

Estudio de la acumulación de metales micronutrientes en suelos sometidos a riego con aguas residuales tratadas

Daisy Isea, Norelis Bello, Luis Vargas, Suher Yabroudi, José Durán y José Delgado

*Centro de Investigación del Agua (C.I.A) de la Universidad del Zulia.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo-Venezuela*

Recibido: 09-12-03 Aceptado: 22-04-04

Resumen

Se estudio los niveles de acumulación de metales micronutrientes presentes en suelos sometidos a riego con aguas residuales tratadas. Los metales micronutrientes: Fe, Cu, Zn, y Mn representan menos del 7% de los nutrientes que constituyen los suelos, y que son requeridos por las plantas para su desarrollo, crecimiento y producción de frutos saludables. Para evaluar el efecto del agua residual tratada en la movilidad de estos metales a través del perfil del suelo, se estableció un proceso de muestreo a diferentes profundidades (15, 30, 45, 60 y 75 cm), recolectándose muestras semanales tanto en campo como en laboratorio durante un periodo de diez (10) semanas. Se realizó la determinación de metales en los diferentes perfiles del suelo por medio de espectrofotometría de absorción atómica. Los resultados indican que las características físico-químicas del agua residual tratada se encuentra dentro de los valores límites permisibles aceptados para las aguas usadas en el riego con fines agropecuarios. Los suelos sometidos a riego con aguas residuales tratadas ofrecen una adecuada movilidad de los metales presentes. Se recomienda el uso de las aguas residuales tratadas con fines agropecuarios como un medio útil para la disposición ecológica de las aguas.

Palabras clave: Agua residual tratada; agua percolada; metales micronutrientes; riego; suelos.

A study of the accumulation of micronutrient metals in soils subject to irrigation with treated residual water

Abstract

The study focused on the accumulation of metals in soils irrigated with treated residual water. The micronutrient metals: Fe, Cu, Zn and Mn represented less than 7% of the nutrients in the soil, and are required by plants for their development, growth and production of healthy fruit. In order to evaluate the effect treated residual water has on the mobility of these metals at different soil depths (15, 30, 45, 60 and 75 cm) samples were collected weekly both in the field and in the laboratory over a period of 10 weeks. Determination of metals in different soil profiles was made by atomic absorption spectro-photometry. The results indicate that the physical-chemical characteristics of treated residual water were well within the limits established for

* Autor para la correspondencia. E-mail: disea@luz.ve

irrigation water and for agricultural use. The soils subjected to irrigation offered adequate mobility for the metals present in the water. The use of treated residual water is recommended for agricultural use as a useful medium for the ecological use of the same.

Key words: Crops; irrigation; micronutrient metals; percolated water; soils; treated residual water.

Introducción

Hoy en día, conscientes de la creciente demanda de agua para diferentes actividades y de la falta de disposición para las aguas residuales de zonas residenciales e industriales; se realizan investigaciones sobre diversas formas de aprovechamiento de las aguas residuales tratadas. La Agencia Americana de Protección Ambiental (EPA) hace referencia a la utilización de agua residual tratada como una herramienta fundamental para regular la demanda de agua potable y la disposición de aguas de desecho en beneficio del ambiente. En Venezuela se ha dado inicio al uso de las aguas residuales tratadas como fuente de suministro para la agricultura; como una medida para disminuir la demanda de agua potable y a su vez la contaminación producida al verter las aguas residuales a los cuerpos de agua. Sin embargo, la salinización de los suelos e incremento en la concentración de metales en los mismos puede ser perjudicial para el desarrollo de los cultivos. En virtud de ello se hace necesario conocer la influencia del riego con aguas residuales tratadas en relación a la acumulación de los metales y en la producción de los cultivos. La Universidad del Zulia a través del Centro de Investigación

del Agua (C.I.A) ha realizado investigaciones sobre el uso potencial del agua residual tratada con fines agrícolas, para lo cual construyó un sistema de Lagunas de Estabilización y una parcela experimental de 5 ha, destinadas a la siembra de frutales y plantas de ciclo corto irrigadas con aguas residuales tratadas por el sistema (1-4).

Descripción del Sistema

Ubicación y características del área

El terreno posee un suelo de horizonte argílico (franco arcillo arenoso) entre los 30 cm y 50 cm de profundidad, con una superficie relativamente plana sin fuertes desniveles. El área es representativa de la planicie de la ciudad de Maracaibo, tiene una topografía plana, pendiente de 0 a 1%, con suelos estratificados, cuyas características se indican en la Tabla 1 (5-8).

Las condiciones climáticas de la zona determinan la presencia de vegetación natural (Cují, tuna, pasto buffer) caracterizándose por un clima semiárido con una precipitación anual de 676 mm y una temperatura promedio de 29°C. La evaporación llega a valores de 5 a 10 mm/día y la velocidad media del viento es de 12,5 Km/h con dirección

Tabla 1
Características de los suelos de la parcela experimental del CIA

Profundidad (cm)	Parámetros			
	Textura	pH	CE (mS/cm)	Infiltración básica (cm/h)
0 – 25	Fa	7,02	0,10	2,0
25 – 50	FAa	7,10	0,15	—

Fa: Franco arenoso. FAa: Franco Arcillo-arenoso. Fuente: A. Trujillo y Otros, "Sistema Experimental de Lagunas de Estabilización de L.U.Z.", III Jornadas de Mantenimiento y Servicios de UNET'99.

noreste, situación que incide de manera positiva en la mezcla del agua en las lagunas.

Sistema de tratamiento

El sistema de tratamiento adoptado es el de Lagunas de Estabilización. El proceso de tratamiento se realiza a través de tres sistemas (A, B y C) mediante la combinación de lagunas facultativa-maduración-maduración (Figura 1). El caudal que procesa cada sistema es de 5 L/s, con tiempos de residencia de 10, 5 y 5 días respectivamente, garantizados por la medición de caudales en vertederos ubicados a la entrada. Las lagunas facultativas son las encargadas de recibir la materia orgánica presente en las aguas residuales crudas, en ellas se efectúa en forma espontánea una autodepuración o estabilización natural producto de procesos de tipo físico, químico, bioquímico y biológico. Debido a su profundidad (2,80 a 3,00 m) y a largos periodos de retención (10 días) ocurre en su interior una disminución de la concentración de oxígeno disuelto de la superficie al fondo, presentándose una capa superficial aerobia y un estrato profundo anaerobio; el espesor de estas capas varía con la carga orgánica recibida y las condiciones ambientales del lugar. En el estrato aerobio se desarrollan poblaciones de algas microscópicas (euglenas, clorelas, etc.), las cuales a través de la foto-

síntesis producen cantidades de oxígeno que son utilizadas por las bacterias presentes para oxidar la materia orgánica que desciende de las capas superiores y en el lodo acumulado en el fondo. Mientras que en el estrato anaerobio se realiza una digestión anaeróbica con producción de gases de CO_2 y CH_4 que asciende a la superficie. Una vez cumplido el tiempo de residencia en las lagunas facultativas, el efluente pasa a las lagunas de maduración o pulimento, cuyo tiempo de residencia es de cinco (5) días. La finalidad de esta es la reducción del número de gérmenes patógeno y de la población bacteriana, sedimentación del material suspendido, oxidación de algunos compuestos orgánicos, mejorando notablemente la calidad del efluente. Una vez cumplidos los tiempos de residencia, los efluentes tratados son depositados por gravedad en un tanque con capacidad de 400.000 litros, los cuales son extraídos para el riego mediante bombeo y sometidos a filtración rápida a presión para reducir el contenido de algas presentes, evitando así taponamientos de los microaspersores utilizados en la red de riego (8-10).

La calidad del agua para riego se determina en base a las características físico-químicas y biológicas y al tratamiento previo que se le proporcione para acondicionarla, diver-

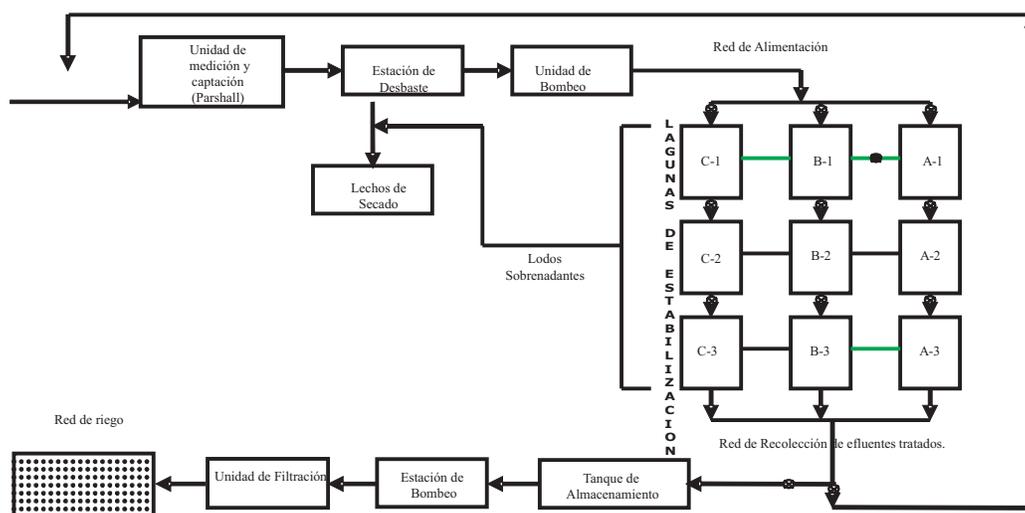


Figura 1. Esquema del funcionamiento del sistema piloto de lagunas de estabilización reducir.

Los estudios a nivel mundial han demostrado que las aguas residuales tratadas por medio de sistemas de lagunas de estabilización pueden utilizarse con efectos beneficiosos en actividades agropecuarias (11, 12).

Uno de los aspectos más importantes a considerar en la reutilización de aguas residuales tratadas es la química de los suelos, relacionada con el estudio de los diferentes elementos nutritivos. Esto abarca los distintos procesos concernientes al contenido y formas de los elementos nutritivos integrados en los diversos aspectos de la génesis y desarrollo de los suelos, la nutrición de las plantas y la fertilización de los suelos, que sirve como base para la clasificación de los suelos con fines agrícolas (13). Dentro de los elementos nutritivos se encuentran: el hidrógeno (H), el oxígeno (O), y el carbono (C), que las plantas toman del agua y del aire; el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y el azufre (S), los cuales reciben el nombre de **MACRONUTRIENTES** por que los necesitan en mayores cantidades y otros siete elementos: hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), boro (B), cloro (Cl) y molibdeno (Mo), denominados trazas, elementos menores o **MICRONUTRIENTES** debido a que los requieren en pequeñas proporciones (14, 15), los mismos se definen como biocatalizadores responsables de la síntesis de las sustancias vegetales; actúan como "activadores" de enzimas indispensables en los procesos de metabolismo vegetal, es decir en la síntesis, transformación y eliminación de sustancias (16). El contenido de los microelementos, Mn, Cu, Zn y Fe presenta características muy diferentes entre sí. La determinación del contenido total de los elementos del suelo no permite ninguna conclusión sobre su disponibilidad y reactividad, y es necesario considerar sus diferentes formas (13). Los cationes de los elementos traza o micronutrientes como el Fe, Cu, Zn y Mn son mucho más solubles y asimilables bajo condiciones ácidas (rango de pH entre 4,5 - 6), encontrándose en el suelo en estados de más de una

valencia, y además se aplican sobre todo en forma de sulfatos (16, 17, 18). Dentro de las formas de los microelementos en los suelos se pueden considerar las siguientes diferenciaciones: 1) estructural o relacionada a los minerales primarios y secundarios presentes en los suelos; 2) precipitada en forma de óxidos e hidróxidos, especialmente en el caso de Fe y Mn; 3) incorporada a la materia orgánica formando quelatos; 4) adsorbida en el complejo coloidal del suelo y soluble presente en la solución del suelo (13, 14).

Hierro (Fe): Aunque el hierro no se encuentra habitualmente en estado libre en la naturaleza, la facilidad con que forma compuestos que se reducen y la abundancia de sus compuestos en rocas y terrenos lo hacen uno de los elementos más aprovechados (13).

Cobre (Cu): Se encuentra en la naturaleza en una forma similar al hierro, y su importancia se asemeja a la del mismo. Los estados de menor valencia del cobre vienen favorecidos por condiciones de baja reserva de oxígeno y nivel relativamente alto de humedad (16-18).

Zinc (Zn): Es importante para la metabolización en general, y cuando falta, casi todos los otros nutrientes se acumulan en la planta, inclusive el fósforo, sin poder formar sustancias orgánicas. La fijación del zinc a valores altos de pH viene favorecida por un segundo fenómeno relacionado sólo al pH del suelo. Las partículas de cal (especialmente de dolomita y calcita) adsorben fuertemente los iones zinc. Así, el zinc puede reaccionar con el magnesio (presente en la cal), reemplazando al ión magnesio dentro del mineral (14-17, 18).

Manganeso (Mn): Actúa sobre la respiración y la transpiración vegetal. Las plantas carentes de él consumen mucha más agua. Su deficiencia puede ocurrir en suelos calcáreos mal drenados y con alto contenido de materia orgánica (14-18).

No importa la cantidad del nutriente en sí, sino su proporción con respecto a los

demás; es decir, se debe mantener el equilibrio entre los macronutrientes y micronutrientes.

Un desequilibrio puede originar que una deficiencia de un elemento provoque el exceso o toxicidad de otro, y en consecuencia, el exceso de uno produzca la deficiencia de otro (16).

La interacción de la acidez del suelo y la aereación en la determinación de la asimilación de los micronutrientes es de gran importancia práctica. Los suelos ácidos que están pobremente drenados contienen con frecuencia cantidades tóxicas de hierro y manganeso. Mientras que los suelos calcáreos, bien oxidados, a veces son deficientes en hierro o manganeso asimilables, por la presencia de cantidades significantes de hidróxidos de éstos (17).

La interrelación entre éstos micronutrientes es muy delicada (e.g. la fertilización con bórax moviliza manganeso y zinc). Las adiciones de micronutrientes a los fertilizantes deben ser mucho más cuidadosamente controladas que en el caso de los macronutrientes. La diferencia entre la cantidad de un determinado micronutriente cuando se presenta deficiente y cuando ya es tóxico es extremadamente pequeña. Por consiguiente, los micronutrientes deben ser añadidos sólo cuando se está seguro que faltan y cuando sea conocida la cantidad requerida (17, 18).

Por lo expuesto anteriormente, la utilización de las aguas residuales tratadas con fines agrícolas hace necesario conocer su influencia en los niveles de salinidad en los suelos y en la acumulación y lixiviación de los metales en los mismos así como en la producción de los cultivos, por lo que el objetivo de esta investigación fue la determinación de la concentración de metales micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn) en el agua residual tratada en el sistema de lagunas de estabilización del CIA y en el agua extraída a diferentes profundidades del suelo de la parcela experimental, a fin de

determinar la contribución en éstos metales al suelo de cultivo. Igualmente a la arena utilizada como medio de percolación se le determinó la concentración de metales para conocer la movilidad de éstos a lo largo de todo el perfil del suelo, y la lixiviación que produce el agua de riego durante todo el recorrido a través de la arena.

Las muestras recolectadas durante un periodo de diez semanas del agua residual tratada, del agua percolada a través de los perfiles, de la arena de los percoladores se prepararon mediante el proceso de digestión ácida, previo a esto se realizó la cuantificación de la concentración de los metales micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) con la técnica de espectrofotometría de absorción atómica.

Es importante acotar que por tratarse de un sistema experimental de tratamiento no se cuenta con datos previos sobre los niveles de acumulación de metales en el suelo sometido a estudio

Materiales y Métodos

Equipos, materiales y reactivos utilizados

Para la determinación analítica de los metales micronutrientes presentes en las muestras se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica, marca PERKIN-ELMER, modelo 3030B. Para la preparación de los patrones y el tratamiento de las muestras se usaron balones volumétricos de vidrio de 10, 25, 50, 100 y 1000 mL y recipientes de polietileno de 100, 500 y 1000 mL para almacenar las muestras. Además de material de vidrio (beaker, cilindros y pipetas graduadas), sistema de filtración Millipore, bombas de vacío, estufa. Para la determinación de metales se prepararon soluciones patrones de cobre, hierro, manganeso y zinc a partir de patrones estándar (concentrados de Titrisol marca Riedel-de Haën) diluidos con agua destilada. La digestión de las muestras para la evaluación de los metales se realizó empleando como

reactivos: ácido clorhídrico HCl (Riedel-de Haën) y ácido nítrico HNO₃ (Fisher Scientific).

Procedimiento Experimental

Limpieza del material: El material usado se lavó cuidadosamente con suficiente ácido clorhídrico (HCl) diluido, se enjuagó con abundante agua destilada; y el material de vidrio se secó en una estufa.

Sistema de Muestreo: El área de estudio está integrada por una parcela experimental de cinco (5) ha, destinadas a la siembra de frutales y plantas de ciclo corto irrigadas por microaspersión y goteo, con las aguas provenientes del sistema de tratamiento para aguas residuales que pertenece al Centro de Investigación del Agua. El material utilizado para recoger las muestra de agua a través de todo el perfil del suelo, consistió en utilizar percoladores cilíndricos verticales tanto en el campo como en el laboratorio. Los percoladores se construyeron con tubos PVC de dos (02) pulgadas de diámetro y diferentes alturas, los cuales se sellaron en uno de los extremos con tapones del mismo material y tamaño. Cada percolador consta de cuatro zonas: 1) zona de entrada en la que se agrega el agua residual tratada (AR); 2) zona de percolado, representa el perfil del suelo; 3) zona de goteo con perforaciones de diámetro combinadas de 1/5" y 1/10"; y 4) zona donde se recoge el agua percolada (AP), todo lo cual se detalla en la Figura 2.

En la Tabla 2, se explica la asignación o numeración de los percoladores según su serie y perfil.

De las cuatro series de percoladores construidos dos se colocaron en el campo, una en cada planta de lima persa sobre limón volkameriano regadas por goteo en puntos cercanos y equidistantes a cada planta (Figura 3). Se hicieron cinco (05) hoyos con la profundidad correspondiente a cada tubo, en los cuales se insertaron los tubos y se fijaron con su misma tierra; el agua se recolectó mediante un sistema de succión. En el laboratorio, las series de percoladores se montaron en armadura de metal conteniendo el perfil del

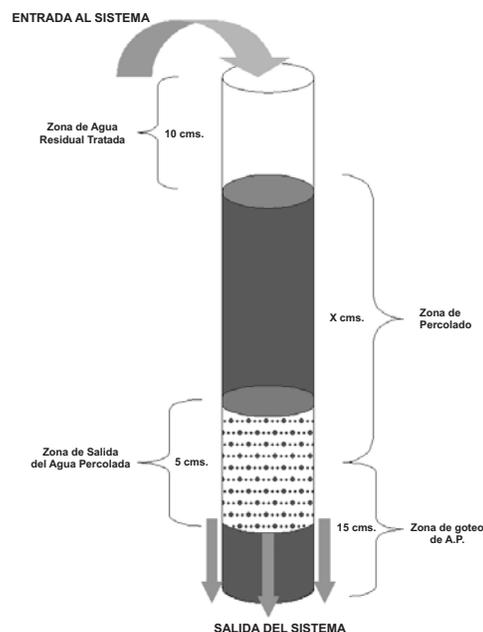


Figura 2. Detalles de la Construcción de los Percoladores.

suelo correspondiente al que se obtuvo al hacer los hoyos en el campo, el AP se recogió en recipientes de plástico transparentes y luego se trasladaron a envases de polietileno de un litro para las muestras; dispuestos según se muestra en la Figura 4.

Recolección de muestra: El riego de los percoladores asignados como AP III-1, AP III-2, AP III-3, AP III-4, AP III-5, AP IV-1, AP IV-2, AP IV-3, AP IV-4 y AP IV-5 ubicados en la parcela experimental se realizó tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes), por un tiempo de dos a cuatro horas por día. Para los percoladores colocados en el laboratorio, codificados como AP I-1, AP II-1, AP I-2 y AP II-2 la frecuencia de riego fue también de tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes), agregando un volumen promedio de 185 mL, a los percoladores AP I-3 y AP II-3 un volumen promedio de 172 mL, a los percoladores AP I-4, AP II-4, AP I-5 y AP II-5 un volumen promedio de 167 mL.; este volumen de agua adicionado es proporcional al suministrado a los percoladores ubicados en campo. El agua residual tratada

Tabla 2
Codificación de cada serie de percoladores

Series	Perfiles					Ubicación
	15cm	30cm	45cm	60cm	75cm	
	1	2	3	4	5	
I	AP I-1	AP I-2	AP I-3	AP I-4	AP I-5	Laboratorio
II	AP II-1	AP II-2	AP II-3	AP II-4	AP II-5	
III	AP III-1	AP III-2	AP III-3	AP III-4	AP III-5	Campo
IV	AP IV-1	AP IV-2	AP IV-3	AP IV-4	AP IV-5	

AP: Agua Percolada.

(AR) y el agua percolada (AP) de cada perfil se recogió en envases de polietileno y se etiquetó por semana. Para el análisis del Mn las muestras se concentraron desde 500 mL a 50 mL; para el Fe las muestras se diluyeron con agua destilada desde 5 mL hasta 50 mL. Para Cu y Zn no fue necesario modificar su concentración. Las muestras recolectadas se prepararon por Digestión (según Métodos Standard de la "American Water Works Association" N° 2340/3500), se filtraron al vacío y se almacenaron en recipientes de polietileno de 100 mL para su posterior análisis (19).

Las muestras de suelo se analizaron antes y después del percolado, para su recolección se llevaron a cabo los siguientes pasos: 1) se procedió a tomar una porción de suelo de cada uno de los perfiles; 2) se mezclaron bien dentro de un recipiente; 3) se tomó una porción de ésta mezcla de unos 0,500 kg; y 4) se colocó en una bolsa de polietileno y se cerró junto con su etiqueta para su identificación.

Para la digestión de las muestras de arena, se tomó una cantidad aproximada de 0,005 kg. a la cual se le añadió 50 mL de agua destilada y 1 mL de ácido nítrico para su digestión. Luego se filtró al vacío y se guardó en los recipientes de polietileno de 100 mL.

Métodos Analíticos: Para el ensayo se obtuvieron seis (06) tipos de muestras: 1) muestra de agua residual tratada provenientes del sistema de lagunas (AR); 2) muestra de

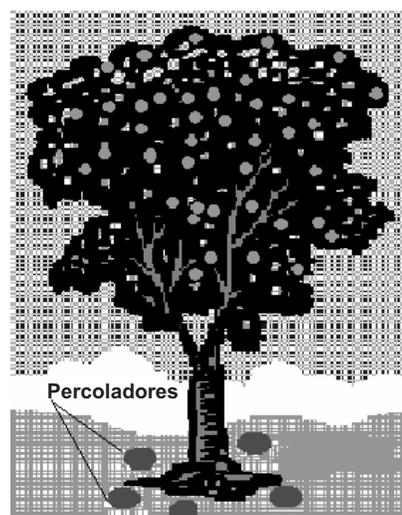


Figura 3. Ubicación de Percoladores en campo.

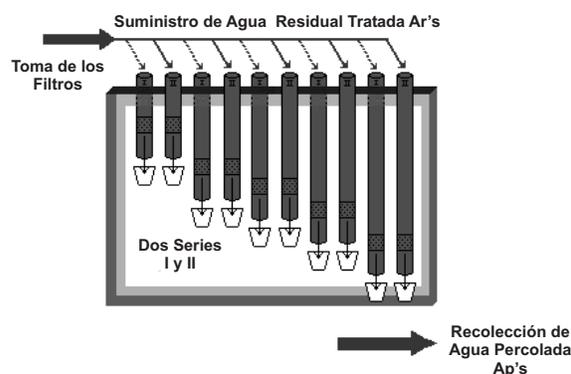


Figura 4. Colocación de los percoladores en laboratorio.

agua percolada obtenidas de los percoladores AP I y AP II; 3) muestra de agua percolada obtenidas de los percoladores AP III y AP IV; 4) muestra del suelo antes del ensayo (ARENA); 5) muestra del suelo después del ensayo (ARP's). A todas las muestra se les determinaron los metales especificados en la Tabla 3, según la metodología descrita en el Standard Methods.

Cuantificación de los metales: Para la cuantificación se elaboraron curvas de calibración (absorbancia vs concentración) con patrones externos para cada metal, según la sensibilidad requerida como se indica en la Tabla 4.

Las concentraciones de los metales se evaluaron mediante la técnica instrumental de la Espectrometría de Absorción Atómica. Las soluciones patrones de metales se prepararon por diluciones seriales de las soluciones patrones correspondientes empleando agua destilada.

Todos los análisis se llevaron a cabo siguiendo la metodología descrita por el Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (19).

Determinación del límite de detección: La determinación del límite de detección se llevó a cabo de dos maneras:

- Utilizando el patrón y los cálculos de la concentración característica para cada metal suministradas por el equipo, se determinó que la concentración que proporciona es de 0,0044 unidades de absorbancia.
- Utilizando la desviación estándar de varias lecturas del blanco, aplicando luego el criterio $y - y_B = 3S_B$; es decir, la concentración del analito (y) proporciona una señal igual a la señal del blanco (y_B), más tres veces la desviación estándar del blanco (S_B).

Tabla 3
Características de los métodos de absorción atómica para cada metal

Metal	Numero Método Standard	Longitud de la Onda (nm)	Amplitud de la Onda (nm)	Caracter. Conc. (mg/L)	Sensitividad (mg/L)	Lineal (mg/L)
Cu	AA29,1	324,8	0,7	0,077	4,0	5,0
Fe	AA26,1	248,3	0,2	0,100	5,0	5,0
Mn	AA25,1	279,5	0,2	0,052	2,5	2,0
Na	EA11,4	589,0	0,2	0,012	0,5	1,0
Zn	AA30,1	213,9	0,7	0,018	1,0	4,0

Tabla 4
Valores para las curvas de trabajo

Metal	Concentración de los diferentes patrones en mg/L						
	1	2	3	4	5	6	7
Cu	0,50	1,00	2,00	4,00	6,00	8,00	
Fe	0,50	1,00	2,00	3,00	5,00	8,00	
Mn	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	6,00	
Na	4,00	10,00	20,00	30,00	60,00	100,00	150,00
Zn	0,05	0,10	0,50	1,00	2,00	3,00	

Estudio de recuperación: Se utilizó el Método de Adición de Estándar Externo para verificar la exactitud del método.

Tratamiento de datos: Los análisis se realizaron por duplicados para cada parámetro, se sometieron a un análisis estadístico descriptivo calculando la media, mediana, desviación estándar, límites de confianza, y error estándar. Con la finalidad de evaluar la reproducibilidad de los métodos y descartar estadísticamente los valores fuera de serie. Todas las evaluaciones estadísticas se realizaron usando programas estadísticos comerciales (e.g., STATISTIC, SAS, etc.).

Resultados y Discusión

Estudio de la Curva Característica de Humedad del Suelo

Al analizar las series I y II correspondientes a los percoladores numerados como AP I-1, AP I-2, AP I-3, AP I-4, AP I-5, AP II-1, AP II-2, AP II-3, AP II-4 y AP II-5; ambas series presentan un percolado continuo. La Figura 5 muestra la variación de la cantidad de agua recolectada en los perfiles a diferentes profundidades con respecto al tiempo. La cantidad de agua recolectada para el AP I-1 va desde 315 mL hasta 69 mL en la últi-

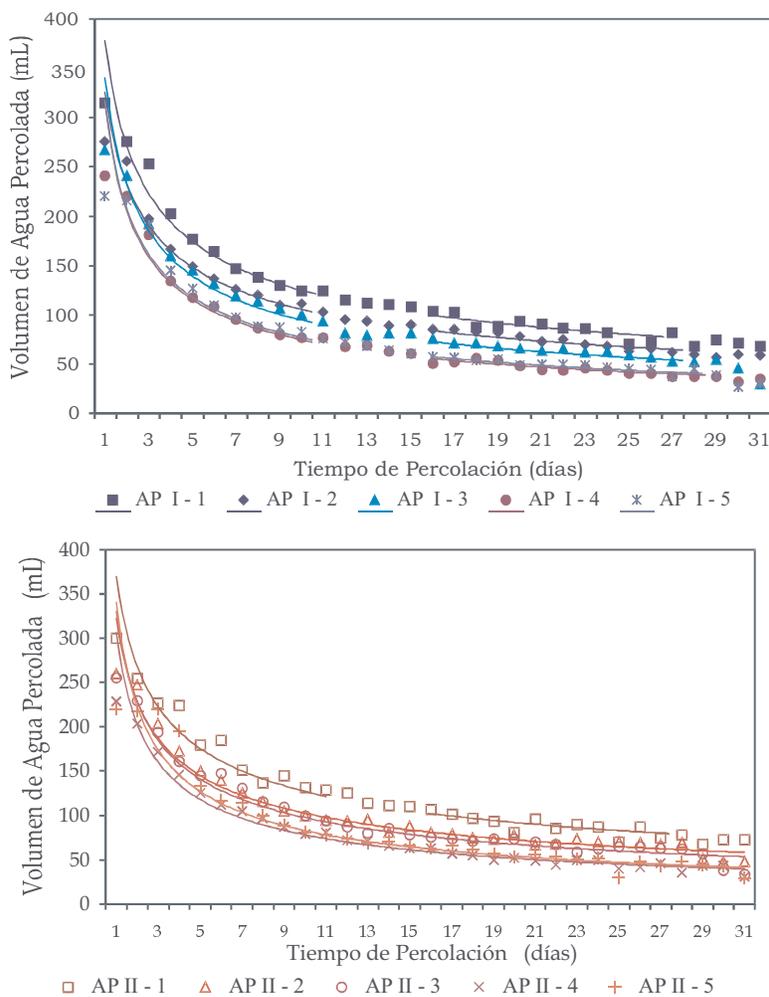


Figura 5. Curva característica de humedad para cada percolador.

ma semana, con un promedio de 123,5 mL por día; y para AP II-1 se tienen valores de 300 mL hasta 73 mL con un promedio de 125,3 mL por día. Para el AP I-2 va desde 276 mL hasta 59 mL; para la AP II-2 va desde 260 mL hasta 48 mL. Para el AP I-3 va desde 267 mL hasta 30 mL; para AP II-3 va desde 255 mL hasta 34 mL. Para el AP I-4 va desde 241 mL hasta 35 mL; para AP II-4 va desde 249 mL hasta 31 mL. Para el AP I-5 va desde 220 mL hasta 30 mL; para AP II-5 va desde 220 mL hasta 29 mL. Al graficar el movimiento del agua en el suelo para cada perfil de las series se obtiene una curva exponencial (Figura 5), cuyos valores al iniciar el riego (zona curva) se hacen más dispersos que cuando se alcanza la linealidad. Este comportamiento es similar al obtenido por Porta y otros autores y representa la curva característica de humedad a través de los diferentes perfiles del suelo (20-22).

La Tabla 5, muestra los valores promedios para los coeficientes, para el PERFIL 1 se ubican en 374,61; para el PERFIL 2 en 324,66; el PERFIL 3 en 335,86; el PERFIL 4, presenta un valor de 311,45; y por último en el PERFIL 5 el valor alcanza 329,42. Los valores de los exponentes para la serie I van desde -0,4819 hasta -0,6152, para la serie II van desde -0,4850 hasta -0,6147. Los promedios de las correlaciones potenciales van desde 0,9199 hasta 0,9856.

Los valores obtenidos de los coeficientes que representan los potenciales hídricos disminuyen con la profundidad de cada perfil; como se indica en la literatura (20), esto se debe a la porosidad y permeabilidad de los mismos. Igualmente la pendiente de las curvas aumentan con la profundidad, y la relación entre el contenido de agua y el contenido de agua de saturación disminuye con el tiempo (Tabla 5).

Caracterización de los metales presentes en el agua para riego (AR)

Para los metales clasificados como MICRONUTRIENTES, el hierro como metal más común en suelos minerales su inter-

Tabla 5
Ecuaciones de las curvas características para cada percolador

AP I - 1	$\Psi_p^m = 378,55 (\theta/\theta_s)^{-0,4819}$	0,9774
AP I - 2	$\Psi_p^m = 326,59 (\theta/\theta_s)^{-0,4904}$	0,9856
AP I - 3	$\Psi_p^m = 341,03 (\theta/\theta_s)^{-0,5567}$	0,9446
AP I - 4	$\Psi_p^m = 316,02 (\theta/\theta_s)^{-0,6262}$	0,9793
AP I - 5	$\Psi_p^m = 317,47 (\theta/\theta_s)^{-0,6152}$	0,9518
AP II - 1	$\Psi_p^m = 370,67 (\theta/\theta_s)^{-0,465}$	0,9599
AP II - 2	$\Psi_p^m = 322,72 (\theta/\theta_s)^{-0,4983}$	0,9578
AP II - 3	$\Psi_p^m = 330,69 (\theta/\theta_s)^{-0,5304}$	0,9235
AP II - 4	$\Psi_p^m = 306,88 (\theta/\theta_s)^{-0,5941}$	0,965
AP II - 5	$\Psi_p^m = 341,37 (\theta/q)^{-0,6147}$	0,9199

valo oscila entre 0,44 mg/L como mínimo y 1,59 mg/L como máximo; como se puede observar en la Figura 6; para el cobre sus valores oscilan entre 0,020 como mínimo y 0,28 mg/L como valor máximo; en el caso del zinc el mínimo se encuentra en 0,32 mg/L y el máximo llega a un valor de 1,37 mg/L; del manganeso el mínimo se halla en 0,02 mg/L y el máximo alcanza un valor de 0,15 mg/L. Se observa que los valores promedio de éstos metales no exceden el máximo permitido (23).

En la Tabla 6, se muestran los valores promedios de la concentración de los metales presentes en el agua de riego (AR). Los valores obtenidos no excedieron los límites permisibles para las aguas destinadas al riego con fines agropecuarios (24, 25).

Como se observa en las Figuras 7, 8 y 9, la variación de la concentración de los metales micronutrientes en el agua percolada (AP) con respecto al tiempo indica una tendencia lineal ascendente para el hierro con un valor mínimo de -1,77 mg/L y máximo de 4,19 mg/L, para el zinc con un valor mínimo de -0,24 mg/L y máximo de 0,31 mg/L, y con relación al manganeso alcanza un mínimo de -0,037 mg/L y máximo de 0,30 mg/L; y ascendente para el cobre con un máximo de 0,063 mg/L y mínimo de -0,079 mg/L. Además se muestra

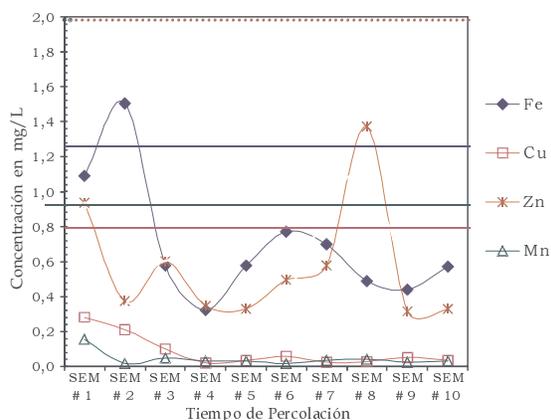


Figura 6. Variación de los micronutrientes en el agua de riego (AR).

Tabla 6
Caracterización de los metales presentes en el agua de riego (AR)

Micro Nutrientes	Concentración en mg/L	
	Promedio Obtenido	Valor Máximo Permissible
Fe	0,705	1,000
Cu	0,085	0,200
Zn	0,505	5,000
Mn	0,052	0,500

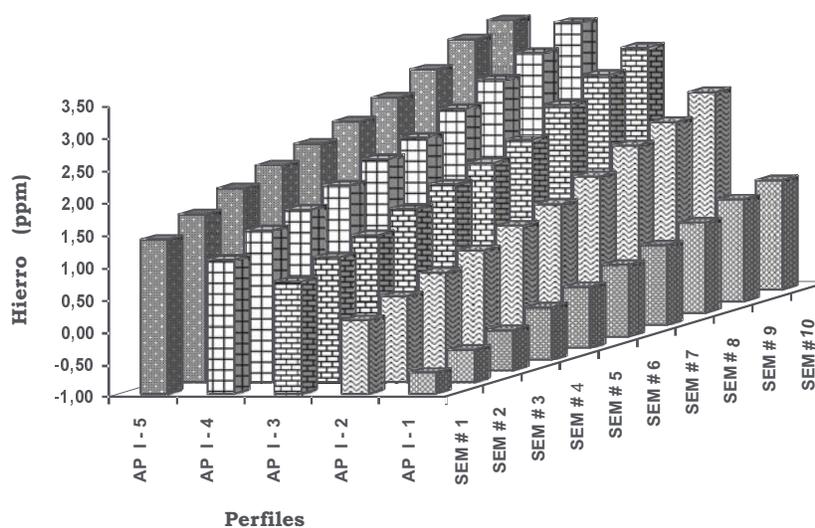


Figura 7. Tendencia en la variación de la concentración del hierro en el agua percolada (AP) con respecto al tiempo y a la profundidad de los perfiles.

que la tendencia de la variación de la concentración de los micronutrientes depende de la profundidad de los perfiles, siendo lineal ascendente para el manganeso; mientras que para el hierro y el cobre es una curva polinomial ascendente y descendente para el zinc.

La Figura 10, representa las curvas características para los metales micronutrientes en el agua percolada (AP), se observan valores mayores en las series colocadas en el

campo que las del laboratorio; con valores promedios en el laboratorio para el hierro de 1,14 mg/L, para el cobre de -0,01 mg/L, para el zinc de -0,04 mg/L y para el manganeso de 0,07 mg/L, y los promedios en el campo están para el hierro en 37,61 mg/L, para el cobre 0,11 mg/L, para el zinc 0,42 mg/L y por último para el manganeso 1,81 mg/L. Las cantidades de éstos metales contenidas en el suelo son pequeñas, por lo que la concentración en los percoladores colocados en el laboratorio de los mismos esta limi-

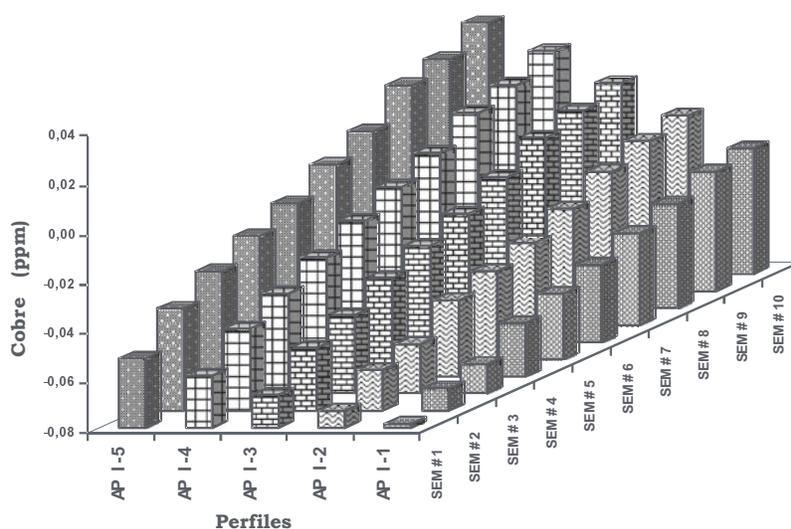


Figura 8. Tendencia en la variación de la concentración del cobre en el agua percolada (AP) con respecto al tiempo y a la profundidad de los perfiles.

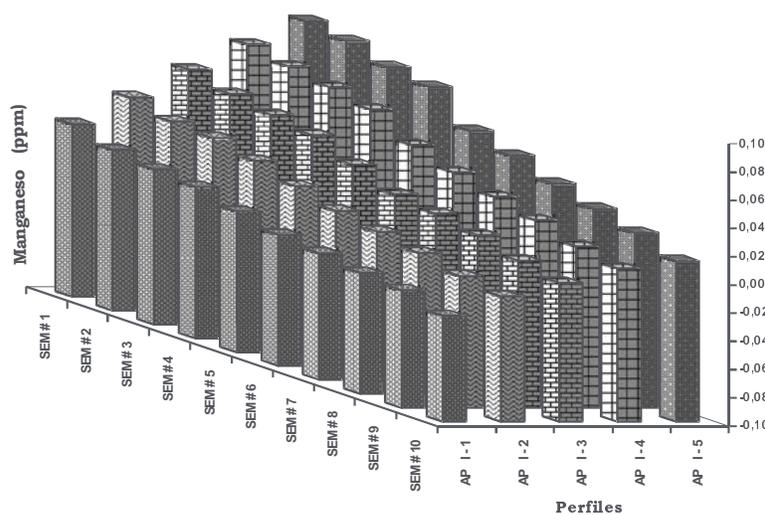


Figura 9. Tendencia en la variación de la concentración del manganeso en el agua percolada (AP) con respecto al tiempo y profundidad de los perfiles.

tada por el tamaño del percolador; mientras que en el campo no existe esta limitación. Por lo que existe una acumulación más significativa en campo que en laboratorio.

La Figura 11 representa la variación de éstos metales en el suelo; los valores promedios correspondientes al laboratorio son para el hierro 430,90 mg/L, para el cobre 4,04 mg/L, para el zinc 3,98 mg/L y para el

manganeso 98,86 mg/L; los correspondientes al campo son para el hierro 1160,08 mg/L, para el cobre 0,19 mg/L, para el zinc 1,86 mg/L y para el manganeso de 0,51 mg/L. Como se puede ver los valores en la variación de la concentración de los micronutrientes en el suelo son mayores en el laboratorio que en el campo; como consecuencia de la baja concentración en los suelos de

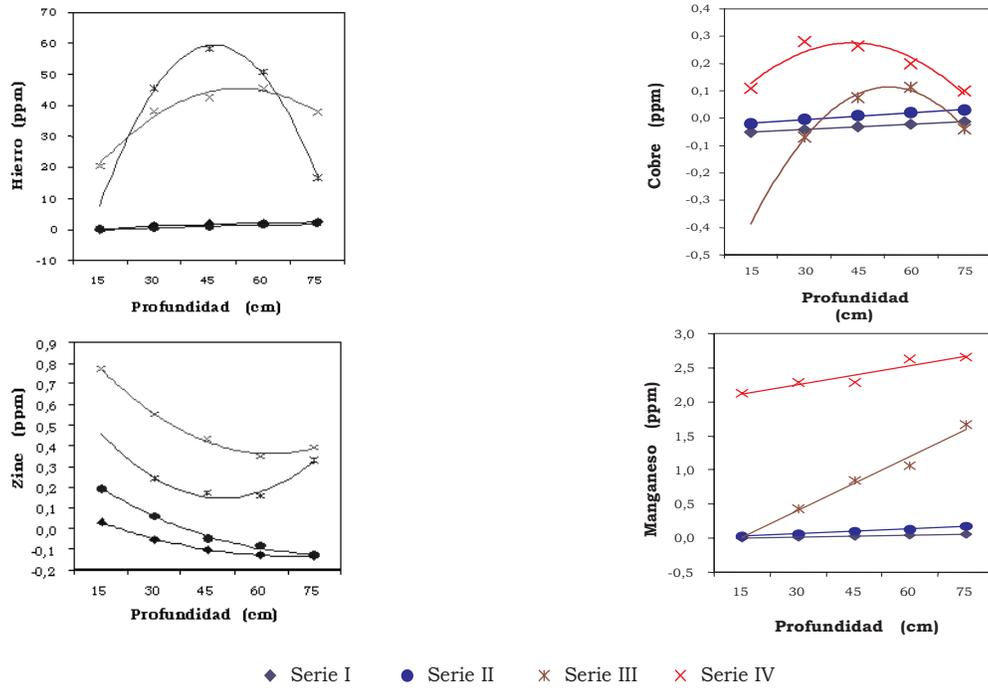


Figura 10. Variación de la concentración de los micronutrientes en el agua percolada (AP).

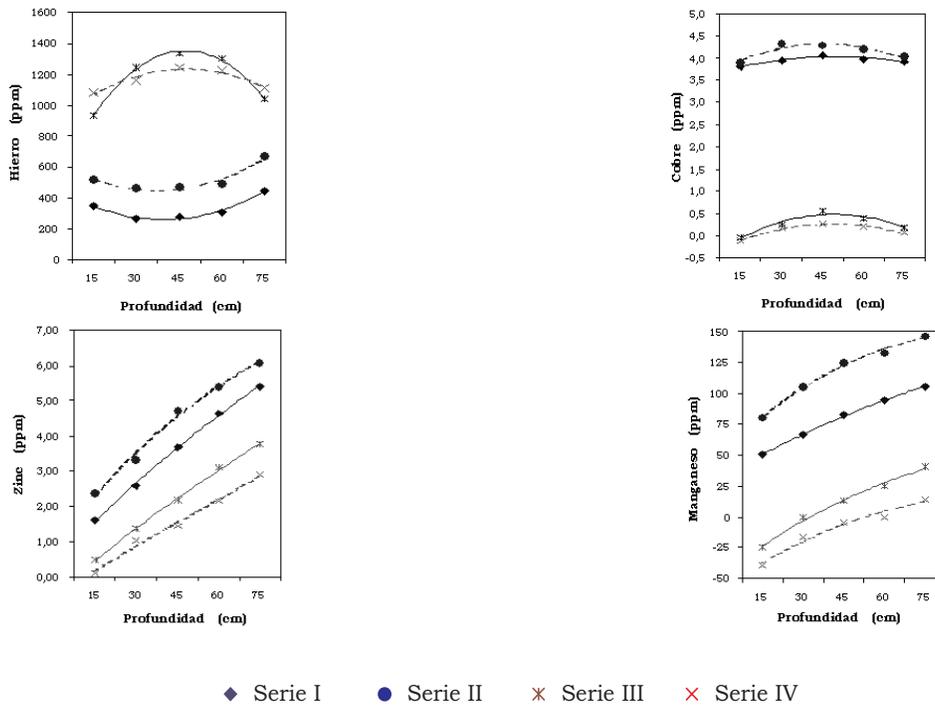


Figura 11. Variación de los micronutrientes en el Suelo.

Tabla 7
Balances Globales para los micronutrientes

Perfiles de las series	Balance del Hierro			Balance del Cobre			Balance del Zinc			Balance del Manganeso		
	Δ Suelo	Δ Agua	Balance	Δ Suelo	Δ agua	Balance	Δ Suelo	Δ Agua	Balance	Δ Suelo	Δ Agua	Balance
AP I-1	518,00	0,02	517,98	-0,04	-0,05	0,01	0,48	0,03	0,45	-24,93	0,00	-24,93
AP I-2	463,00	1,03	461,97	0,23	-0,04	0,27	1,37	-0,05	1,42	-0,50	0,02	-0,52
AP I-3	472,00	1,67	470,33	0,55	-0,03	0,58	2,17	-0,10	2,27	13,30	0,03	13,27
AP I-4	494,00	2,05	491,95	0,39	-0,02	0,41	3,12	-0,13	3,25	25,00	0,04	24,96
AP I-5	667,00	2,28	664,72	0,17	-0,01	0,18	3,76	-0,13	3,89	40,00	0,06	39,94
AP II-1	347,00	-0,02	347,02	-0,12	-0,02	-0,10	0,10	0,19	-0,09	-39,40	0,04	-39,44
AP II-2	264,00	0,35	263,65	0,17	0,00	0,17	1,05	0,06	0,99	-17,00	0,07	-17,07
AP II-3	330,00	0,99	329,02	0,26	0,01	0,25	1,46	-0,05	1,51	-4,80	0,10	-4,90
AP II-4	308,00	1,34	306,66	0,19	0,02	0,17	2,14	-0,09	2,23	-0,40	0,13	-0,53
AP II-5	446,00	1,70	444,30	0,07	0,03	0,04	2,90	-0,13	3,03	13,80	0,17	13,63
AP III-1	934,52		934,52	3,80		3,80	1,60		1,60	51,10		51,10
AP III-2	1246,00	45,53	1200,47	3,93	-0,07	4,00	2,58	0,24	2,34	66,00	0,44	65,56
AP III-3	1334,00	58,30	1275,70	4,06	0,08	3,99	3,69	0,17	3,52	82,40	0,84	81,56
AP III-4	1305,88	50,80	1255,08	3,98	0,11	3,86	4,63	0,16	4,47	94,10	1,07	93,03
AP III-5	1039,39	16,80	1022,59	3,92	-0,04	3,96	5,40	0,33	5,07	105,90	1,67	104,23
AP IV-1	1082,01	20,50	1061,51	3,90	0,11	3,79	1,60	0,77	0,83	80,30	2,12	78,18
AP IV-2	1160,00	38,10	1121,90	4,33	0,28	4,05	2,58	0,55	2,03	104,80	2,28	102,52
AP IV-3	1246,00	42,50	1203,50	4,28	0,26	4,02	3,69	0,43	3,26	125,00	2,28	122,72
AP IV-4	1229,00	45,40	1183,60	4,20	0,20	4,00	4,63	0,35	4,28	133,00	2,62	130,38
AP IV-5	1114,03	37,71	1076,32	4,03	0,10	3,93	5,40	0,39	5,01	148,31	2,65	145,66

Nota: Los valores se encuentran expresados en unidades de (mg/L). Los valores reportados son los promedios obtenidos durante todo el período de experimentación.

éstos metales trazas, y además por la limitación de la cantidad de arena dentro de los percoladores del laboratorio, debido a que en el laboratorio el agua de riego se restringe por un área de tierra fija en cada percolador, el agua de riego en el campo puede esparcirse por todo el terreno alrededor del percolador, lo que hace que la percolación sea mayor en los primeros. A excepción del hierro que se encuentra en cantidades considerables en los suelos minerales, pero la mayor parte en forma no asimilable (13, 16). Asimismo, el comportamiento observado a par-

tir de su representación gráfica es similar al movimiento de los metales en suelos minerales (20). Es importante considerar que la absorción de los metales micronutrientes en el suelo se incrementa con la profundidad, en especial el hierro y el cobre, hecho que se podría explicar considerando las investigaciones de Porta y colaboradores (20) que establecen que los cationes de los elementos micronutrientes (como el Fe, Cu, Zn y Mn) son mucho más solubles y asimilables bajo condiciones ácidas, encontrándose en el suelo en estados de más de una valencia.

Luego de realizar un balance global entre la variación de la concentración de los micronutrientes en el agua percolada (AP) y el suelo; se observa que el zinc y el manganeso se acumula en el suelo (Tabla 7), debido a que la percolación del agua dentro del suelo no es suficiente en los perfiles mas profundos para convertirlos a su forma soluble, por lo que en el balance la concentración a la salida disminuye (14). Lo que no ocurre con el hierro que a pesar de ser clasificado como un micronutriente, los suelos minerales lo poseen en concentraciones altas, sin embargo solo una muy pequeña cantidad de éste se encuentra en su forma asimilable; de acuerdo con esto el balance se expresa en forma polinomial (16). En la Tabla 7 el balance del cobre presenta un pequeño aumento de la concentración en el agua percolada, debido a que ocurre una ligera lixiviación de este metal a través de todo el suelo.

Conclusiones

Las curvas características de humedad a través de los perfiles del suelo presentan un drenaje de agua más rápido a medida que la profundidad del perfil disminuye.

Las características físico-químicas de las aguas residuales tratadas en el sistema de lagunas de estabilización de LUZ indican que cumplen con los requerimientos para utilizarse como aguas destinadas para fines agropecuarios.

Los suelos sometidos a riegos con aguas residuales tratadas ofrecen una adecuada movilidad, acumulando los nutrientes tanto en 'solución' como en forma asimilable para las plantas.

Recomendaciones

El riego con aguas residuales tratadas en éstos suelos es recomendable para la producción de frutos en árboles.

Estudiar la factibilidad de utilizar las aguas residuales tratadas como fuentes de nutrientes.

Es conveniente realizar el mismo estudio pero para otros tipos de suelos, y con ello comprobar un comportamiento similar en cuanto al drenaje y la acumulación de metales.

El muestreo se realizó en meses de lluvias, sería aconsejable investigar si en época baja en lluvias se conservan las mismas características para las aguas residuales tratadas.

El uso de aguas residuales tratadas con fines agropecuarios es un medio muy útil para la disposición ecológica de las aguas de alcantarillado.

Referencias Bibliográficas

1. SMITH R. *Water Enviroment Research* 65(4): 371 – 374, 1983.
2. TRUJILLO A. Sistema Experimental de Lagunas de Estabilización de L.U.Z. *III Jornadas de Mantenimiento y Servicios de las Universidades Nacionales*. San Cristóbal (Venezuela), 1999.
3. SÁNCHEZ J., CUBILLAN H., GRANADILLO V., ROMERO R. *Ciencia* 1(2): 113 – 123, 1993.
4. NAVA C., GUTIÉRREZ E., LEDO DE MEDINA H. *Ciencia* 6(3): 210 – 222, 1998.
5. DIEROLF T., ARYA L., YOST R. *Agronomy Journal* 89(4): 572 – 579, 1997.
6. STANTON W. *Process Biochemistry* 13(12): 6–7, 1978.
7. AVILAN L., LEAL F., BAUTISTA D. *Manual de Fruticultura*, Editorial América C.A., Ciudad de México (MÉXICO), pp. 91-289, 1988.
8. REPINDEX. *Uso de Aguas Residuales*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima (PERÚ), 1995.
9. SUEMATSU L. *Procesos de tratamiento de aguas residuales, objetivos y selección de tecnologías en función al tipo de reutilización*, Centro Panamericano de In-

- geniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima (PERÚ), 1995.
10. SUEMATSU L., CAVALLINI M. **Estrategias para el uso de aguas residuales tratadas, potencialidades y limitaciones**, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima (PERÚ), 1995.
 11. HOGGS W. **Sistema de Riego**, Editorial Acribia, Madrid (ESPAÑA), pp. 52-77, 1981.
 12. CUBILLOS A. **Calidad del Agua y Control de la Polución**, Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CID-IAT), Mérida (VENEZUELA), pp. 2-17, 1988.
 13. FASSBENDER H. **Química de Suelos con énfasis en suelos de América Latina**, Instituto interamericano de Ciencias Agrícolas de la O.E.A y Centro Regional de Ayuda Técnica de la Agencia para el Desarrollo Internacional (AID), Washington (USA), pp. 10-180, 1975.
 14. AVILAN R., RENGIFO A., **Los Cítricos**, Editorial América C.A., Caracas (VENEZUELA), pp.226-235, 1988.
 15. JENKINS D., RUSSELL L. **Water Environment Research** 66(6): 805-813, 1994.
 16. PRIMAVESI A. **Manejo Ecológico del Suelo**, Editorial Librería El Ateneo, Buenos Aires (ARGENTINA), pp. 73-118, 1982.
 17. BUCKMAN B. **Naturaleza y Propiedades de los Suelos**, Editorial Montaner y Simón S.A., pp. 400-510, 1972.
 18. ROMIG D., HARRIS R., McSWEENEY K. **Journal of Soil and Water Conservation** 5(3): 229-236, 1995.
 19. APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**, (USA), 1992.
 20. PORTA J., LÓPEZ M., ROQUERO C. **Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente**, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid (ESPAÑA), pp. 40-65, 1994.
 21. JENNINGS J., NELSON C. **Agronomy Journal** 90(1): 54-58, 1998.
 22. MORO P., FERNÁNDEZ G. **Metales pesados por espectroscopia ICP en aguas residuales urbanas** (Theses). La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp.147-152, 1990.
 23. CONGRESO DE LA REPUBLICA DE VENEZUELA. **Ley Orgánica del Ambiente y sus Reglamentos**, pp. 28 - 32.
 24. GACETA OFICIAL DE LA REPÚBLICA DE VENEZUELA. Normas para la clasificación y control de calidad de los cuerpos de agua y vertido de efluentes líquidos, N° 5021, Decreto N° 883, Caracas (VENEZUELA), 1995.
 25. ISRAELSEN O., HANSEN V. **Principios y Aplicaciones del Riego**, Editorial Reverté, Madrid (ESPAÑA), pp. 30-45, 1981.
 26. MARIN G. Determinación de Metales en Naranjadas Pasteurizadas (Trabajo de Ascenso). La Universidad del Zulia, Maracaibo (Venezuela), pp.1-24, 1990.