fue el pH, para la papaya fue el  $\text{NO}_3^-$  y para el pimienta fue el  $\text{Na}^+$ . Estos caracteres de la solución del suelo pudieran regir como variables de acondicionamiento (variables independientes) (Jenny, 1994), en el comportamiento dinámico del sistema y presumiblemente son diferentes en cada cultivo por tratarse de distintos suelos y sitios geográficos.

**Cuadro 2. Vectores de carga estandarizados del primer componente principal de las diferentes variables evaluadas para los diferentes cultivos.**

**Table 2. Vectors standardized load the first principal component of the different variables evaluated for different crops.**

Cultivo	$\text{NO}_3^-$	K	Ca	Na	pH	C.E
Aguacate	-0.1522949	-0.5150672	-0.3461659	-0.4589865	0.4799535	-0.3881459
Arándano	-0.4376725	-0.5523870	-0.4454199	-0.1942398	0.1969363	-0.4779116
Fresa	-0.1759529	-0.4524127	-0.4716661	-0.4407098	0.5840698	-0.0808183
Papaya	0.6027989	-0.2921512	0.3030348	-0.4520469	0.3473081	0.3667176
Pimienta	-0.3693642	-0.4743096	-0.4418701	-0.4821241	0.2706356	-0.3710311

A pesar de la diversidad de suelos y cultivos, en el comportamiento conjunto de los vectores de carga se encontró un patrón en todos los cultivos: los valores de los coeficientes de carga fueron positivos para el pH y negativos para la gran mayoría de los casos restantes (Cuadro 2). Este resultado indica que en todos los casos el pH tiene a elevarse

the solid phase of the soil to provide the necessary nutrients in the soil solution (Menguel and Kirby, 2001) to cover all crops needs, this despite the contribution of fertilizers via fertigation.

By observing the dynamic behavior of the first principal component it can be seen the variability of the observations versus time or samples number, finding that the dynamics of the first principal component was similar to the six crops, with a clear upward trend (Figure 6). This rising trend is largely governed by the variables with greater weight in the first principal component.

These variables, through load coefficients, are negative for avocado, cranberry and pepper, while for strawberry and papaya are positive. A possible answer to this similarity would be given by pH of the soil solution over time, which as mentioned previously, for all cases showed positive correlation (Figure 1, 2, 3 and 5) and is associated in a very similar way to the principal component (Figure 6) over time. This happens for all crops except papaya (Figure 4), where  $\text{NO}_3^-$  plays a key role in the rising behavior of the principal component. In all cases the first component shows a positive trend over time, which indicates the possible presence of a temporal pattern in joint dynamics of the attributes of the soil solution.

These results seem to suggest on one hand the effectiveness of the first principal component in shaping joint dynamics of soil solutions in different crops; in particular, it is an integration of the results presented above in univariate analysis of different ions for different crops over time.

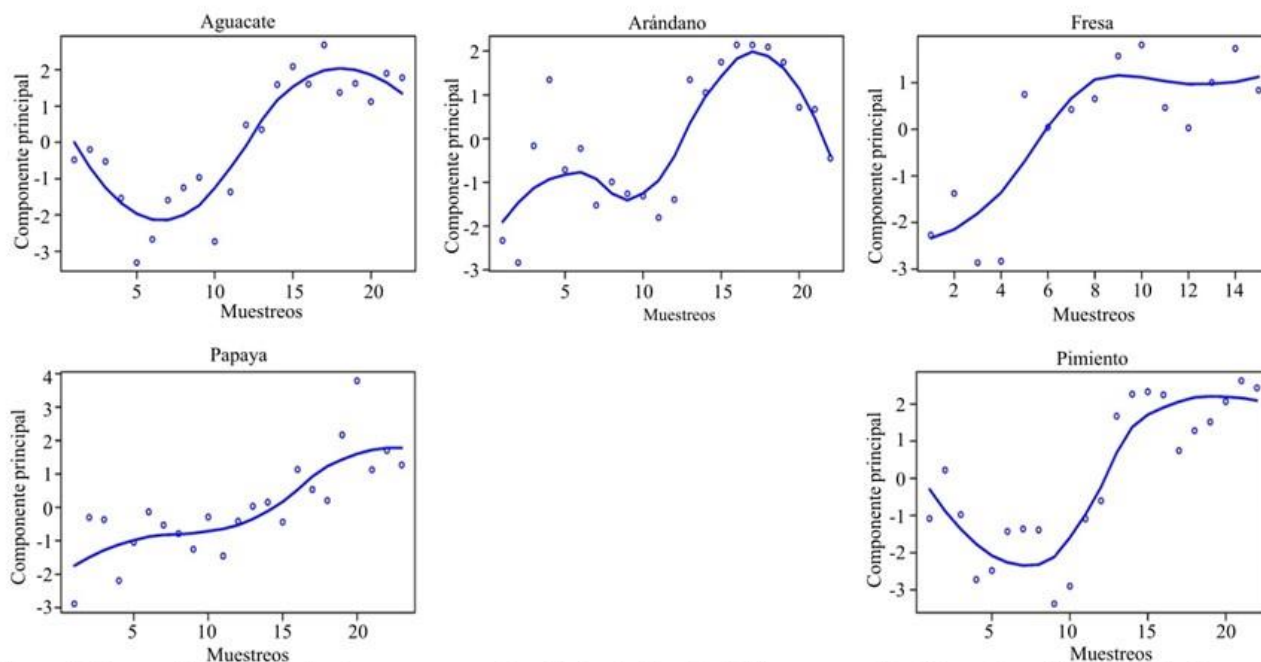
durante el crecimiento del cultivo, indicando un déficit en la protonación de la solución del suelo, posiblemente derivado de la ausencia de una adecuada concentración de materia orgánica, la cual se sabe es el repositorio para el intercambio de  $e^-/H^+$  (Menguel y Kirby, 2001) así como del ya mencionado efecto de alcalinización por la aplicación de  $NO_3^-$  en los fertilizantes (Snakin, 2001). El resto de los coeficientes, de signo negativo, indican la tendencia a la caída en la disponibilidad de nutrientes minerales en la solución del suelo. Una posible explicación de lo anterior sería insuficiente capacidad de la fase sólida del suelo para aportar los nutrientes necesarios en la solución del suelo (Menguel y Kirby, 2001) como para cubrir todas las necesidades del cultivo, ello a pesar del aporte de fertilizantes vía fertirriego.

Al observar el comportamiento dinámico del primer componente principal podemos ver la variabilidad de las observaciones versus el tiempo o número de muestreos, encontrándose que la dinámica del primer componente principal fue parecida para los seis cultivos, con una clara tendencia ascendente (Figura 6). Este comportamiento ascendente está regido mayormente por las variables con mayor ponderación en el primer componente principal.

solution the modeling power is higher to predict the joint dynamic behavior. Such studies should be performed to verify if the study of the soil solution can be a useful supplement to traditional studies in the solid phase of the soil.

From Dokuchaev times raised that the knowledge of soils is the mean to dominate and lead them with goals applied to agriculture (Hernandez-Jimenez *et al.*, 2006). Based on the findings of this research can be inferred that it is possible to predict nutrient dynamics of soil solution in soils with agricultural management. This behavior could be modified by changing crop management and/or land use and therefore have consequences on the pattern of the principal component. This effect in modifying the soil solution has been reported by Snakin *et al.* (2001), who indicates that in forest soils without human intervention the variability of the solution tends to decrease, which could make the predictive study of the soil solution easier.

The author indicates that human activities could create dynamic heterogeneity additional to that arising naturally in certain soil characteristics. The latter supports the findings in this study where agricultural soils on the one hand seem to



**Figura 6. Comportamiento del primer componente principal a través del tiempo para los diferentes cultivos estudiados.**  
**Figure 6. Performance of the first principal component over time for different crops studied.**

Dichas variables, a través de los coeficientes de carga, son negativas para el aguacate, arándano y pimiento, mientras que para los cultivos de fresa y papaya son positivas. Una

show a similar multivariate dynamic that seems to suggest common patterns of behavior in different systems, but with specific heterogeneities in the case of each crop and surely

posible respuesta para esta similitud estaría dada por el pH de la solución del suelo a través del tiempo, el cual como se mencionó con anterioridad, para todos los casos presenta correlación positiva (Figura 1, 2, 3 y 5) y se asocia de forma muy similar al del componente principal (Figura 6) a través del tiempo. Esto sucede para todos los cultivos con excepción de la papaya (Figura 4), donde los  $\text{NO}_3^-$  juegan un papel clave en el comportamiento ascendente del componente principal. En todos los casos el primer componente presenta una tendencia positiva a través del tiempo, lo que nos indica la posible presencia de un patrón temporal en la dinámica conjunta de los atributos de la solución del suelo.

Estos resultados por una parte parecen indicar la efectividad del primer componente principal en modelar la dinámica conjunta de las soluciones del suelo en los diferentes cultivos. En particular es una integración de los resultados que se presentaron anteriormente en los análisis univariados de los diferentes iones para los distintos cultivos a través del tiempo.

Por otro lado, la dinámica descrita señala la plausibilidad de modelar el comportamiento de un sistema complejo como es la solución del suelo, si bien no utilizando alguna variable individual, o grupos de variables analizadas de manera individual, sino una función lineal de las variables determinadas en el agua del suelo. Es posible que al aumentar el número de variables determinadas en la solución del suelo sea mayor el poder del modelo para predecir el comportamiento dinámico conjunto. Dichos estudios deben realizarse para verificar si el estudio de la solución del suelo puede ser un complemento útil a los tradicionales estudios realizados en la fase sólida del suelo.

Desde los tiempos de Dokuchaev se planteó que el conocimiento de los suelos es el medio de dominarlos y dirigirlos con objetivos aplicados a la agricultura (Hernandez-Jimenez *et al.*, 2006). En base a lo encontrado en esta investigación podemos inferir que es posible la predicción de la dinámica nutrimental de la solución del suelo en suelos con manejo agrícola. Este comportamiento podría verse modificado al cambiar el manejo del cultivo y/o uso del suelo y por ende tendrá consecuencias en el patrón del componente principal. Este efecto en la modificación de la solución del suelo se ha reportado por Snakin *et al.* (2001), quien indica que en suelos de bosque sin intervención humana la variabilidad de la solución tiende a decrecer, lo cual pudiera hacer más sencillo el estudio predictivo de la solución del suelo.

comes from each specific combination soil - plant species-agronomic management. Also have been reported results of a daily cyclical behavior of pH, redox potential and calcium in the soil solution in forests (Snakin, 1983), but without finding similar trends in the different soils. Currently there is no information on the composition dynamics of the soil solution over time for crops as well as for multivariate statistical analyzes that attempt to explain or predict the behavior of the soil solution system.

It is essential to continue with these types of studies and repeat them in subsequent years adding more variables as well as other ions ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , etc.), oxide reduction potential (ORP), concentration of organic acids (malate, citrate, lactate, etc.), titratable acidity, populations and species of bacteria, fungi and protists or metagenomic studies thereof, among others. It would also be of great importance to perform such work under natural conditions without human intervention or in rainfed, reduced tillage or organic farming areas, to determine if in spite of the different soil conditions exist common patterns among them as those are described in this study.

This study explores the broad picture about soil composition and its behavior. It offers the prospect of evaluating the soil solution as a complement to classical physicochemical determinations performed on samples of the soil solid phase.

From the methodological point of view, this paper illustrates the usefulness of principal component analysis, as a useful tool for the descriptive study of the soil solution, as being a complex and dynamic system it consists of many elements that govern their behavior both individually and collectively. Studying the individual components separately without an integrative dimension reduction tool, would fail in exploring joint dynamics from soil solution systems, where not only considers the behavior of individual attributes, but the system as a whole that emerges from the components connected by its interactions and interdependencies.

## Conclusions

The individual behavior of chemical variables of the soil solution showed similar response patterns for avocado, cranberry and pepper with negative trends for all variables

El mismo autor indica que las actividades humanas pudieran crear heterogeneidad dinámica adicional a la que naturalmente surge de las características de cierto suelo. Lo anterior apoya lo encontrado en este estudio en donde los suelos agrícolas por una parte parecen mostrar una dinámica multivariada análoga que parece indicar patrones de comportamiento comunes en los diferentes sistemas, pero con heterogeneidades específicas en el caso de cada cultivo y que seguramente provienen de cada combinación específica suelo-especie vegetal-manejo agronómico. También se han reportado resultados de un comportamiento cíclico diario del pH, potencial redox y calcio en la solución del suelo en bosques (Snakin, 1983), pero sin encontrarse tendencias similares en los diferentes suelos. En la actualidad no existe información sobre la dinámica de la composición de la solución del suelo a través del tiempo para cultivos así como tampoco análisis estadísticos multivariados que intenten explicar o predecir el comportamiento del sistema de la solución del suelo.

Es indispensable seguir con estos tipos de estudio y repetirlos en los años subsiguientes adicionando mayor número de variables como son otros iones ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , etc.), el potencial de óxido-reducción (ORP), la concentración de ácidos orgánicos (malato, citrato, lactato, etc.), acidez titulable, poblaciones y especies de bacterias, hongos y protistas o bien estudios metagenómicos de los mismos, entre otras. También sería de gran importancia el realizar este tipo de trabajos bajo condiciones naturales sin intervención humana o bien en zonas agrícolas de temporal, labranza reducida o agricultura orgánica, para determinar si a pesar de las diferentes condiciones existentes en los suelos existen patrones comunes entre ellos como los descritos en este estudio.

Este estudio explora el amplio panorama acerca de la composición del suelo y de su comportamiento. Ofrece la perspectiva de evaluar la solución del suelo como un complemento a las clásicas determinaciones fisicoquímicas realizadas en muestras de la fase sólida del suelo.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo ilustra la utilidad del análisis de componentes principales, como una herramienta útil para el estudio descriptivo de la solución del suelo, ya que al ser un sistema complejo y dinámico está conformado por infinidad de elementos que rigen su comportamiento tanto de forma individual como colectiva. El estudiar por separado los componentes

except pH. This same behavior was exhibited by strawberry with the difference that in addition to pH, EC also tended to increase over time.

For papaya chemical variables such as  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH and EC showed an upward trend against time while the  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  were reduced.

The study demonstrated the feasibility of applying multivariate simulation in describing the dynamic behavior of the soil solution.

The results show that regardless of soil type, location and even crop, there are similar behavior patterns and potentially predictable that would allow predicting the dynamic behavior of the soil solution.

*End of the English version*



## Literatura citada

- Avitia-García, E.; Pineda-Pineda, J.; Castillo-González, A. M.; Trejo-Téllez, L. I.; Corona-Torres, T. y Cervantes-Urbán, E. 2014. Extracción nutricional en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.). México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 3(5):519-524.
- Benton-Jones, J. J. 2012. Plant nutrition and soil fertility manual (second edition). CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA. 271 p.
- Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. 12th Ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA. 881 p.
- Broschat, T. K. 1979. Principal component analysis in horticultural research. United States. HortScience 14(1):114-117.
- Buscot, F. 2005. Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions. Springer. Berlin, Alemania. 403 p.
- Charley, J. L. and McGarity, J. L. 1964. High soil nitrate-levels in patterned saltbush communities. United Kingdom. Nature. 201:1351-1352.
- Fallas, R.; Bertsch, F. y Barrientos, M. 2014. Curvas de absorción de nutrientes en papaya (*Carica papaya* L.) CV. "Pococi" en las fases de crecimiento vegetativo, floración e inicio de cosecha. Costa Rica. Agronomía Costarricense. 38(2):43-54.
- Ferreira, E. R.; Peralta, C. J.; Sadzawka, R. A.; Muñoz, S. C. and Valenzuela, V. J. 2001. Efecto de la acidificación del sustrato y del agua de riego en la nutrición, desarrollo y producción de arándano ojo de conejo (*Vaccinium ashei* Reade). Chile. Agricultura técnica. 61(4):452-458.
- García, R. 2006. Sistemas complejos: conceptos, métodos y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria. Gedisa Editorial. Barcelona, España. 199 p.
- Gareth, J.; Witten, D.; Hastie, T. and Tibshirani, R. 2014. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. Springer. New York, USA. 419 p.
- Hancock, J. F. and Draper, A. D. 1989. Blueberry culture in North America. USA. Hortscience. 24(4):551-556.

individuales sin una herramienta integradora de reducción de dimensiones, fallaría en la exploración de la dinámica conjunta del sistema de la solución del suelo, en donde no solamente cuenta el comportamiento de los atributos individuales, sino del sistema en conjunto que emerge de los componentes unidos por sus interacciones e interdependencias.

## Conclusiones

El comportamiento individual de las variables químicas de la solución del suelo mostró patrones de respuesta similar para los cultivos de aguacate, arándano y pimiento con tendencias negativas para todas las variables a excepción del pH. Esta misma conducta exhibió el cultivo de fresa con la diferencia que adicional al pH la C.E también tendió a incrementar a través del tiempo.

Para el cultivo de papaya las variables químicas como son los  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , pH y C.E mostraron tendencia al incremento frente al tiempo mientras que el  $\text{K}^+$  y el  $\text{Na}^+$  se redujeron.

El estudio demostró la factibilidad de aplicar la modelación multivariada en la descripción del comportamiento dinámico de la solución del suelo.

Los resultados demuestran que, independientemente del tipo de suelo, la ubicación y hasta del cultivo, existen patrones de comportamiento similar y potencialmente predecible que permitirían predecir el comportamiento dinámico de la solución de suelo.

## Agradecimiento

Los autores(a) agradecen a Tradecorp México S.A. y Nevada Chemicals S.A. de C. V. por el apoyo económico y logístico para la realización de la presente investigación.

- Hans, J. 1994. FACTORS OF SOIL FORMATION A System of Quantitative Pedology. Dover Publications, INC. New York, New York, USA. 271 p.
- Hernández-Jiménez, A.; Ascanio-García, M. O.; Morales-Díaz, M.; Bojórquez-Serrano, J. I.; García-Calderon, N. E. y García-Paredes, J. 2006. EL SUELO: fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo. Universidad Autónoma de Nayarit. Nayarit, México. 231 p.
- Khasawneh, F. E. 1971. Solution Ion Activity and Plant Growth. USA. Soil Sci. Soc. Amer. 35:426-436.
- Knight, B.; Zhao, F. J.; McGrath, S. P. and Shen, Z. G. 1997. Zinc and cadmium uptake by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentration and chemical speciation of metals in soil solution. Netherlands. Plant and Soil. 1(197):71-78.
- Lorenz, S. E.; Hamon, R. E.; Holm, P. E.; Domingues, H. C.; Sequeira, E. M.; Christensen, T. H. and McGrath, S. P. 1997. Cadmium and zinc in plants and soil solutions from contaminated soils. Netherlands. Plant and Soil. 1(189):21-31.
- Maldonado-Torres, R.; Álvarez-Sánchez, M. E.; Almaguer-Vargas, G.; Barrientos-Priego, A. F. y García-Mateos, R. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero "hass". México. Revista Chapingo Serie Horticultura. 13(1):103-108.
- Mcbride, M.; Sauve, S. and Hendershot, W. 1997. Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. United Kingdom. European Journal of Soil Science. 2(48):337-346.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition (5th Edition). Springer. Dordrecht, The Netherlands. 807 p.
- Molina, E.; Salas, R. y Castro, A. 1993. Curva de crecimiento y absorción de nutrimentos en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch. Cv. Chandler) en Alajuela. Costa Rica. Agronomía Costarricense. 17(1):63-67.
- Narro-Farías, E. 2004. Física de suelos: con enfoque agrícola. Editorial Trillas. México D. F. México. 195 p.
- Navarro-Blaya, S. y Navarro-García, G. 2003. Química Agrícola. Mundiprensa. Barcelona, España. 479 p.
- Snakin, V. V. 1983. Some soil regimes by in situ-metry data. In: Russian chernozem. A hundred years after Dokuchaev. Kovda, V. A and Samoilo, E.M. (Eds.). Nauka Publ. Moscow, Russian. 79-89 pp.
- Snakin, V. V.; Prisyazhnaya, A. A. and Kovács-Láng, E. 2001. Soil Liquid Phase Composition. Elsevier Science B. V. Amsterdam, The Netherlands. 316 p.
- Spier, J. M. 1983. Influence of N, K, and Na concentration on growth and leaf element content of "tifblue" rabbiteye blueberry. USA. HortScience. 18(1):223-224.
- Sposito, G. 1981. The thermodynamics of soil solutions. Oxford Clarendon Press. New York, United States. 223 p.
- Rincón, L.; Saez, J.; Balsalobre, E. y Pellicer, C. 1995. Crecimiento y absorción de nutrientes del pimiento grueso en cultivo bajo invernadero. España. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 10(1):47-59.
- Ryan, A. J. 2007. Emergence is coupled to scope, not level. United States. Complexity. 13(2):67-77.

## **ARTICULO**

**Multiple linear and polynomial models for the study of the  
dynamics of the soil solution**

## Multiple linear and polynomial models for the study of the dynamics of the soil solution

William Alfredo Narváz-Ortiz<sup>1</sup>; Adalberto Benavides-Mendoza<sup>1</sup>, Luis Alonso Valdez-Aguilar<sup>1</sup>; Marcelino Cabrera-De la Fuente<sup>1</sup>; Pablo Preciado-Rangel<sup>2</sup>; Manuel Humberto Reyes-Valdés<sup>3§</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Departamento de Horticultura y <sup>3</sup>Departamento de Fitomejoramiento Calzada Antonio Narro 1923, C. P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico y Carretera a Santa Fe s/n. Torreón, Coahuila, México.

§ Corresponding author: [mathgenome@gmail.com](mailto:mathgenome@gmail.com)

### Abstract

The objective of the present work was to study the soil solution throughout time in pots under greenhouse conditions. The work consisted in monitoring the solution of a calcareous soil and a forest soil without a vegetal crop, with different types of fertilization: treatment 1: absolute control (irrigation water); treatment 2: Steiner nutrient solution; treatment 3: solid fertilizers; and treatment 4: Vermicompost tea (aqueous extract). The samples were collected weekly using lysimeters for 14 weeks and were analyzed to determine: nitrate content, total nitrogen, calcium, potassium, magnesium, sodium, sulfur, zinc, boron, pH, electrical conductivity and oxide-reduction potential. In order to understand the interactions between treatments, soil type, and time over ion behavior and availability, linear and polynomial models were used, selected by a cross-validation method, which resulted in robust models, where it was found that the pH behavior is associated with the type of fertilization and soil type, with the elapsed time being a non-significant factor. The use of mentioned models showed robust models. It was found that the behavior of the pH is associated with the type of fertilization and soil type, with the elapsed time as a factor not significant. On the other hand, time influenced the behavior of the remaining ions as well as their availability.

*Key words:* linear models, soil pore water, nutrient biodisponibility, calcareous soil, forest soil.

## I. Introduction

The liquid phase, soil pore water, or soil solution is a non-homogeneous solution distinguished by a marked spatial and temporary variability on concentration and composition. (Mengel *et al.*, 2001). Soil solution is a product of the interaction of several biological and physiochemical processes from different phases that form the edaphic system. The liquid phase of the soil is one of the most variable components within the soil system due to the great diversity of its components, as well as its scattered nature that allows complex flows of matter and energy (Snakin *et al.*, 2001). Slight changes in the solid phase of the soil system can lead to extensive modifications in the soil solution, which in turn can be extended by the action of living components in the system (Hillel, 1980). Traditionally, crop nutrition focuses on nutrient analysis of the soil solid phase, which functions as the nutrient store and provides an indication of a soil's ability to supply nutrients to the plant, but does not adequately indicate (and in some cases, does not indicate at all) the disponibility of nutrients in the soil solution, as well as the changes induced by the roots of plants and by the edaphic microbiome (Marschner, 2012). However, from a perspective of studying the soil system for agricultural purposes, soil solution is a very important system to study and understand, due to its close relationship with crop nutrition, being the primary source from which the roots absorb All elements in their ionic forms and which are indispensable for their development (Khasawneh, 1971; Mengel *et al.*, 2001; Snakin *et al.*, 2001).

The soil water (soil solution) composition is dynamic and fluctuates throughout the time, and this will be reflected in the dissolved nutrient quantity. The mineral concentration will vary depending on several specific factors, such as climate, the amount of water in soil, content, pore diameter, and depth of pores, type and depth of edaphic horizon, pH, cationic interchange capacity, redox potential, amount of organic matter in soil and microbiota activity. (Asher, 1978). Human activities such as fertilization, liming, irrigation, artificial drainage, among others, can also change the solution of the soil. (Jan Mulder and Malcon 1994). Likewise, excessive tillage profoundly alters the natural structure of the soil, changing the length, connectivity, and distribution of soil pore diameters, characteristics



closely related to soil water composition and the synchronization of interactions soil-plant-microorganisms. (Ratsep *et al.*, 1994).

The dynamics of soil solution composition and its relationship with the types of fertilizers used has been shallowly researched. Hernandez-Diaz *et al* (2014) monitored soil solution in different tomato plant growth phases to obtain nutrition reference levels. Yanai *et al.* (1995) carried out experimentation on flower pots, examining the solution of four types of soil in pots with and without maize plants; they observed a relation between the decrease in the concentration of the soil solution and the absorption of the plant. Yanai *et al.* (1996) performed a factorial experiment to monitor soil solution over time in the presence and absence of plants and with or without application of nitrogen, in order to observe the effects of nitrogen on the initial composition of the soil solution and its impact on the dynamical composition of soil solution during crop growth, as well as to observe the amount of elements absorbed by the plant and its decrease in soil solution. Yanai *et al.*, (1997) studied the effects of slow-release fertilizers on nutrient absorption by plants and leaching potential of soil nutrients based on soil solution dynamic. They studied the soil solution over time in the presence and absence of a wheat crop under three scenarios of nitrogen supply: soluble fertilizer such as  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , slow-release fertilizer and without fertilization.

To extend the research on the dynamic behavior of soil solution is convenient to use new tools for its modeling such as linear and polynomial modeling, which makes possible to forecast qualitative and quantitative response variables from predictive qualitative and quantitative variables. But this is not the only application that can be given to linear and polynomial models: they also allow the construction of predictive models, selecting the variables with the greatest influence on the response and discarding the variables that do not contribute relevant information or have no significant effects (James *et al.*, 2013). This type of analysis have been reported when modeling absorption response of mineral elements in corn and rice (Li *et al.*, 1998), as well as in the prediction of certain soil properties such as pH, Ca, Mg, K, P, Al and H concentration, sum of bases, cationic interchange capacity, base saturation and aluminum saturation using spectral data from the soil at different depths (Genú and Demattê, 2011).

In the present study, soil solution monitoring was carried out over time using suction soil-water extractors (lysimeters), which is a non-destructive method for soil structure (Van Der Ploeg y Beese, 1977). The objective was to analyze obtained data to build and select linear and polynomial models through methods of *leave-one-out cross-validation (LOOCV)*, which allowed to develop robust models of the behavior of the soil solution under the different scenarios of fertilization and types of soil.

## 2. Methodology

### 2.1. Location

The study was performed under greenhouse conditions at Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro facilities, located in Saltillo, México, from January 2015 to April 2015.

### 2.2. Study material

Two soil types were used as study material; calcareous non-agricultural soil from an area free of vegetation and black forest soil from an area with reforestation of 20 years with *Pinus halepensis*. Soil was collected from land belonging to the University, located in 25°21'14.87"N and 101° 2'23.25"O for calcareous soil and 25°21'6.81"N y 101° 1'27.69"O for black forest soil; after the sampling the soils were characterized from the physical-chemical point of view according to the NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002) (Table 1).

Table 1. Physical-chemical analysis of the soil

Physical properties of soil													
Soil	pH	Electrical conductivity (dS m <sup>-1</sup> )	Texture	Saturation point (%)	Field capacity (%)	Wilting point (%)	Bulk density (%)						
Calcareous	8.08	0.90	Loam	39	20.7	12.3	1.04						
Forest	7.59	0.58	Loam	51	27.2	16.2	0.95						
Soil fertility analysis													
Soil	O.M	P-Olsen	N-NO <sub>3</sub>	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	B	S
	(mg Kg <sup>-1</sup> )												
Calcareous	0.97	19	23.1	296	6536	714	107	1.68	0.19	1.28	0.22	0.09	20.5
Forest	4.9	15	2.72	599	6364	341	101	3.90	1.87	8.17	0.54	0.47	12.2

### 2.3. Experiment installation

The collected soils were deposited in 12 L plastic pots, 24 pots per soil type (calcareous and forest) were filled, obtaining a total of 48 pots. To each pot with soil, a lysimeter of 13 inches of length was inserted to a depth of 15 cm in the central part of the pot. Once the lysimeters were installed, irrigation water, previously characterized (Table 2), was applied to all pots until reaching the field capacity point. It should be mentioned that soils were not brought under any physical or chemical process before the experiment took place so they could get to its natural condition as possible.

Table 2. General characteristics of salinity / sodicity, cations, anions, and special determinations of irrigation water.

Salinity / Sodicity		Cations		Anions		Micronutrients	
		(mg L <sup>-1</sup> )		(mg L <sup>-1</sup> )		(mg L <sup>-1</sup> )	
pH	8.06	Ca	95.8	SO <sub>4</sub>	81.7	B	0.01
E.C (dS m <sup>-1</sup> )	0.77	Mg	24.1	HCO <sub>3</sub>	256	Fe	ND
SAR	0.48	Na	20.5	Cl	37.1	Mn	ND
SARaj	0.63	K	6.24	CO <sub>3</sub>	34.2	Cu	ND
				N-NO <sub>3</sub>	1.12	Zn	ND

E.C: electrical conductivity; ARS: absorption ratio of sodium; ARSaj: adjusted sodium adsorption ratio; ND: not detected.

### 2.4. Description of the treatments

The experiment consisted in the continuous application of irrigation under different nutrient supply scenarios for the two soil types: calcareous and forest, without presence of crop; the irrigation was carried out manually, in order to maintain the most similar possible Irrigation volumes applied to different treatments; two irrigations were carried out per week of 1 L each, sufficient volume with which the soils were maintained at field capacity. Experimental treatments were: treatment 1 (control): absolute control using irrigation water only; treatment 2 (Steiner): continuous application of Steiner nutrient solution (Steiner, 1961); treatment 3 (Solid): discontinuous and fractional application of solid fertilizers and treatment 4 (Organic): organic fertilizer application with Vermicompost tea (aqueous extract). These applications were made for the two types of soil. (Figure 1).

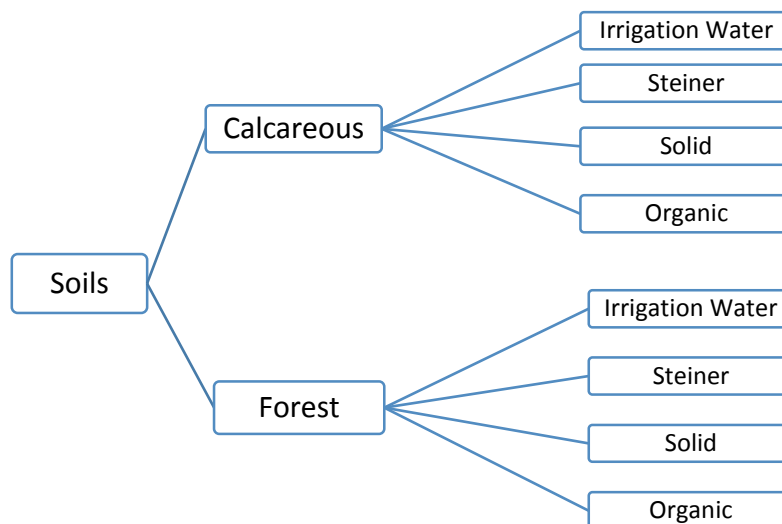


Figure 1. Diagram for the different nutritional contributions for each type of soil.

For the treatments with the application of inorganic fertilizers the amount of nutrients applied to the treatments Steiner and Solid was similar in quantity but different in its form of application; in both cases, it was considered the composition of irrigation water (Table 2) and soluble fertilizers were used (Table 3). The total volume of water applied in irrigation for each one of the treatments during the entire experimentation was 28 L for each pot. For treatments using solid fertilizers irrigation provided was with water acidified to ~5.5 pH using sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), the application of fertilizers was fractional and performed three times (January 28<sup>th</sup>, March 4<sup>th</sup> and April 1<sup>st</sup>, 2015).

Table 3. Fertilizers used in the preparation of the nutrient solution and in the application of the treatment in solid and fractioned form

Fertilizer	Formula	Fertilization <sup>Y</sup>	
		Steiner	Solid*
		mg L <sup>-1</sup>	g
Calcium nitrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_{2.4}\text{H}_2\text{O}$	590	16.52
Potassium nitrate	$\text{KNO}_3$	710	19.88
Magnesium sulphate	$\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2 \text{O}$	24.6	0.6888
Monobasic potassium phosphate	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	136	3.808

Ultrasol micro (microelements)	Fe EDTA, Mn EDTA, Zn EDTA, Cu EDTA, B and Mo	40	1.12
--------------------------------	---	----	------

‡Fertilizer content considering the contribution of irrigation water. \* Amount of total fertilizer applied in treatment in fractional and solid form

Organic treatment with vermicompost tea was obtained from a manure of bovine origin. The aqueous extract was made 24 before its application, and once the solution was obtained it was acidified to a final ~5.5 pH with food grade citric acid (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) and a ~2 dS cm<sup>-1</sup> C.E. through dilution with irrigation water, in order to avoid phytotoxicity (Carballo *et al.*, 2009; Oliva-Llaven and Rodríguez-Hernández, 2010). Mineral composition of vermicompost tea is shown in Table 4.

Table 4. Chemical characteristics and mineral composition of vermicompost tea applied in organic treatment.

Variable		Variable	
pH*	8.2	Mn (mg L <sup>-1</sup> )	<0.025
E.C (dS cm <sup>-1</sup> )	2.03	Na (mg L <sup>-1</sup> )	186.4
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	75	S (mg L <sup>-1</sup> )	154.51
P (mg L <sup>-1</sup> )	9.33	Zn (mg L <sup>-1</sup> )	0.046
Ca (mg L <sup>-1</sup> )	96.53	B (mg L <sup>-1</sup> )	1.017
K (mg L <sup>-1</sup> )	440.17	Cu (mg L <sup>-1</sup> )	<0.005
Mg (mg L <sup>-1</sup> )	42.75	Fe (mg L <sup>-1</sup> )	0.28

\* pH obtained after the preparation of the vermicompost tea, before being acidified with citric acid

## 2.5. Sample collection and analysis

To obtain soil solution samples, soils were irrigated the day before, and they reached a 30 kPa field capacity, which was measured through Irrrometer tension gauges placed previously to the application of irrigation. Once the prerequisites were fulfilled, all the

lysimeters that were placed in the 48 pots from the beginning of the experiment and kept in the pots during the whole time of the experiment were vacuumed. Vacuum pressure inside the lysimeters was -60 kPa obtained with a hand pump. The samples were collected from the soil solution 24 hours after the vacuum.

Soil solution was collected once a week on a 14-week term. For each treatment and soil type, three replicates per sample were obtained and placed in plastic containers. Samples obtained were brought to an *in-situ* analysis to determine: pH with a Horiba Brand potentiometer model B-173; electric conductivity (E.C.) with a Horiba brand Spectrum Cardy Twin model; Redox potential (R.P.) that was measured with an OMEGA brand electrode model PHH-7011 and nitrate concentration ( $\text{NO}_3^-$ ) that was measured with selective-ion Horiba brand equipment model B-743. Subsequently, soil solution samples were analyzed in the laboratory to determine the total nitrogen content (N) by micro-Kjeldahl technique (Muller, 1961), as well as potassium concentration ( $\text{K}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), total sulfur (S), sodium ( $\text{Na}^+$ ) and boron (B) through wet calcination technique (Fick *et al.*, 1976) and with a Perkin Elmer ICP-OES equipment optima 8300 model.

## **2.6. Data analysis**

### **2.6.1. Multiple polynomial and linear regression analysis**

The data obtained in the different soil solution measurements were analyzed with multiple linear and polynomial models using three different predictors: (1) treatments (irrigation water, Steiner, solids, and vermicompost tea); (2) type of soil (calcareous and forest soil); (3) elapsed time of 14 weeks. The first two were considered categorical, while time was considered a numerical variable which was used under different polynomial degrees. The use of multiple linear regression methods offered the advantage of considering all the available information when building the model and therefore to make more accurate estimates (James *et al.*, 2013). Models used were the following:

Multiple linear model:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \cdots \cdots \cdots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

Multiple polynomial model:

$$Y = \beta_0 + (\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2) + \beta_3 X_3 + \beta_3 X_2 + \beta_3 X_3 \cdots \cdots \cdots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

Where:

$B_0$  = the intercept term, the expected value of  $Y$  when  $X = 0$

$B_1$  = the slope of the line between the  $X_j$  and the response  $Y$ , interpret  $\beta_j$  as the average effect on an increase of one unit in  $X_j$ , keeping fixed all other predictors.

$X_j$  = the  $j$ -th predictor

$\varepsilon$  = the error term

One of the objectives of the use of models was to determine if all of the predictors help to rebuild the dependent variable ( $Y$ ) or only a subset of predictors, which represents the values and concentrations of pH, E.C, ORP,  $\text{NO}_3^-$ , N,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , S,  $\text{Na}^+$ , and B. to verify if there is a relationship between the variables of response and the predictors, we used a test of hypothesis testing the null hypothesis:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \cdots \cdots \cdots = \beta_p = 0$$

Versus the alternative hypothesis

$$H_a: \text{at least one } \beta_j \text{ is not zero.}$$

This hypothesis test is done by calculating the F statistic. When there is no relationship between the response and the predictors, we could expect the F statistic to assume a value close to 1.

### 2.6.2. Leave-one-out cross-validation

The evaluation and selection of the linear model or polynomial degree to use, was carried out through a cross-validation method, considered as a technique of resampling and as an important tool in the practical application of many statistical learning procedures; this method estimates the test error associated with a given statistical learning method to

evaluate its performance or to select the appropriate level of flexibility (James *et al.*, 2013). The test error is the average error that results from using a statistical learning method to predict the response in a new observation, meaning a measure that was not used in the formation of the method. Given a data set, the use of a particular statistical learning method is guaranteed if it results in a low test error. The test error can be easily calculated if a designated set of tests is available. On the contrary, training error can be easily calculated using the method of statistical learning to the observations used in its formation. The training error will be lower as more variables, or polynomial grades are incorporated into the model, leading to an over-adjustment of the model, but with a poor performance for the prediction of new results. The error rate of training is often very different from the test error rate, and in particular the first may underestimate dramatically the last (James *et al.*, 2013).

*Leave-one-out cross-validation (LOOCV)* involves splitting the set of observations into two parts, and instead of creating two subsets of comparable size, a single observation  $(X_1, Y_1)$  is used for the validation set, and the remaining observations  $\{(X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)\}$  constitutes the training set. For this validation method, many interactions are made as samples  $(n)$  are in the set of data (Arlot and Celisse, 2010; James *et al.*, 2013). Thus, for each of the  $(n)$  interactions, an error calculation is performed. The final result is obtained with the arithmetic mean of the  $n$  error values obtained, according to the formula:

$$CV_{(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n MSE_i.$$

Where the sum of the  $n$  error values is divided by the value of  $n$ .

## Results

### 3.1. Selection of multiple models using cross-validation

In order to find the most robust models, the predictive variables (treatments, soil type and time in weeks) were subjected to multiple model analysis, where from their significant



effect and through a cross-validation analysis the error was estimated Associated with the different models and chose the model that presented the smallest error (Table 5).

Table 5. Error coefficients obtained by a cross-validation method for the different subsets of the explanatory variables as well as for the different polynomial grades performed in the numerical variable.

Y	Predictive explanatory variables				
	Linear Models		Polynomial models		
	T+S	T+S+W	T+S+(W) <sup>2</sup>	T+S+(W) <sup>2</sup> + (W) <sup>3</sup>	T+S+(W) <sup>2</sup> +(W) <sup>3</sup> + (W) <sup>4</sup>
pH	0.04270996*	0.04279535	0.04307152	0.04293865	0.04303703
E.C	0.8843186	0.8822058	0.8765590	0.8741023*	0.8746761
ORP	658.4279	660.4567	661.2524	654.1208	632.6799*
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	192534.9	192534.9	191012.7	188569.1*	189259.0
N	1456.893	1461.896	1412.665	1382.919	1333.659*
K	1253.287	1205.449	1192.640*	1192.764	1199.748
Ca	55308.09	54845.55	52259.20*	52447.91	52347.71
Mg	3372.516	3401.988	3324.375	3335.108	3315.501*
Na	416.4321	305.1549	293.6479*	295.8152	294.8146
S	795.1074	758.3078	755.4749	739.8485*	744.8208
Zn	0.1474515	0.1408814	0.1410824	0.1381035*	0.1388876
B	0.5791268	0.5781551	0.5807491	0.5681592	0.4686104*

Y: Response variables; T: treatment; S: soil; SE: weeks; SE<sup>2</sup>: Quadratic degree weeks; SE<sup>3</sup>: Cubic degree weeks; SE<sup>4</sup>: Quartic grade weeks.

\* Lowest coefficient obtained by cross-validation method

The cross-validation procedure has an advantage with respect to the setting of the traditional models through the use of the R<sup>2</sup>, as it provides a direct estimate of the test error, and makes fewer assumptions about the true underlying model. In Figure 2 we see an example of the coefficients for the R<sup>2</sup> and the coefficient of cross-validation to estimate the most robust model for prediction, in this case, the Ca<sup>2+</sup> content in the soil solution.

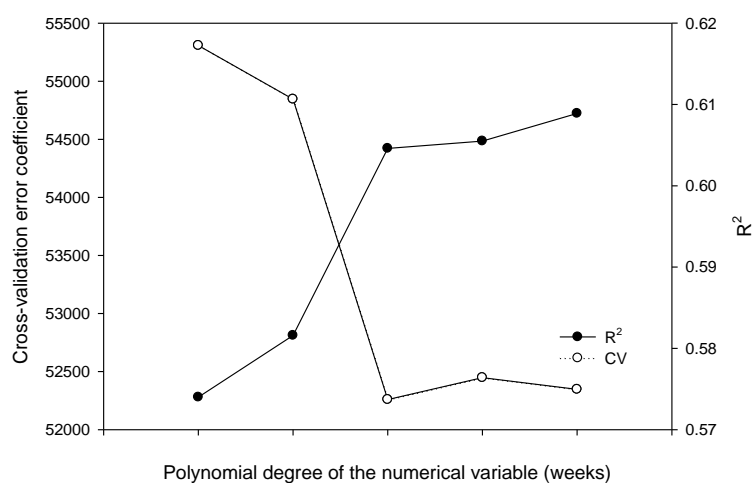


Figure 2. For the data set of the  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in the soil solution, the  $R^2$  and the cross-validation error coefficient (CV) for the different polynomial grades of the numerical variable (weeks). In all polynomial grades the two categorical variables are considered.

If we examine only the  $R^2$ , it could be concluded erroneously that the model with the higher number of variables is better, ending with a model that involves all of the variables. A high  $R^2$  value indicates a model with a low training error, but in addition to a high  $R^2$  value, it is desired to choose a model having a lower test error. According to the cross-validation method, the most robust model involves the variables treatment, soil type and weeks (Table 5) with the quadratic order as indicated in Figure 2, and not necessarily the highest polynomial degree as deduced of  $R^2$ .

### 3.2. Multiple linear models in the study of the soil solution

According to the coefficients obtained by the cross-validation method (Table 5) for all the variables measured in the soil solution, pH was the only variable that is adjusted to the linear model, where the categorical variables predictive: treatments (irrigation water, Steiner, solid and organic) and the soil types (calcareous and forest soil types) obtained the lowest coefficient of validation error (Table 5). The linear model indicated that the time variable did not influence the behavior and the dynamics of the pH.

### 3.2.1. Multiple linear model with two predictor variables for pH

In Table 6, we present the results of the analysis of the linear model of the pH of the soil solution and the following variables: Treatments (irrigation water, Steiner, solid and organic) and soil types (calcareous and forest). According to the multiple linear model (Table 6) within the categorical variables treatments, the reference treatment was irrigation water, and when compared with the treatments with fertilization, significant differences were observed between the control and treatments with application of inorganic fertilizers (Steiner and solid) ( $p \leq 0.01$ ), whereas the organic treatment did not show significant differences. For the categorical variable of soils, the reference variable was the forest soil, which when compared with the calcareous soil presented statistical differences. Significant effects point to the existence of a relationship between the predictors and the predictor; when we observed the coefficients obtained in the model for the treatments (Table 6), we found negative coefficients which indicate that the treatments that were significant decreased the pH of the soil solution to a greater extent by the effect of fertilizers in solid form. The coefficient obtained for the calcareous soil was positive, suggesting that the pH levels in the calcareous soil were higher compared to the forest soil, the pH of the soil solution did not fluctuate by more than one unit for all treatments (Figure 3a and 3b).

Table 6. Multiple linear model between pH and two explanatory variables (treatment and soil type). The reference treatment for the comparison of the different nutrient contribution scenarios was irrigation water; while the forest soil was used as a reference to compare it against the calcareous soil.

Variables	Coefficient	Std. error	P-value
	pH		
Steiner	-0.206786	0.031651	2.43e-10 **
Solid	-0.314405	0.031651	< 2e-16 **
Organic	-0.007024	0.031651	0.8245
Calcareous soil	0.054583	0.022380	0.0153 *

\*\* = significant at  $p \leq 0.01$ ; \* = significant at  $p \leq 0.05$

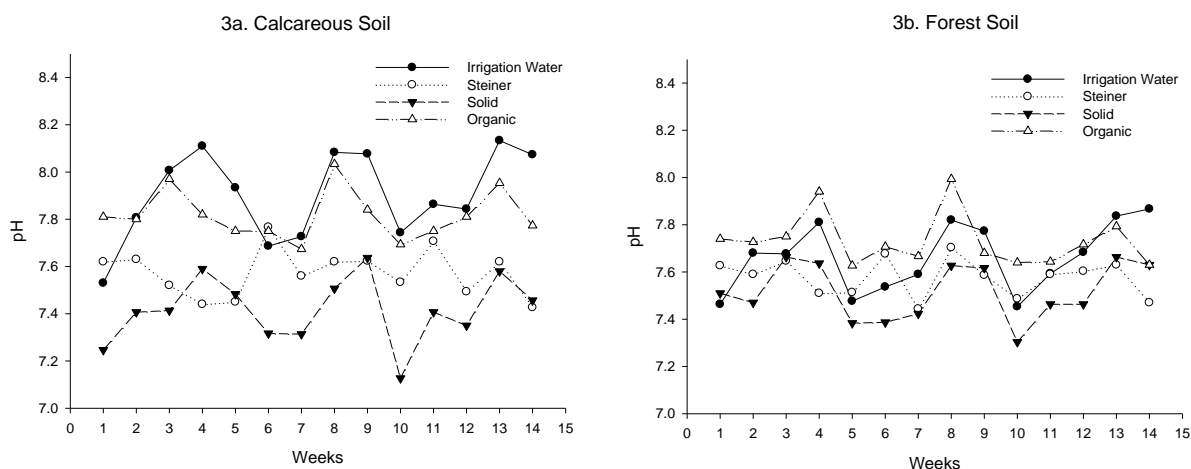


Figure 3. pH dynamics, determined in soil solution samples for a calcareous and forest soil, under pot and greenhouse conditions, under different nutrient supply scenarios, using inorganic fertilizers: nutrient solution (Steiner) and Fertilizers in fractional form (solid) and an organic fertilizer with vermicompost tea (aqueous extract)

### 3.3. Multiple polynomial models in the study of the soil solution

According to the coefficients obtained by the method of cross-validation (Table 5), in the variables measured in the soil solution with the exception of the pH, it was found that the multiple polynomial models were the best adjusted to explain the response variables. Obtaining models with different polynomial grades, where in the case potassium, calcium, and sodium the suitable model was of quadratic degree; for electrical conductivity, nitrates, sulfur, and zinc was of cubic degree; for the potential of reduction oxide, nitrogen, magnesium, and boron was of quartic degree. Within all of the polynomial models are implied the categorical variables (treatments and soil types).

#### 3.3.1. Multiple polynomial models of second order with three predictive variables for potassium, calcium, and sodium

Table 7 shows the results of the polynomial models for the variables of potassium, calcium and sodium response with categorical variables: treatments (irrigation water, Steiner,

solid, and organic), soil types (calcareous and forest); and the numerical variable of time in weeks. The potassium and calcium contents showed similar behavior according to the polynomial model. In both cases, there were significant differences between the control and treatments with inorganic fertilizers ( $p \leq 0.01$ ) based on a Steiner nutrient solution and fertilizers in solid form (Table 7). The organic treatment had no significant influence on the concentration of potassium or calcium in the soil solution. The categorical variable of soil types showed significant differences between the calcareous soil and the forest soil, with the latter used as the reference. Potassium and calcium according to the polynomial model showed positive coefficients for the treatments variable (Table 7), which suggests that the inorganic treatments increased the levels of these ions in the soil solution compared to the control treatment, being the treatment Solid that showed the best results. For the calcareous soil variable, the coefficients obtained for both potassium and calcium were negative (Table 7), indicating that the average levels of potassium and calcium in the calcareous soil are below the levels of the forest soil in an average concentration of 45 and 295.5 mg L<sup>-1</sup> respectively.

Table 7. Multiple polynomial model between the content of potassium, calcium, sodium, and three variables: two explanatory (treatment and soil type) and one numerical variable (weeks) of quadratic degree. The reference treatment for the comparison of the different nutrient contribution scenarios was irrigation water; while the forest soil was used as a reference to compare it against the calcareous soil.

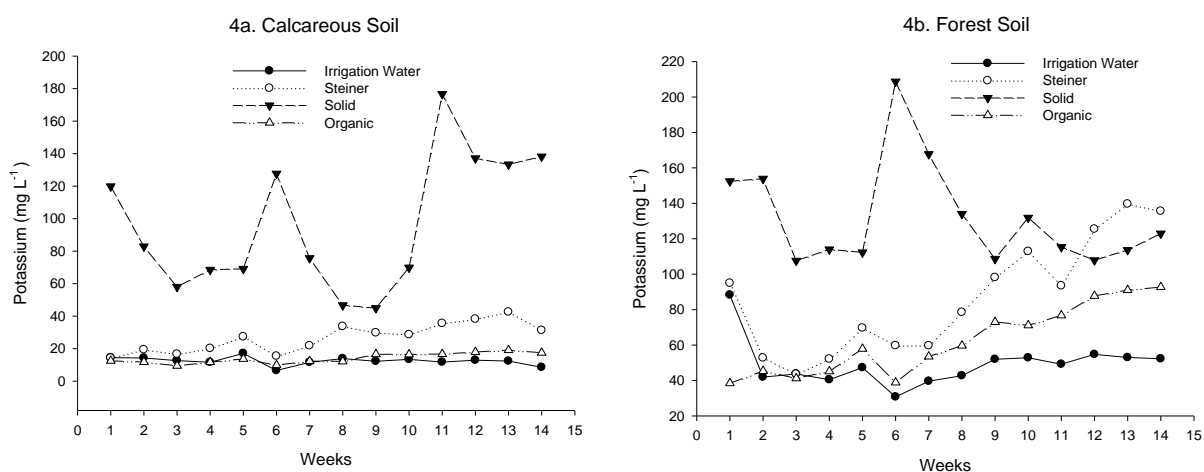
<b>Variables</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Std. error</b>	<b>P-value</b>
<b>Potassium</b>			
Steiner	26.029	5.2579	1.18e-06 **
Solid	83.4773	5.2579	< 2e-16 **
Organic	7.397	5.2579	0.160
Calcareous soil	-45.2445	3.7179	< 2e-16 **
Weeks	-3.1489	1.9876	0.114
Weeks <sup>2</sup>	0.3339	0.1289	0.010 *
<b>Calcium</b>			
Steiner	267.0032	34.8054	1.95e-13 **
Solid	567.6242	34.8054	< 2e-16 **
Organic	45.4315	34.8054	0.192702
Calcareous soil	-295.5239	24.6111	< 2e-16 **
Weeks	-48.2493	13.1576	0.000286 **
Weeks <sup>2</sup>	3.7295	0.8532	1.66e-05 **
<b>Sodium</b>			

Steiner	23.96214	2.60988	< 2e-16 **
Solid	29.55917	2.60988	< 2e-16 **
Organic	27.32929	2.60988	< 2e-16 **
Calcareous soil	8.59827	1.84546	4.62e-06 **
Weeks	-1.19594	0.98662	0.226
Weeks <sup>2</sup>	0.25367	0.06398	9.01e-05 **

\*\* = significant at  $p \leq 0.01$ ; \* = significant at  $p \leq 0.05$

For the sodium levels in the soil solution, significant differences were found between the treatments ( $p \leq 0.01$ ) and soil types (Table 7), the coefficients obtained by the polynomial model for both the treatments and for the calcareous soil were positive, which means that all treatments contributed to increase sodium levels in the soil solution by a general average of  $26.9 \text{ mg L}^{-1}$ . It was observed that the sodium concentration was higher in calcareous soil at an average of  $8.5 \text{ mg L}^{-1}$  compared to the forest soil.

The significant effects found by the polynomial model of quadratic order indicate the existence of a relationship between the predictor variables and the predictor (Table 7). Within the dynamics of the cations, a dynamics was found to increase similarly but in different intensity for all treatments except for the treatment with the application of solid fertilizer, observing that its behavior departs from the general pattern (Figure 4).



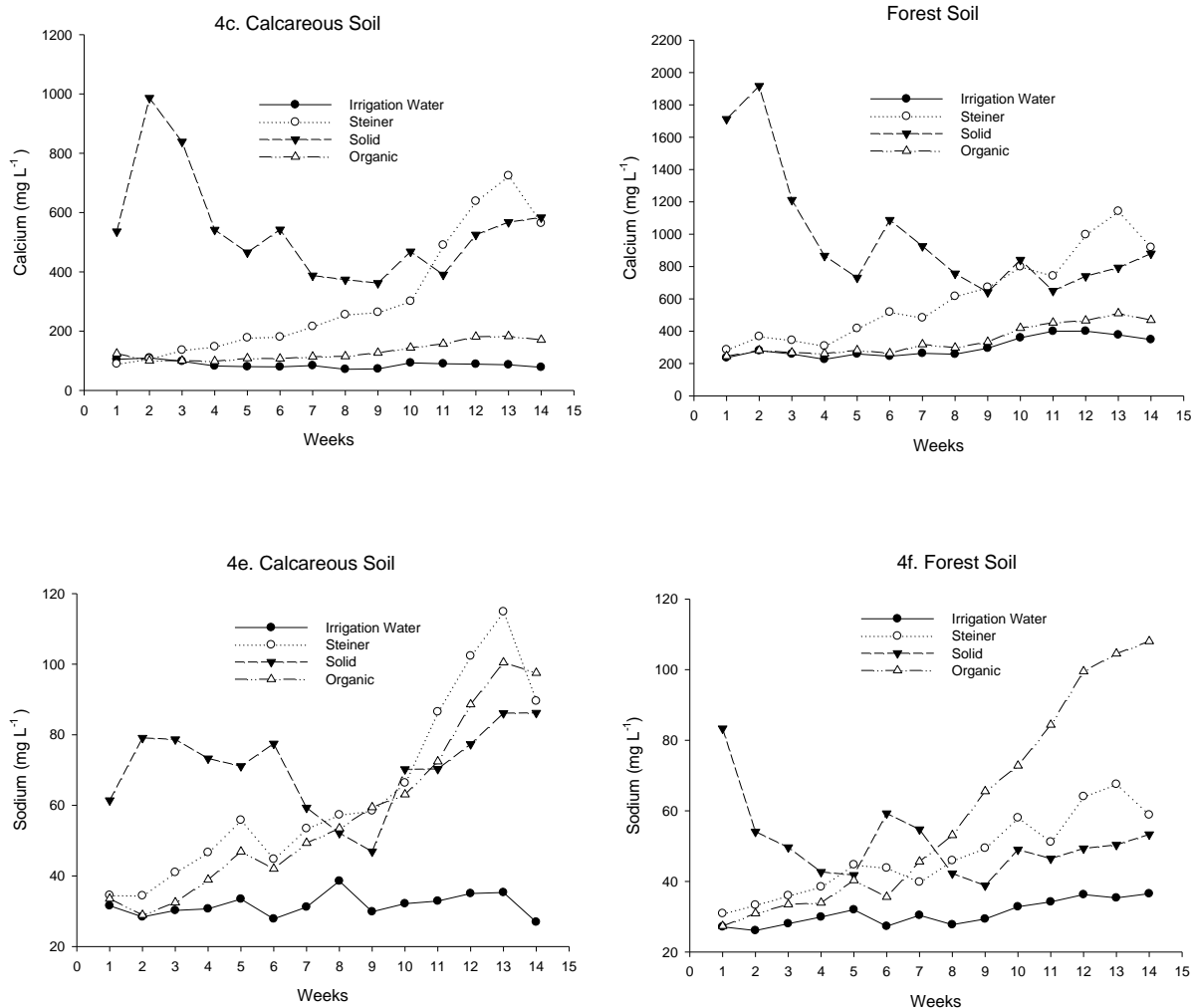


Figure 4. Potassium, calcium, and sodium dynamics, determined in soil solution samples for a calcareous and forest soil, under pot and greenhouse conditions, under different nutrient supply scenarios, using inorganic fertilizers: nutrient solution (Steiner) and fertilizers in fractional (solid) form and an organic fertilizer with vermicompost tea (aqueous extract).

### 3.3.2. Multiple polynomial models of third order with three predictive variables for electrical conductivity, nitrates, sulfur, and zinc

Table 8 shows the results of the polynomial models for the response variables: electrical conductivity, nitrates, sulfur, and zinc and categorical predictive variables: treatments

(irrigation water, Steiner, solid and organic), soil types (calcareous and forest), and the numerical predictive variable (time in weeks) of cubic degree.

For the response variables such as electrical conductivity and sulfur, significant differences were found between treatments and soil types ( $p \leq 0.01$ ) (Table 8), which indicates the existence of a relationship between the predictor variables and the predictor. The coefficients obtained in the polynomial model for the different treatments showed positive trends, and it was found that the treatment by the application of solid fertilizers showed the highest levels of electrical conductivity in the soil solution, exceeding the control in an average of  $2.9 \text{ dS cm}^{-1}$ . On the other hand, the concentration of sulfur was favored mainly by the application of the organic treatment. Comparing the levels of electrical conductivity and sulfur among soil types, lower levels were observed in the calcareous soil, as can be seen in the negative coefficients obtained by the polynomial model (Table 8). For the average weekly data of the electrical conductivity it was observed that within its dynamics, treatments (irrigation water and organic) were very similar over time, while treatments with inorganic fertilizer showed a decoupling, moving in opposite directions (Figure 5a and 5b). Peaks of increase in the EC dynamics were observed for the treatment with solid fertilizers, which coincide with the dates of application of the same (Figure 5a and 5b).

For the response variable nitrates, significant differences were found between the control treatment and the treatments by the application of inorganic fertilizers ( $p \leq 0.01$ ), while the organic treatment did not induce changes in the soil solution. However, in spite of not having significant effects of organic treatment,  $\text{NO}_3^-$  levels in the soil solution were lower compared to the control evaluated for the forest soil, whereas in calcareous soil its behavior was very similar (Figure 5c and 5d). The nitrate dynamics for inorganic treatments showed opposite patterns, while Steiner solution treatment was ascending, treatment with solid application decreased (Figure 5c and 5d). Comparing soil types (calcareous and forest) were found to be statistically different. Fertilizer treatment in solid form showed the highest positive coefficient (Table 8), which refers to the fact that the treatment was the most effective to maintain a high concentration of nitrate in the soil solution; when comparing soil types, the coefficient obtained by the polynomial model



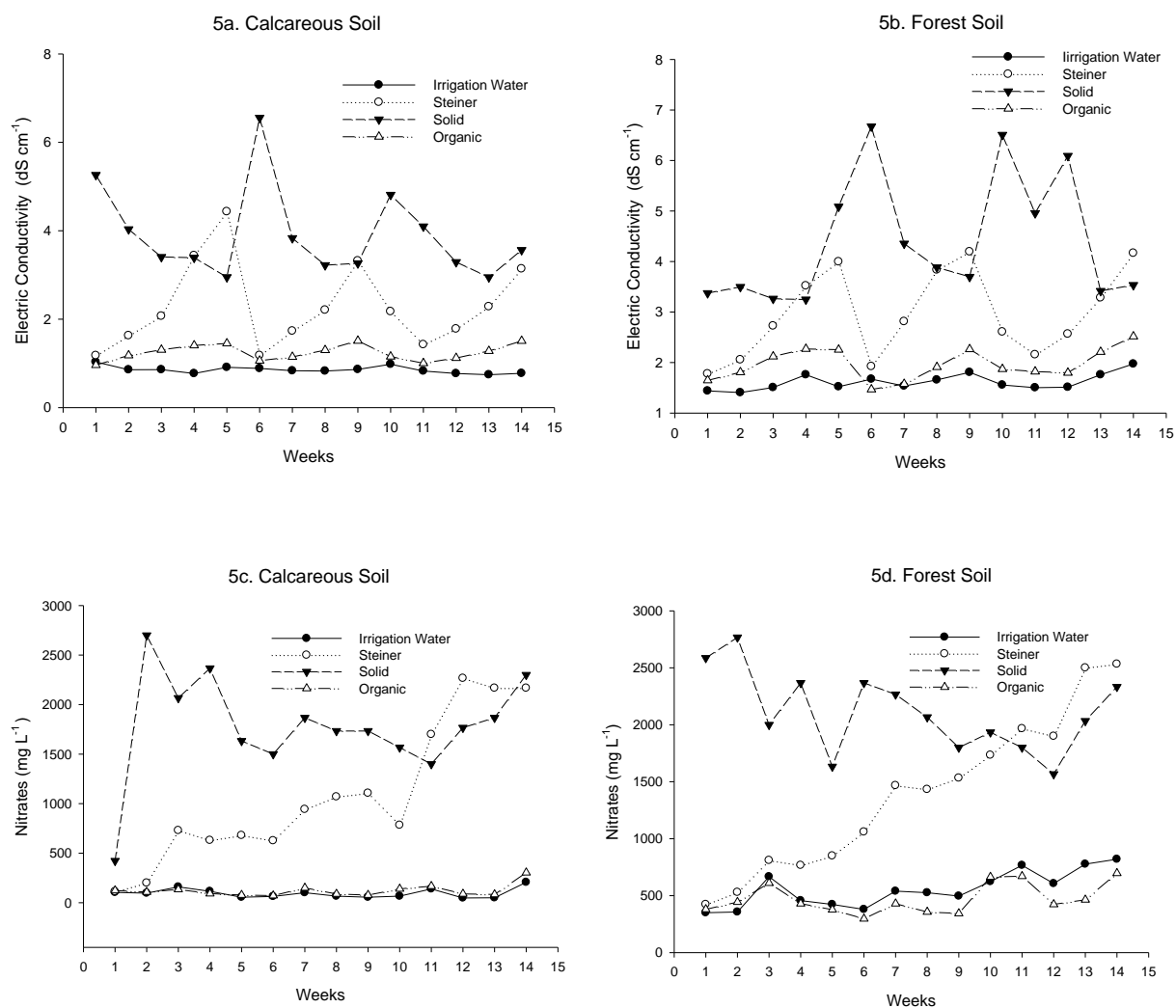
(Table 8) indicated that the calcareous soil presented average nitrate levels of  $361.7 \text{ mg L}^{-1}$  below the forest soil.

Table 8. Multiple polynomial model between: electrical conductivity, nitrates, sulfur, zinc and three variables: two explanatory (treatment and soil type) and one numerical variable (weeks) of cubic degree. The reference treatment for the comparison of the different nutrient contribution scenarios was irrigation water; while the forest soil was used as a reference to compare it against the calcareous soil.

Variables	coefficient	Std. error	P-value
Electric Conductivity			
Steiner	1.395000	0.142609	< 2e-16 **
Solid	2.916071	0.142609	< 2e-16 **
Organic	0.369881	0.142609	0.00992 **
Calcareous soil	-0.667857	0.100840	1.44e-10 **
Weeks	0.377170	0.150824	0.01288 *
Weeks <sup>2</sup>	-0.047783	0.022955	0.03815 *
Weeks <sup>3</sup>	0.001814	0.001008	0.07286
Nitrates			
Steiner	913.0952	65.9477	< 2e-16 **
Solid	1618.5714	65.9477	< 2e-16 **
Organic	-29.9286	65.9477	0.65026
Calcareous soil	-361.7500	46.6321	1.11e-13 **
Weeks	153.7308	69.7468	0.02821 *
Weeks <sup>2</sup>	-23.4050	10.6151	0.02816 *
Weeks <sup>3</sup>	1.2104	0.4663	0.00986 **
Sulfur			
Steiner	13.04131	4.13602	0.001765 **
Solid	13.38048	4.13602	0.001340 **
Organic	24.95929	4.13602	4.30e-09 **
Calcareous soil	-18.24827	2.92461	1.35e-09 **
Weeks	-13.89950	4.37429	0.001627 **
Weeks <sup>2</sup>	2.21597	0.66574	0.000972 **
Weeks <sup>3</sup>	-0.08965	0.02924	0.002351 **
Zinc			
Steiner	0.0764286	0.0566417	0.17816
Solid	0.4747619	0.0566417	1.55e-15 **
Organic	-0.0027976	0.0566417	0.96064
Calcareous soil	-0.2030655	0.0400517	6.66e-07 **
Weeks	0.1781132	0.0599047	0.00316 **
Weeks <sup>2</sup>	-0.0294383	0.0091172	0.00137 **
Weeks <sup>3</sup>	0.0012264	0.0004005	0.00238 **

\*\* = significant at  $p \leq 0.01$ ; \* = significant at  $p \leq 0.05$

The treatments did not show significant effects on the zinc content in the soil solution except for the treatment where fertilizers were applied in solid form ( $p \leq 0.01$ ), exceeding the control treatment according to the coefficient obtained in an average of  $0.47 \text{ mg L}^{-1}$  (Table 8). Zn increases due to the effect of solid fertilizer occurred in the first half of the study, showing a similar pattern in their dynamics for both types of soil (Figure 5g and 5h). Significant differences were found between the soil types and, according to their negative coefficient recorded by the calcareous soil (Table 8), it was deduced the greater Zn availability in the black forest soil solution.



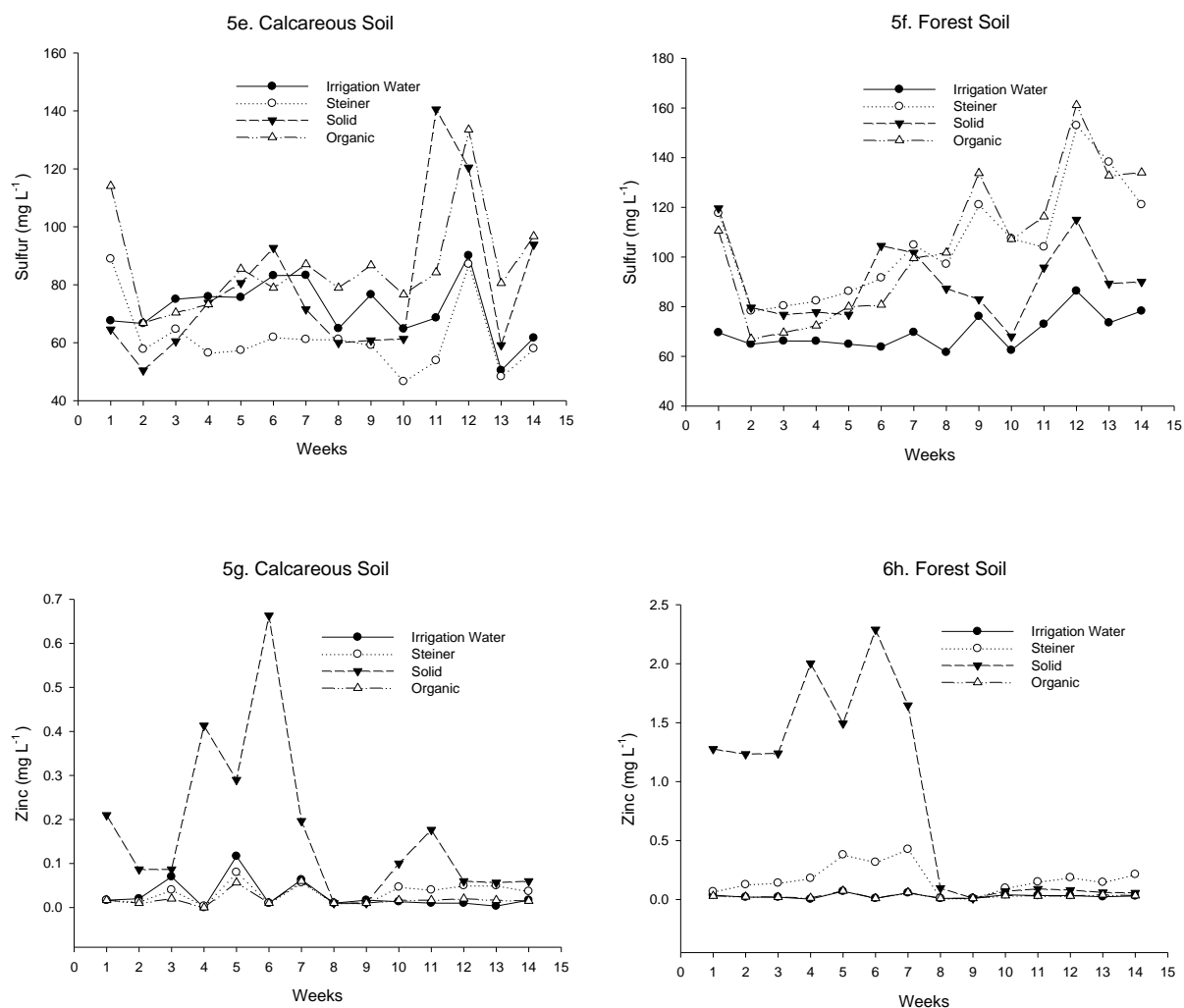


Figure 5. Dynamics of electrical conductivity, nitrates, sulfur and zinc, determined in samples of soil solution for a calcareous and forest soil, under pot and greenhouse conditions, under different nutrient supply scenarios, using fertilizers Inorganic: nutrient solution (Steiner) and fertilizers in fractional form (solid) and an organic fertilizer with vermicompost tea (aqueous extract).

### 3.3.3. Multiple polynomial models of fourth order with three predictive variables for the oxide-reduction potential, nitrogen, magnesium, and boron

For these last four response variables, the multiple polynomial model that was best adjusted according to the cross-validation error coefficient (Table 5) was that which

included the two categorical variables (treatment and soil type) and the numerical variable in the quartic degree.

For the response variables: reduction potential and magnesium, the results of the multiple polynomial models are shown in Table 9, with significant differences between the inorganic and organic treatments when compared to the control treatment, as well as between soil types (Calcareous and forest). The coefficients obtained through the multiple polynomial model indicate that for both ORP and  $Mg^{2+}$  the treatment with the greatest impact on the mentioned variables was the application of fertilizers in solid form, surpassing the control in an average value of 19.53 mV and 130 mg L<sup>-1</sup> respectively, whereas when comparing soil types, the soil of calcareous origin surpassed forest soil at ORP levels and  $Mg^{2+}$  concentration according to the coefficients of the model (Table 9). The ORP dynamics for both types of soil showed a temporal pattern with fluctuations over time (Figure 6a and 6b) with oscillations of 160 to 260 mV. On the other hand, the  $Mg^{2+}$  exhibited a trend towards increasing the two types of soil for all treatments except for the treatment with solid fertilizer application, observing that its behavior departs from the general pattern (Figure 6e and 6f).

Table 9. Multiple linear model between the potential oxidation reduction, nitrogen, boron, and three variables: two explanatory (treatment and soil type) and one numerical variable (weeks) of quartic degree. The reference treatment for the comparison of the different nutrient contribution scenarios was irrigation water; while the forest soil was used as a reference to compare it against the calcareous soil.

Variables	coefficient	Std. error	P-value
Oxidation-reduction potential			
Steiner	12.520238	3.831539	0.001200 **
Solid	19.535714	3.831539	5.80e-07 **
Organic	8.607143	3.831539	0.025346 *
Calcareous soil	6.620833	2.709308	0.015064 *
Weeks	41.980100	9.494133	1.33e-05 **
Weeks <sup>2</sup>	-10.093597	2.454188	4.95e-05 **
Weeks <sup>3</sup>	0.925696	0.241927	0.000156 **
Weeks <sup>4</sup>	-0.028663	0.008014	0.000400 **
Nitrogen			
Steiner	-5.57000	5.56991	0.318042
Solid	-1.50262	5.56991	0.787504
Organic	0.79643	5.56991	0.886388

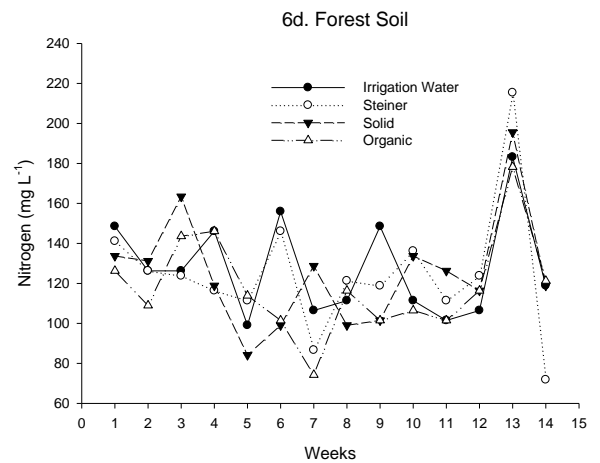
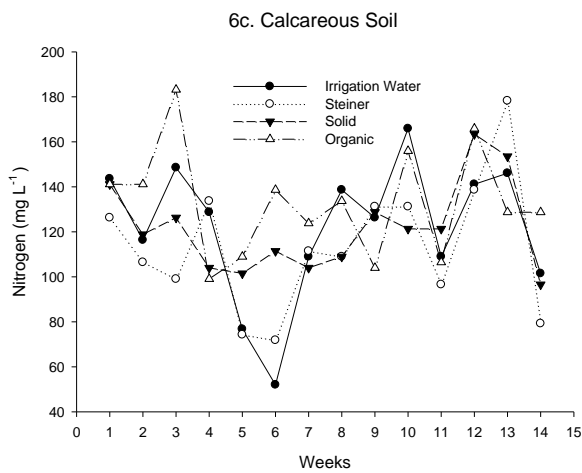
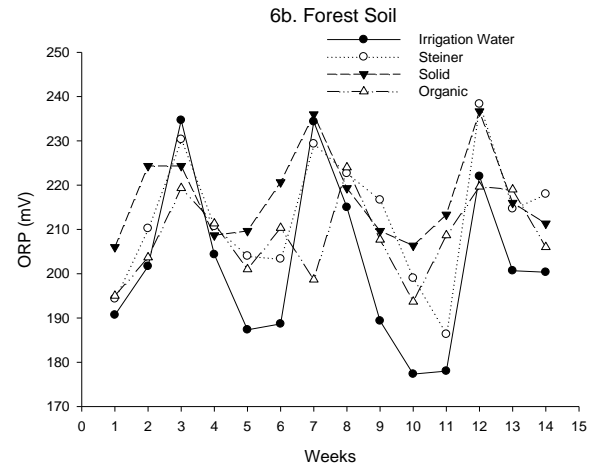
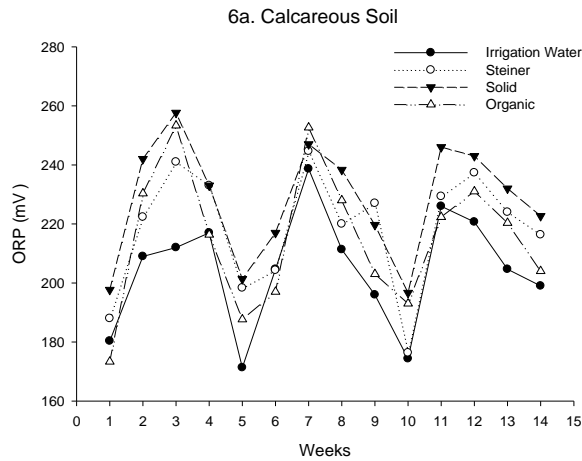
Calcareous soil	-1.72417	3.93852	0.661842
Weeks	22.17789	13.80163	0.109041
Weeks <sup>2</sup>	-9.54002	3.56766	0.007871 **
Weeks <sup>3</sup>	1.16756	0.35169	0.001002 **
Weeks <sup>4</sup>	-0.04282	0.01165	0.000277 **
		Magnesium	
Steiner	60.67560	8.75297	2.22e-11 **
Solid	130.17726	8.75297	< 2e-16 **
Organic	17.89310	8.75297	0.0417 *
Calcareous soil	65.49940	6.18929	< 2e-16 **
Weeks	37.33322	21.68890	0.0861
Weeks <sup>2</sup>	-11.57603	5.60648	0.0397 *
Weeks <sup>3</sup>	1.17324	0.55267	0.0345 *
Weeks <sup>4</sup>	-0.03737	0.01831	0.0420 *
		Boron	
Steiner	-0.0594881	0.1044116	0.569
Solid	0.0957619	0.1044116	0.360
Organic	-0.0295017	0.1044116	0.778
Calcareous soil	0.3802925	0.0738301	4.49e-07 **
Weeks	1.5860830	0.2587204	2.52e-09 **
Weeks <sup>2</sup>	-0.4885648	0.0668780	2.13e-12 **
Weeks <sup>3</sup>	0.0528210	0.0065926	2.01e-14 **
Weeks <sup>4</sup>	-0.0018441	0.0002184	1.01e-15 **

\*\* = significant at  $p \leq 0.01$ ; \* = significant at  $p \leq 0.05$

The application of the different fertilization scenarios (organic and inorganic) did not show significant effects on the nitrogen and boron content in the soil solution (Table 9). However, in the case of nitrogen, a slight decrease was observed in treatments with inorganic fertilizers. As for boron, negative coefficients were observed for the treatment with Steiner solution and organic treatment, which indicates that the concentration of boron for these two treatments was below the control treatment (Table 9). When comparing the calcareous soil against the forest soil, the presence of statistical significance was only found for the boron response variable in the soil solution and based on the coefficient obtained for the calcareous soil in the multiple polynomial analysis, the calcareous soil was higher in an average concentration of 0.38 mg L<sup>-1</sup> of boron to the forest soil.

The dynamics of nitrogen showed variations over time without showing a recognizable pattern in its behavior (6c and 6d), while the dynamic behavior of boron fluctuated over time, and a very similar pattern was observed between the two types of soil, Where a drop in their levels can be noted in the intermediate stage of the experiment (Figure 6g and 6h).

The presence of significant effects on the response variables through the polynomial models of quadratic degree is a sign of the existence of the relationship between the predictors and the predictor.



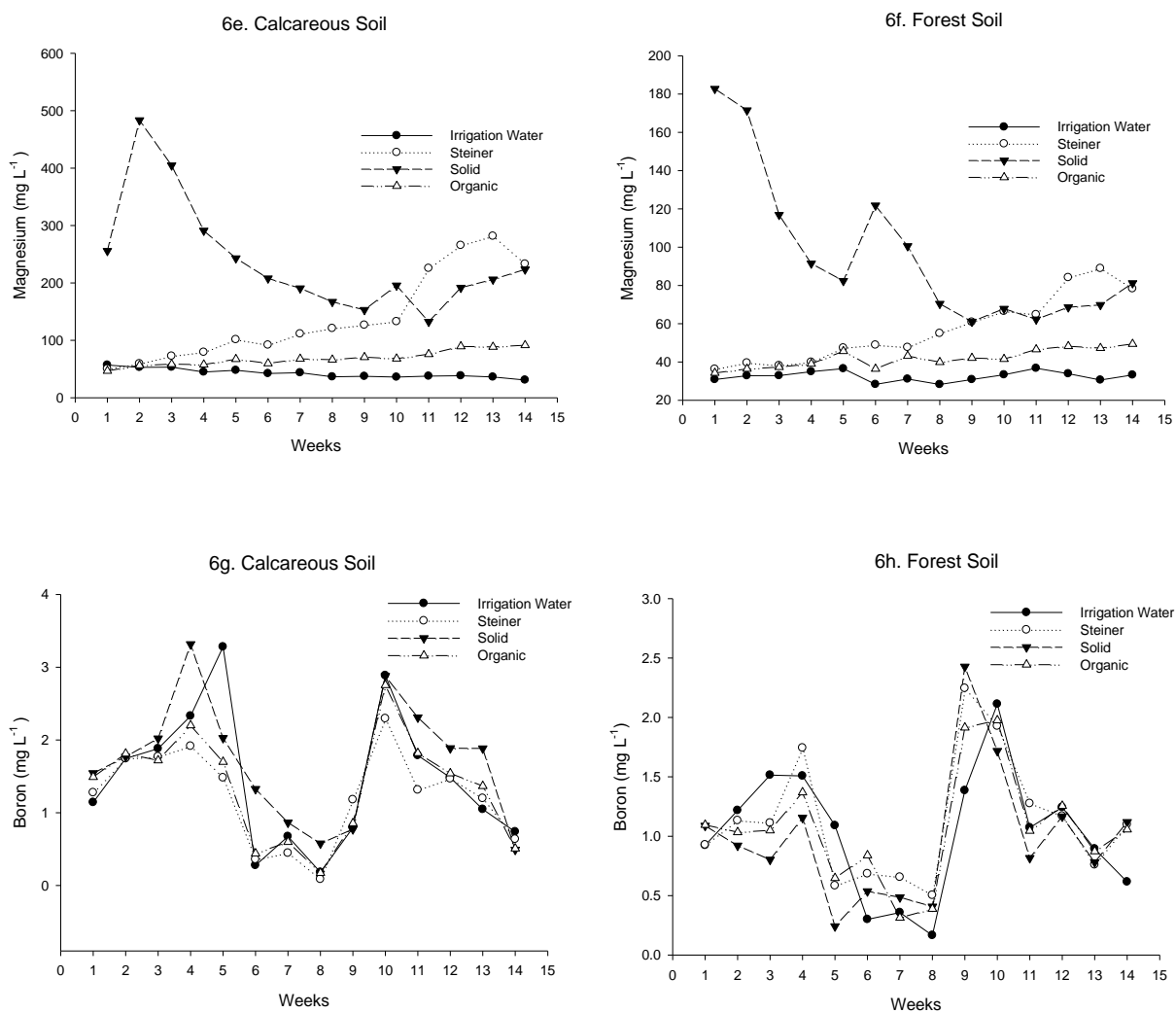


Figure 6. Dynamics of the oxide reduction potential (ORP), total nitrogen, magnesium and boron, determined in soil solution samples for a calcareous and forest soil, under pot and greenhouse conditions, submitted to different contribution scenarios Of nutrients, through inorganic fertilizers: nutrient solution (Steiner) and fertilizers in fractional form (solid) and an organic fertilizer with vermicompost tea (aquous extract).

#### 4. Discussion

The application of the different types of fertilization in the calcareous soil and the black forest soil showed different effects on the concentration of the elements in the soil

solution. The treatments of application of inorganic fertilizers showed superiority in the content of the various variables measured in the solution of the soil in comparison with the rest of the treatments, with the exception of the sulfur. The treatment with the application of fertilizer in solid form showed the highest concentration of ions, followed by the treatment with the application of the Steiner nutrient solution and finally the organic treatment with vermicompost tea. It should be mentioned that the organic treatment did not show significant effects on the concentrations of the different ions measured in the soil solution with the exception of sulfur, sodium, and manganese.

From an agricultural point of view, the application of nutrient solutions presents dosage advantages, greater efficiency, and localized applications, but despite this, the treatment with the application of solid fertilizers, showed higher levels of dissolved ions in the soils (calcareous and forest), possibly due to the nutrient supply in a controlled way over time, although the fertilizers used were water soluble and not slow release.

Water in soil pores is intimately linked to the physical and chemical properties of the solid phase, and their impact on the volume of water and the presence of elements in the soil solution will depend on the amount of water applied to the soil (Nielsen *et al.*, 1972), either as irrigation water or nutrient solutions: organic and inorganic. Soil solution, according to the results obtained for the treatments control, Steiner, and organic, presented very similar patterns in their dynamics with tendencies toward the increase as time progressed, a different situation to that presented the treatment in solid form, where their dynamics showed patterns that deviate from the general behavior of other treatments.

Solid fertilization is not homogeneous but it is rather placed at specific points for later dissolution, being a point source of chemical elements, causing that in certain points where the fertilizer was applied there are large variations in the EC and the concentration of ions (Sposito *et al.*, 1981). Once the irrigation water comes in contact with the solid fertilizers, the heterogeneity their distribution will create very large concentration temporalis gradients, as presented for the case of  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $NO_3^-$  and Zn.



#### 4.1. pH, oxide-reduction potential and electrical conductivity in soil solution

The pH was lower in soil solution for the treatment with solid fertilizer application. The decrease in pH was possibly a key factor in the availability of elements such as  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ , and Zn, with their higher concentrations for the treatment mentioned. Probably the main factor that led to the decrease in pH was the application of sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) and citric acid for acidification of irrigation water, this phenomenon was clearly observed in calcareous soil for all treatment; a contrary situation was found in the forest soil for organic treatment, where the effect of citric acid on the soil solution was not reflected. This may be related to the greater buffering power of the soil associated with both organic matter present in the soil and for which it is being contributed by vermicompost tea (Durán-Umaña and Henríquez-Henríquez, 2010), thus neutralizing the acidifying power of citric acid and causing the pH to increase due to the effect of organic treatment. In general terms when comparing soil types, the pH of the forest soil presented less variation in its dynamics when compared to the calcareous soil, it is possible that the lower variability depended on the organic matter content, which increased the soil buffer power and allowed to maintain the values of the pH within ranges shorter than those shown by the calcareous soil (Navarro and Navarro, 2003)

The oxide-reduction potential showed an inverse pattern in its behavior compared to pH. This behavior is characteristic of the redox reactions that originate in the soil where the oxidative processes produce  $H^+$  and cause acidification and the reductive processes consume  $H^+$  and raise the pH (Gaiser and Stahr, 2013). The treatment with solid fertilizers was the one that presented higher values of ORP, being able to be interpreted as an increase in the level of oxidation of the soil solution; treatment with Steiner solution resulted in lower ORP values and, finally, organic treatment resulted in lower (reduced) values for ORP. However, when comparing the soil types, no adjustment was observed to the expected relationship, since the calcareous soil presented higher values of pH and ORP and in the forest soil, it was the opposite. One possible explanation is that ORP values can vary widely at the same pH value depending on the profile of oxidizing compounds present (James, 2004). Another possibility is that the response of pH and ORP in the case

of forest soil could be associated with the presence of organic matter and organic compounds as sugars or other organic substances soluble in the soil solution, which give reductive power to the environment (Gaiser and Stahr, 2013). ORP often varies a lot in short times, as it was for all treatments, this variation is due to the heterogeneity of soils and by microsites with different concentration of O<sub>2</sub> resulting from different sizes of soil pores, the content of water and microbial metabolism (Marschner, 2012). It has been reported that the temporal variability of the redox potential at a single point in the soil can vary by 1000 mV or more if the soil is periodically saturated or flooded and by periodic drainage as the system changes from aerobic to anaerobic and vice versa (Vepraskas *et al.* (2001), a situation presented for the calcareous soil which presented a higher bulk density and therefore a lower porosity and lower drainage (Table 1). For the case of forest soil, variability would be associated with the greater amount of organic matter and the microbial metabolism associated with it (Crozier and Devai, 1995; Parkin, 1987).

The EC increase in soil solution was the final result of inorganic fertilizers, especially the treatment where fertilizers were added in solid form, which contributed to the increase of Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Na<sup>+</sup>, the cations generally associated with the increase of EC (Charley and McGarity, 1964; Mengel *et al.*, 2001). The high EC levels of up to 7 dS cm<sup>-1</sup> exhibited by the treatment in solid form could not be considered adequate since they could decrease the water availability to the plants (Sonneveld and Voogt, 2009), in nutrient solutions it has been observed that the majority of crop plant species are negatively affected to EC > 4 dS cm<sup>-1</sup> (Jones, 2012). However, the effects of salinity in soils also depend on soil texture, water content, and salt composition (Marschner, 2012). It is worth mentioning that EC in forest soil was superior, possibly due to the action of the organic matter that acts by retaining and releasing ions, modifying physical properties associated with soil water retention and possibly preventing leaching (Akinrinde, 2004).

#### **4.2. Concentration of the different ions in the soil solution**

The concentration of ions in the soil solution was favored by the application of inorganic fertilizers, to a greater extent by treatment with the application of solid fertilizers. Similar results were found by Kuchenbuch and Jungk (1984) where they evaluated the

exchangeable K content by finding higher levels in fertilized soils when compared to unfertilized and depleted soils (with previous intensive crops). The increases of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Zn, and  $\text{K}^+$  in the soil solution were higher for black forest soil in conjunction with solid fertilizers. The direct effect on the availability of these elements could be given by the water content in the soil, which is a limiting factor in the availability and supply of nutrients (Marschner, 2012), highlighting that the forest soil has a higher bulk density (expected greater porosity) and a greater capacity of retention of humidity. Similarly, high levels of organic matter could increase the availability of nutrients (Pankhurst *et al.*, 2002). The  $\text{K}^+$  concentration in forest soil solution compared to the calcareous soil was higher in all treatments, probably due to the moderately high levels of this  $\text{K}^+$  in the solid phase of the soil. The results indicated a significant increase of  $\text{NO}_3^-$  in soil solution by the effect of the fertilizers. It was observed that the application of irrigation water and vermicompost tea increased the concentration of  $\text{NO}_3^-$  in the solution of the forest soil compared to that of the calcareous soil, possibly due to the mineralization processes of organic matter present in the forest soil, where normally more than 90% of organic nitrogen is found (Mengel *et al.*, 2001). The decomposition of organic nitrogen that eventually leads to nitrate formation is associated with the production of a strong acid (nitric acid) (Mengel *et al.*, 2001), probably involved in the lower pH values found in the soil solution of the forest soil. Although there were differences in the  $\text{NO}_3^-$  content in the soil solution due to the treatments, it would be expected to find the same behavior for the total nitrogen content, which did not occur. The non-existence of these differences could be due to the presence of other forms of nitrogen in the soil solution such as organic compounds of low molecular weight and  $\text{NH}_4^+$ , but still, a slight increase of this nitrogen was observed to the application of the tea of vermicompost. It has been reported that the application of liquid manure may lead to a transient increase of soluble  $\text{NH}_4^+$  (Barekzai *et al.*, 1988).

The pH influenced the availability of elements, as is the case of  $\text{Ca}^{2+}$  that is positively related to high pH values (Borges *et al.*, 2012). The reduction of pH, as well as the redox potential would be the probable causes by which the availability of Zn is increased for the black forest soil (Herms and Brummer, 1980; Miao *et al.*, 2006; Sanders, 1983; Sims and Patrick, 1978) compared to calcareous soil. The concentration of Zn in the soil solution is determined by the adsorption and desorption processes that occur in the soil matrix,

therefore the concentration not only of the Zn but several elements at a given pH of the soil can also depend on other components of the solute as well as the organic matter content of the soil and the microbial activity (Srivastava and Sethi, 1981). The presence of organic matter in forest soil could influence the content of low molecular weight organic substances acting as chelates for Zn and  $\text{Ca}^{2+}$  (Hodgson and Lindsay, 1966; Mengel *et al.*, 2001; Sanders 1983). The low concentration of Zn in calcareous soil was probably due to the slow diffusion of the element, with diffusion coefficients 50-fold lower in soils with high pH compared to low pH soils (Melton and Mahtab, 1973). In alkaline soils, Zn complexes with  $\text{CaCO}_3$  (Storey *et al.*, 1970), these reactions as well as associations with oxides through adsorption, strongly bind Zn and regulate the amount of Zn in the soil solution (Shuman 1991; Jenny 1968). The levels of the  $\text{Ca}^{2+}$  present in the soil solution were adequate for all treatments and soil types if we take as reference the concentration that contains a nutrient solution for the development of crops, these levels in the soil solution are explained by the high  $\text{Ca}^{2+}$  content naturally present in soils and irrigation water. The concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  was even more favored by fertilizers applications, to a greater extent by fertilizers in solid form.

When comparing soil types, black forest soil was higher in  $\text{Ca}^{2+}$  concentration to calcareous soil. It is known that the availability of calcium in calcareous soil is due to the reactions of calcium carbonates with  $\text{CO}_2$  forming  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  that is more soluble in water (Doner and Lynn, 1989), releasing  $\text{Ca}^{2+}$  to the liquid phase, These reactions to some extent may explain why the presence of organic matter in the forest soil favored the availability of  $\text{Ca}^{2+}$  (Mengel *et al.*, 2001).

The increase of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in the soil solution is attributed to the contribution of the fertilizer in solid form, being clearer the effect on the calcareous soil, this can be explained by the high levels of  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Na}^+$  interchangeable in the soil. The lower availability of  $\text{Mg}^{2+}$  in forest soil was possibly due to the presence of high concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{K}^+$  in said soil, as well as in some cases by  $\text{NH}_4^+$  (Grimme, 1983). The lower porosity presented in the calcareous soil could have influenced the greater presence of B, due to the difficulty in its drainage which caused the accumulation of this element (Keren and Bingham, 1985), based on this fact, it is more probable that the solubility of the B decrease, but its concentration can be compensated for by the lower leaching mentioned

above and/or by the supply of B in the irrigation water (Marschner, 2012). Although the forest soil presented more organic matter content, which is closely associated with the accumulation and availability of B in the soil, possibly the power of fixing this element by the organic content could increase over time decreasing its concentration in the soil solution (Gupta, 1968).

The increase of S in the soil solution is attributed to the presence of organic matter present in the forest soil and the incorporation of the S-rich vermicompost tea treatment (Table 4). Similarly, the S in the soil solution is the result of the decomposition processes of the organic matter by the microorganisms, which release sulfates, contributing to increasing the levels of this element in the soil solution (Mengel *et al.*, 2001).

## **5. Conclusions**

It was found that the model that best predicts pH behavior in soil solution was the multiple linear model using categorical variables (treatments and types of soil). The multiple polynomial models were best adjusted for the variables potassium, calcium, sodium (quadratic grade), electrical conductivity, nitrates, sulfur (cubic degree), zinc, oxidation-reduction potential, nitrogen, magnesium, and boron (quartic grade).

It was identified that the treatment with application of solid fertilizers increased the concentration of ions in the soil solution for both types of soil; however, the treatment with Steiner application showed an adequate levels of ions in the solution of both soils and with less dynamic variation, presenting a higher availability of ions in the forest soil.

Unique temporal patterns were found for the dynamics of treatment behavior through the application of solid fertilizers.

## **References**

- Akinrinde, Ezekiel. A. 2004. Soils: Nature, Fertility Conservation and Management. Agronomy Department, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria. 113 p.
- Arlot, S., & Celisse, A. 2010. A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics surveys*, 4, 40-79.

- Asher, C. J. (1978). Natural and synthetic culture media for Spermatophytes. CRC Handb. Ser. Nutr. Food, Sect. G 3, 575–609.
- Borges, J. A., Barrios, M., Sandoval, E., Bastardo, Y., & Márquez, O. 2012. Características físicoquímicas del suelo y su asociación con macroelementos en áreas destinadas a pastoreo en el estado Yaracuy. *Bioagro*, 24(2), 121-126.
- Carballo, T., Gil M. V., Calvo, L. F., Morán, A. 2009. The influence of aeration system, temperature and compost origin on the phytotoxicity of compost tea. *Compost Sci. Utiliz.* 17: 127-139
- Charley, J. L. and McGarity, J. L. 1964. High soil nitrate-levels in patterned saltbush communities. *Nature* 201:1351 -1352
- Crozier, C. R., I. Devai, and R. D. De Laune. 1995. Methane and reduced sulfur gas production by fresh and dried wetland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*59: 277–284.
- Donner, H. E. and Lynn, W.C. 1989. Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals. In: Kissel, D. E., Madison (Eds). *Minerals in Soil Environments*. Wisconsin: Soil Sci. Soc. of America, p. 279-330.
- Durán-Umaña, L., & Henríquez-Henríquez, C. 2010. El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta en planta. *Agronomía mesoamericana*, 21(1), 85-93.
- Fick K.R., Miller S.M., Funk J.D., McDowell L.R. y Houser R.H. 1976. *Methods of mineral analysis for plant and animal tissues*. University of Florida Institute of Food and Agriculture. Gainesville, FL. 81 p.
- Gaiser, T., & Stahr, K. 2013. Soil Organic Carbon, Soil Formation and Soil Fertility. In: Rattan Lal, Klaus Lorenz, Reinhard F. Hüttl, Bernd Uwe Schneider, Joachim von Braun (eds). *Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere* (pp. 407-418). Springer Netherlands.
- Genú, A. M., & Demattê, J. A. M. 2011. Prediction of soil chemical attributes using optical remote sensing. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 33(4), 723-727.
- Grimme. H. 1983. Aluminium induced magnesium deficiency in oats. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 146(5), 666-676.
- Gupta, U.C. 1968. Relationship of total and hot-water soluble boron, and fixation of added boron, to properties of podzol soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:45–48.

- Herms, U. and Brümmer, G. 1980. Einfluß der Bodenreaktion auf Löslichkeit und tolerierbare Gesamtgehalte an Nickel, Kupfer, Zink, Cadmium und Blei in Böden und kompostierten Siedlungsabfällen. *Landwirtsch, Forsch.* 33, 408–423.
- Hernández Díaz, M. I., 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(2), 79-88.
- Hillel, Daniel. 2013. *Fundamentals of soil physics*. Academic press. 407 p.
- Hodgson, J. F., Lindsay, W. L. and Trierweiler, J. T. 1966. Micronutrient cation complexing in soil solution. II. Complexing of zinc and copper in displaced solution from calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30, 723–726.
- James, C.N., Copeland, R.C. and Lytle, D.A. (2004). Relationship between oxidation-reduction potential, oxidant and pH in drinking water. *Water Quality Technology Conference, American Water Works Association, San Antonio, TX, November: 14-18*
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. 2013. *An introduction to statistical learning* (Vol. 6). New York: springer. 426 p.
- Jenny, E. A. 1968. Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water: The significance role of hydrous Mn and Fe oxides. *Adv.Chem.*73:377–387.
- Jones Jr, J. B. 2012. *Plant nutrition and soil fertility manual*. CRC press. Boca Raton. 271 p.
- Keren , R. and Bingham ,F.T. 1985. Boron in water, soils and plants. In: [B. A. Stewart](#). *Advances in soil science* . 1:229-276.
- Kuchenbuch, R. and Jungk, A. 1984. Wirkung der Kaliumdüngung auf die Kaliumverfügbarkeit in der Rhizosphäre von Raps. *Z. Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 147(3), 435-448.
- Li, F., Shan, X., Zhang, T., & Zhang, S. 1998. Evaluation of plant availability of rare earth elements in soils by chemical fractionation and multiple regression analysis. *Environmental Pollution*, 102(2), 269-277

- Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Third Edition. ELSEVIER. Londres, Inglaterra. 651 p.
- Melton, J. R., Mahtab, S. K. and Swoboda, A. R. 1973. Diffusion of zinc in soils as a function of applied zinc, phosphorus and soil pH. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37, 379–381.
- Mengel, K. and Kirkby, E. A. 2001. Principles of Plant Nutrition (5th Edition). Springer. Dordrecht, The Netherlands. 807 p
- Miao, S. Y., DeLaune, R. D. and Jugsujinda, A. 2006. Influence of sediment redox conditions on release/solubility of metals and nutrients in a Louisiana Mississippi River deltaic plain freshwater lake. Sci. Total Environ. 371, 334–343.
- Muller, L. 1961. Un aparato micro-Kjeldahl simple para análisis rutinarios de materiales vegetales. Turrialba 11:17-25.
- Navarro-Blaya, S., y Navarro-García, G. 2003. Química Agrícola. 2 edición. Mundiprensa. Barcelona, España. 479 pp.
- Nielsen, D. R., Jackson, R. D., Cary, J. W. and Evans, D. D. 1972 . Soil Water. American Society of Agronomy, Madison, Wisc. 175 pp
- 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, vol. 14, p. 17.
- Oliva-Llaven, M. A., Rodríguez, H. L., Mendoza, N. P., Ruiz, S. B., Álvarez, S. J. D., Dendooven, L. 2010. Optimization of worm-bed leachate for culturing of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) inoculated with *Glomus fasciculatum* and *Pseudomonas fluorescens*. Electron. J. Biotechnol. 13: 1-8
- Pankhurst, C., Kirkby, C., Hawke, B., & Harch, B. 2002. Impact of a change in tillage and crop residue management practice on soil chemical and microbiological properties in a cereal-producing red duplex soil in NSW, Australia. Biology and Fertility of Soils, 35(3), 189-196.
- Parkin, T. B. 1987. Soil microsites as a source of denitrification variability. Soil Sci. Soc. Am. J. 51: 1194–1199.



- Ratsep, R., Nihlgård, B., Bashkin, V. N., & Blazka, P. (1994). Agricultural impacts in the northern temperate zone. *Scope-Scientific Committee on Problems of the Environment International Council of Scientific Unions*, 51, 361-361.
- Sanders, J. R. 1983. The effect of pH on the total and free ionic concentrations of manganese, zinc and cobalt in soil solutions. *J. Soil Sci.* 34, 315–323
- Shuman, L.M. 1991. Chemical forms of micronutrients in soils. In: J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman, R.M. Welch, (eds). *Micronutrients in Agriculture*, 2nd ed. Madison, WI: Soil Science Society of America. pp. 113–144.
- Sims, J. L. and Patrick, W. H., Jr. 1978. The distribution of micronutrient cations in soil under conditions of varying redox potential and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42, 258–262.
- Snakin, V. V., Prisyazhnaya, A. A., & Kovács-Láng, E. 2001. Soil liquid phase composition. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science B.V. 333 p.
- Sonneveld, C. and Voogt, W. 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer. Netherlands Dordrecht. 423 p.
- Sposito, G. 1981. *The thermodynamics of soil solutions*. Oxford University Press. 217 p.
- Srivastava, O. P. and Sethi, B. C. (1981). Contribution of farm yard manure on the build up of available zinc in an aridisol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 12, 355–361.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil.* 15(2):134-154.
- Storey, J.B., Anderson, W. B. 1970. Pecan Zinc Nutrition Research. Texas Agric Expt Station Progress Report. 2710, 1970.
- Van der Ploeg, R. R., & Beese, F. (1977). Model calculations for the extraction of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Science Society of America Journal*, 41(3), 466-470.
- Vepraskas, M. J., Polizzotto M & Faulkner, S. P. 2001. Redox chemistry of hydric soils. In: Vepraskas, M. J & Faulkner (eds). *Wetland soils: Genesis, hydrology, landscapes, and classification*, pp: 105:133.

- Yanai, J., Araki, S., & Kyuma, K. 1995. Effects of plant growth on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize in four Japanese soils. *Soil science and plant nutrition*, 41(2), 195-206.
- 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(6), 1781-1786.
- Yanai, J., Linehan, D. J., Robinson, D., Young, I. M., Hackett, C. A., Kyuma, K., & Kosaki, T. 1996. Effects of inorganic nitrogen application on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize. *Plant and Soil*, 180(1), 1-9.

## **CONCLUSIÓN GENERAL**

El uso de modelos estadísticos multivariados como lo fue el análisis de componentes principales demostró ser una herramienta útil en la descripción de las relaciones existentes entre los diferentes iones de la solución del suelo, obteniéndose comportamientos tanto de forma individual como colectiva.

Se encontró que mediante el uso de modelos lineales y polinomiales múltiples seleccionados por medio de métodos de validación cruzada, se pudo caracterizar la dinámica de los diferentes iones presentes en la solución del suelo, así como identificar los efectos inducidos por la presencia de los diferentes aportes nutrimentales y el tipo de suelo.