SUELOS ECUATORIALES

ISSN 0562-5351

Julio-Diciembre 2006

REVISTA DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

VOLUMEN 36 No. 2 Año 2006

SUELOS ECUATORIALES

ISSN 0562-5351

VOLUMEN 36 No. 2 Año 2006

Julio-Diciembre 2006

REVISTA DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA
DE LA CIENCIA DEL SUELO

REVISTA "SUELOS ECUATORIALES"

Fundada en 1956 en Medellín, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, por el Doctor Manuel Del Llano

Licencia No. 00316 de marzo de 1972 del Ministerio de Gobierno - Colombia

CONSEJO EDITORIAL

Hernán Burbano Orjuela
Dimas Malagón Castro
Adela Correa Salazar
Amanda Lozano de Yunda

Director - Editor:	Hernán Burbano Orjuela
Secretaria:	Amanda Lozano de Yunda
Consejeros científicos en este número:	Fabio Leyva Barón, Francisco Restrepo Higuita, Hernán Burbano Orjuela, Siavosh Sadeghian, Yolanda Rubiano Sanabria, Roberto Villalobos R., Gabriela Estrada Estrada, Franco Obando, Martha Marina Bolaños, Walter Osorio Vega, Lucia Ana Díaz
Indexación:	Esta revista se encuentra en el Índice Bibliográfico Nacional – Publindex II Actualización 2006 en la Categoría C en el Programa Ciencia y Tecnología Agropecuaria
Periodicidad:	Semestral

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO
Sede Permanente: Carrera. 11 No. 66-34 Of. 202 - Telefax: (571) 2113383 - 2113185
E Mail: scsuelo@cable.net.co - **Página web: http://scsuelo.tripod.com**
Bogotá, **D. C. – Colombia**

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

Fundada en 1955 en la ciudad de Medellín, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia por Manuel del Llano Buenaventura.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

JUNTA DIRECTIVA NACIONAL
2004 - 2006

Presidente:	Francisco Restrepo Higuita
Vicepresidente:	Álvaro García Ocampo
Vocales Principales:	Francisco Restrepo Higuita Álvaro García Ocampo Leyla Amparo Rojas Escobar Manuel Iván Gómez Sánchez Yolanda Rubiano Sanabria
Suplentes:	César Palacio Martínez Armando Torrente Trujillo Samuel Caicedo Guerrero Enrique Combatt Caballero Gabriel Romero Caicedo
Revisor Fiscal:	Hernán Buitrago Camargo
Suplente:	María Isabel Buitrago Camargo
Secretario Ejecutivo:	Francisco Silva Mojica
Tesorero:	Yolanda Rubiano Sanabria
Secretaria de Actas:	Leyla Amparo Rojas Escobar
Secretaria de Oficina:	Luz Marina Otálora López

CONTENIDO

Pág.

CARTA DEL EDITOR 7

CONFERENCIA MAGISTRAL

SOSTENIBILIDAD DE LA AGRICULTURA BAJO RIEGO: USO Y MANEJO DE AGUAS DEGRADADAS
Sustainability of agricultura under irrigation: Use and management of degraded waters
Donald L. Suárez 9

COMISIÓN I - FERTILIDAD

USO DE LAS BASES DE DATOS EN LA CALIBRACIÓN E INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELOS. CASO CAFÉ
Use of data bases in calibration and interpretation of soil tests
Francisco E. Restrepo Higuita 18

MANEJO INTEGRADO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE FLORES BAJO INVERNADERO
Integrated fertilization and irrigation management in greenhouse cut flowers crop
Daniel Ortega Rey, John Jairo Franco 27

COMISIÓN II - QUÍMICA, MINERALOGÍA Y GÉNESIS

HERENCIA GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA EN LA GÉNESIS DE SUELOS, ALTIPLANOS ANDINOS DE COLOMBIA
Geochemical and mineralogical heritage in soils from the Andean Colombian High Plains
Sergio Gaviria M 33

MOVILIDAD IÓNICA Y DIAGNÓSTICO QUÍMICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO
Ionic mobility and chemical diagnosis of the soil fertility
Raúl Zapata H. 41

COMISIÓN III - FÍSICA, CONSERVACIÓN Y MANEJO

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA AL MANEJO POR SITIO-ESPECÍFICO DEL SUELO PARA LA SOSTENIBILIDAD Y COMPETITIVIDAD DE CULTIVOS TRANSITORIOS EN COLOMBIA
Some approaches for site-specific soil management for sustainable and competitive arable crop production in Colombia
Fabio R. Leiva Barón 49

APROXIMACIÓN FRACTAL PARA EVALUAR EL MANEJO DE LOS SUELOS EN DIFERENTES AMBIENTES
The fractal approach to evaluate the soils management in different environments
Raúl Madriñán Molina 57

Pág.

COMISIÓN IV - BIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA

COMPORTAMIENTO DE GRUPOS FUNCIONALES (CICLO DEL C, N, P) Y ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA EN UN PROCESO DE COMPOSTAJE
Behavior of functional groups (cycle of the C, N, P) and activity of the acid phosphatase in a process of composting
Smith Johanna Rojas-Avila y Luz Marina Lizarazo Forero 65

EVALUACIÓN *IN VITRO* DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO Y SOLUBILIZACIÓN DE FOSFATOS DE MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS CULTIVABLES DE PLÁNTULAS DE MANGLAR
In vitro Evaluation of Biological Nitrogen Fixation and Phosphate Solubilization of Rhizospheric Cultivable Microorganisms Associated Mangrove Seedlings
J. Vanegas, J. Sánchez, T. Galindo, J. Polanía, H. Valencia, N. Moreno, L. Melgarejo 75

COMISIÓN V - SUELO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD

C SEQUESTRATION IN PASTURE AND SILVO-PASTORAL SYSTEMS IN ECOSYSTEMS OF TROPICAL AMERICA
Secuestro de C en Pastos y Sistemas Silvopastoriles en Ecosistemas de América Tropical
María Cristina Amézquita, Muhammad Ibrahim, Bertha L. Ramírez, Hernán Giraldo y María E. Gómez 80

VERDADES Y MITOS DE LO ORGÁNICO FRENTE AL MODELO CONVENCIONAL DE LA AGRICULTURA
Truths and Myths about Organic Agriculture Faced to Conventional Models
Hugo E. Castro F 87

CARTA DEL EDITOR

La visibilidad de los científicos y de las sociedades que ellos integran, sin duda, se hace a través de las revistas científicas que publican estas sociedades como consecuencia del trabajo investigativo de los primeros. Por esta razón, la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo considera como una acción prioritaria la publicación periódica de su revista institucional "Suelos Ecuatoriales" que, a la fecha, está completando el volumen 36 con su segundo número, correspondiente al año 2006.

La entrega de este número tiene un significado muy especial, porque después de una tarea seria y sistemática en la cual participó un grupo importante de la Sociedad, la Revista Suelos Ecuatoriales fue indexada en noviembre de 2006 en el Índice Bibliográfico Nacional – IBN Publindex y fue ubicada en la categoría C, decisión que la ubica en un grupo privilegiado de publicaciones periódicas, con visibilidad en el mundo científico y con retribución académica para los investigadores que publiquen en la misma. Alcanzada esta primera meta viene ahora un trabajo continuo y riguroso a fin de obtener, dentro de un plazo prudencial, la indexación de Suelos Ecuatoriales en una categoría más alta, toda vez que la indexación actual va hasta junio de 2008.

En la presente entrega de Suelos Ecuatoriales se publican artículos que corresponden a algunas de las conferencias magistrales y especiales que tienen información original, conferencias que se presentaron en el XIII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo realizado en Bogotá, en el mes de octubre de 2006.

Como Editor de la Revista Suelos Ecuatoriales le auguro a esta publicación una consolidación y un progreso constantes; para mí fue un honor haber estado al frente de la dirección de la Revista. Éxitos a su nuevo cuerpo de dirección y edición en esta tarea estimulante y grata.

Hernán Burbano Orjuela

CONFERENCIA MAGISTRAL

SOSTENIBILIDAD DE LA AGRICULTURA BAJO RIEGO: USO Y MANEJO DE AGUAS DEGRADADAS

SUSTAINABILITY OF AGRICULTURE UNDER IRRIGATION: USE AND MANAGEMENT OF DEGRADED WATERS

*Donald L. Suárez**

RESUMEN

En las zonas áridas cada vez es más necesario el uso de aguas salinas y recicladas para el riego, debido a la escasez de agua dulce y al aumento en la demanda de agua de los sectores municipales e industriales. En la mayoría de estas zonas existe un rápido descenso del suministro de agua dulce, por lo tanto el riego tal y como se está practicando no es sostenible. Con el fin de mantener la productividad agrícola, es primordial mejorar la eficiencia del uso de agua, para ello la conversión al riego por goteo es esencial, pero no suficiente. Se hará necesario la utilización de agua de baja calidad, salina, de drenaje y residual para el riego, que requerirán nuevas estrategias de uso. En muchas zonas, las necesidades generales de agua pueden satisfacerse a través de una combinación de lluvia, agua dulce y agua salina. En otros casos, será necesaria una recuperación periódica del suelo o la aplicación continua de enmiendas para controlar la salinidad sódica y las concentraciones de elementos tóxicos. Estas prácticas deben ser económicamente eficientes y deben minimizar la degradación de las aguas que reciben las aguas de drenaje. En este momento existen muchas clasificaciones para el uso de agua para riego. Por necesidad estos criterios son conservadores y simplificados, con el fin de evitar problemas de infiltración y pérdida de rendimiento en todos los casos. Determinar si un agua es adecuada para riego dependerá de muchos factores y será distinto en cada caso o lugar. Los modelos informáticos tales como UNSATCHEM son adecuados para analizar los resultados de diversas prácticas de utilización del agua. Se dan ejemplos del manejo de la producción de cultivos con agua dulce limitada y riego suplementario con agua reciclada que contiene niveles elevados de salinidad, y también riego con agua que contiene niveles elevados de boro.

Palabras claves: agua sódica, boro, modelo informático, riego, salinidad.

ABSTRACT

In arid regions the use of saline and reclaimed waters for irrigation is increasingly necessary. Scarcity of fresh water for agriculture is increased by the water demands of the municipal and industrial sectors. In the majority of these regions there is a rapid decrease in fresh water availability and overuse of existing supplies, thus the current irrigation practices are not sustainable. In order to maintain agricultural productivity and irrigation, it is essential that we improve overall efficiency, such as by use of drip irrigation, but this by itself will not be sufficient. It will be necessary to use water of lower quality, saline waters, agricultural drainage waters, and municipal waste waters for irrigation. Use of these waters will require new strategies for water use and management. In many regions, water requirements can be satisfied by a

* U.S. Salinity Laboratory, USDA-ARS 450 W Big Springs Road, Riverside CA, 92507 USA. Correo electrónico: *dSuárez@ussl.ars.usda.gov*

combination of rain, fresh water and brackish or saline waters. In these situations it will be necessary to periodically reclaim the soil by leaching or apply amendments for sodicity and toxic element control. Proposed practices must be economically efficient and the resultant drainage must minimize the degradation of receiving waters. At this time there exist many water classification systems for irrigation water quality. By necessity these general criteria are cautious and overly simplistic, with the objective of avoiding infiltration problems and loss of yield in all cases. In reality, the determination as to whether or not a water is suitable for irrigation depends on many factors and is to be distinctly determined in each case or location. Process based models, such as UNSATCHEM are well suited for evaluating water suitability and irrigation management impacts on relative plant yield. Examples are presented of management plans and analysis of yield with limited use of fresh water cycled with more saline water drainage water, and impacts of different management practices on soil boron levels when irrigation with waters of elevated boron concentration are utilized.

Interpretative summary

Scarcity of fresh water in arid regions means that we must evaluate the use of less desirable, more saline supplies for irrigation. Existing criteria are not adequate as they are generalized, with the objective of avoiding infiltration or yield loss in all instances. Site specific evaluation requires consideration of water quality and quantity, climate, management practices, soil properties and crop selection. We demonstrate the utility of the UNSATCHEM model to evaluate the impact of different management practices including use of cyclic fresh and saline drainage water, and irrigation with high boron water. Scenarios are provided where water considered unsuitable for irrigation can be utilized under specified conditions. Such analysis will provide the framework for successful use of lower quality waters for irrigation.

Key words: sodic water, boron, computer model, irrigation, salinity.

INTRODUCCIÓN

Las regiones áridas y semiáridas se enfrentan a demandas cada vez mayores de agua de alta calidad. Estas demandas incluyen más agua para uso municipal debido al aumento de población, y para la producción industrial en el sector urbano, además de la necesidad de aumentar el riego para satisfacer las crecientes demandas en alimentación. En la mayoría de las zonas áridas, el índice actual de extracción de agua dulce excede enormemente a la velocidad de reposición; ya que esta no es una condición sostenible, la agricultura (el consumidor principal) tendrá que utilizar aguas de baja calidad o bien recortar su uso.

Potencialmente podemos aumentar la eficiencia del uso de agua en terrenos agrícolas, sin embargo los ahorros potenciales no son suficientes. En muchos casos, la eficiencia dentro de un valle no es tan baja como lo que se indica examinando los valores en el uso de agua en el campo o en proyectos individuales; la que escapa de los canales, de los sistemas de suministro y de la escorrentía de los puntos finales del sistema, a menudo se emplea directamente en áreas mas bajas o bien recarga el agua freática y luego se vuelve a bombear y se utiliza para el riego en otro lugar. La agricultura de regadío tendrá que reutilizar aguas de drenaje, residuales urbanas y otras salobres, todas de una calidad inferior a la óptima, a fin de mantener o aumentar la producción agrícola.

Los criterios de calidad de agua para riego fueron propuestos originalmente con el propósito de evitar la salinidad y los problemas de infiltración en un momento en que el agua dulce era suficiente y los proyectos de regadío comenzaban a desarrollarse. Estos criterios, por lo tanto, eran conservadores, rechazando aguas que en algunos casos pudieran ser perjudiciales. Los criterios originales de un peligro de salinidad (U.S. Salinity Laboratory Staff,

1954) afectaban a cualquier agua por encima de 0.25 dS/m de conductividad eléctrica (CE), con un alto peligro de salinidad por encima de 0.75 dS/m y un peligro muy alto por encima de 2.25 dS/m. Estos valores sugeridos son muy bajos y poco realistas, y generalmente se considera que las aguas con CE inferior a 1.0 dS/m de CE pueden utilizarse normalmente sin restricciones para cualquier cultivo. En la actualidad es conocido el hecho de que las aguas de muy baja salinidad pueden causar problemas de infiltración, ya que la dispersión y el hinchamiento de las arcillas del suelo están relacionados con la CE y con la relación de adsorción de sodio (RAS).

Probablemente el criterio más utilizado es el de Ayers y Westcot, (1985), el cual se expresa en la Figura 1.Se observa que a niveles bajos de CE, todas las aguas tendrían problemas de infiltración. El uso de aguas degradadas para el riego incluye aguas salinas, sódicas y con concentraciones potencialmente tóxicas de elementos, además de aguas con desequilibrios nutricionales y un pH frecuentemente elevado. Esto es especialmente importante en el uso de aguas depuradas, a causa del alto contenido y descomposición de la materia orgánica. Los efectos adversos de un elevado pH sobre conductividad hidráulica fueron demostrados por Suárez et al., (1984).

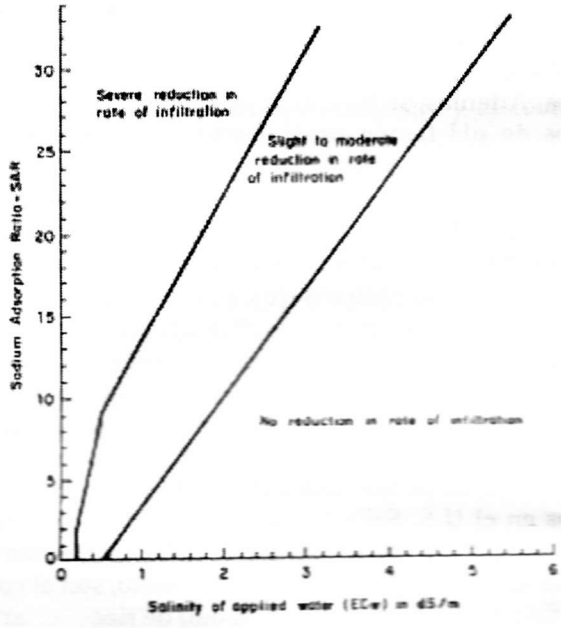


Figura 1 Impacto de salinidad y sodicidad sobre infiltración (tomado de Ayers y Westcot, 1985)

El uso de esta aguas depuradas después del tratamiento normalmente requiere prácticas especiales de utilización. En algunos casos, su uso constante no es una práctica sostenible y se requiere periódicamente de enmiendas o lixiviación o el uso cíclico de aguas de mejor calidad. Esto es especialmente importante donde se utiliza la rotación de cultivos, ya que generalmente éstos, de forma individual, tienen una tolerancia variable a la salinidad.

La consideración de condiciones específicas de un lugar, resulta en diferentes conclusiones con respecto a la utilización de distintas aguas para riego. Por ejemplo, en un estudio con secuencia de lluvia y agua de riego, Suárez et al. (2006) observaron una reducción en la infiltración a niveles bajos de RAS, la cual no es predicha con los criterios de las tablas. En la Figura 2 se observan reducciones a nivel de RAS=2 y sin diferencia en CE 1 y 2 dS/m. Otras recomendaciones menos conservadoras se harían con suelos arenosos, suelos con elevados concentraciones de materia orgánica u óxidos de hierro y lugares con valores bajos de ET etc.

Las aguas salinas, incluidas las de drenaje, han sido utilizadas en muchas regiones. Sin embargo, la mayoría de los usos no han sido desarrollados en el contexto general de un plan regional de manejo del agua. En una serie de experimentos de campo (Rhoades, 1984; Rhoades et al., 1988a; Grattan et

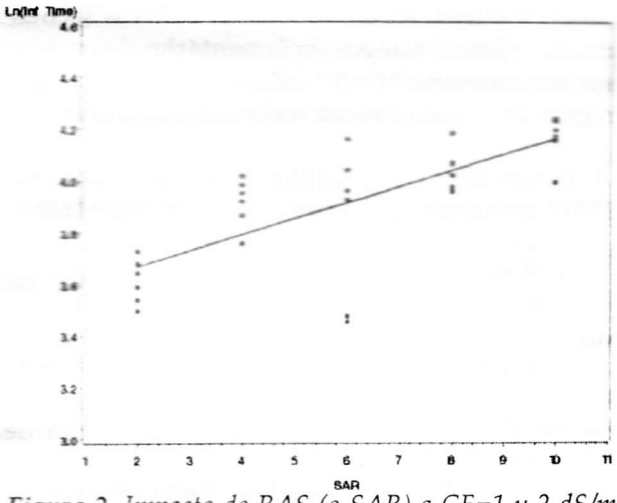


Figura 2. Impacto de RAS (o SAR) a CE=1 y 2 dS/m sobre infiltración en un sistema con aplicación de lluvia y riego en secuencia con intervalos de sequia (Suárez et al., 2006)

al., 1987), se demostró que el agua salina podía incorporarse en un sistema de cultivo típico que incluya cultivos sensibles y relativamente tolerantes a la salinidad.

Otro factor importante es la utilización de las tablas de tolerancia a salinidad. Las recomendaciones frecuentemente son para evitar la pérdida de rendimiento, así que si no se puede aumentar la fracción de lavado para reducir la salinidad, entonces se debe seleccionar otra planta más tolerante. En realidad muchas plantas con tolerancia a salinidad dan rendimiento óptimo inferior a las de mayor tolerancia. En un estudio con pastos, Grattan et al (2004) reportaron un rendimiento en alfalfa de 28 t/ha, wheatgrass 20 t/ha y kikuyo 18 t/ha a CE de 7.5 dS/m y cuando se cultivaron con una CE de 12.5 dS/m los riendimientos fueron 15, 17 y 15 t/ha, respectivamente. La alfalfa sería claramente la selección preferible, con mayor rendimiento y mayor valor comercial. Sin embargo, el rendimiento de alfalfa según las tablas de tolerancia es de un 70% a CE 7.5 dS/m y 25% a CE 12.5 dS/m, mientras que en wheatgrass el rendimiento es 100% a CE 7.5 dS/m y 90% a CE 12.5 dS/m.

Los modelos informáticos, tienen potencial como herramientas de utilidad para evaluar diversas prácticas u opciones si consideran las variables e interacciones necesarias. Modelos como UNSATCHEM demuestran su aplicabilidad a varios problemas de manejo de riego, incluido el uso de aguas dulces y salinas en un sistema de cultivos secuenciales, aplicando riegos suplementarios de un agua subterránea con alto contenido en boro y la recuperación de un suelo salino sódico.

El modelo UNSATCHEM (Suárez y Simunek, 1997) considera varios factores locales para la evaluación en cada lugar con sus condiciones particulares. El modelo predice satisfactoriamente cambios en el dióxido de carbono y en el contenido de agua del suelo a lo largo de un ciclo de cultivo cuando hay variaciones estacionales en la temperatura y en la distribución de las precipitaciones (Suárez y Simunek, 1993); además, predice la recuperación de un suelo salino sódico basado en la lixiviación y en la aplicación de yeso (Suárez, 2001). El modelo UNSATCHEM (Suárez y Simunek, 1997), presenta diversas características únicas: 1) predicción de concentraciones de CO_2 en la zona de las raíces, utilizando un modelo de transporte y producción, 2) predicción de los efectos de la química del suelo sobre las propiedades hidráulicas, 3) un modelo cinético para describir la disolución y precipitación de calcita, 4) uso del modelo de capacitancia constante para predecir el transporte de Boro. El modelo se basa en una versión modificada de la ecuación unidimensional de Richards para predecir el movimiento del agua y sales en condiciones variables de saturación.

Las propiedades hidráulicas del suelo no saturado, se describen por una versión modificada de aquellas propuestas por Van Genuchten (1980). Las funciones de conductividad hidráulica incluyen un factor nuevo; r, único en este modelo, es un parámetro de reducción que representa el efecto de la química del suelo sobre las propiedades hidráulicas, y carece de dimensiones. Para la mayoría de las simulaciones de manejo de riego es suficiente con elegir por defecto las características hidráulicas basadas en la textura del suelo (Carsel y Parrish, 1988) y ajustar el valor de la conductividad hidráulica saturada a aquellas del suelo en particular. Las condiciones químicas del suelo óptimas para la infiltración se representan por valores de r=1. Los niveles elevados del sodio intercambiable, especialmente en salinidad baja, dan como resultado hinchamiento de las arcillas expandibles, separación de partículas de arcilla, dispersión y posterior migración de ésta, bloqueo de los poros del suelo y reducción de la conductividad hidráulica. Además, se ha concretado que niveles elevados de pH tienen un impacto adverso sobre la conductividad hidráulica saturada, aparte de las interacciones de sodicidad y salinidad (Suárez et al., 1984). El modelo representa los efectos químicos sobre las propiedades hidráulicas y considera los efectos interactivos de CE, RAS, y pH, basado principalmente en los estudios y relaciones dados por McNeal (1968) y Suárez et al. (1984). Como los suelos responden en forma distint a estos factores, los valores específicos no son indicadores generalizados de predicción, aunque si representan las condiciones de los suelos de zonas áridas estudiados en el *U.S. Salinity Laboratory*. Otros factores, además de la sodicidad y del pH, que afectan la estabilidad de los agregados del suelo, son el contenido de materia orgánica, modo de riego, el laboreo, la cantidad y momento de las lluvias y el alcance de la cobertura del suelo.

El modelo químico realmente toma en consideración 9 componentes del agua, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, SO_4^{2-}, Cl^{-}, alcalinidad, NO_3^{-} y B. Se supone que todas las especies acuosas están en equilibrio tal y como se define en las expresiones y constantes de asociación de iones. El modelo también considera la absorción de agua por las raíces, y el efecto de salinidad sobre esa absorción Una expresión similar a la de salinidad se utiliza para el estrés de matriz, con constantes empíricas derivadas de la tolerancia al estrés hídrico de cada cultivo. Suárez y Simunek (1997) también presentan una aplicación generalizada del modelo de la constante de capacitancia para describir la adsorción y desorción de B, un factor importante para manejo de aguas elevadas en boro. Goldberg et al. (2000), presentan una predicción de las constantes del modelo para boro basado en propiedades conocidas del suelo.

EVALUACIÓN DEL MODELO-USO DE AGUA DULCE Y SALINA EN UN SISTEMA CÍCLICO

Rhoades et al. (1988a) describieron un ensayo de campo en el cual se utilizó para el riego agua procedente del rio Álamo del Valle Imperial, California, para sustituir agua del rio Colorado. El agua del río Álamo se deriva de los drenajes subterráneos de agua de cola y de vertidos operativos en el Distrito de Riego del Valle Imperial. Las fincas, hasta el momento del ensayo sólo habían sido regadas con agua del río Colorado. El experimento consideró una rotación de tres años de trigo, remolacha azucarera y melones cantaloup; esta rotación típica de los cultivos en ese periodo, se utilizó como herramienta de manejo de riego, para contrastar el modelo UNSATCHEM. El agua de drenaje es relativamente salina (CE 4.0 dS/m) y contiene un valor de SAR de 8.1. En este suelo arcilloso el drenaje es difícil y por lo tanto podrían existir problemas en la capacidad de lixiviar las sales, sobre todo cuando se aplica agua salina. El balance hídrico de los cultivos se presenta en la Tabla 1. El trigo inicialmente se plantó y germinó con agua del río (13.2 cm). Posteriormente se aplicaron 42.4 cm de agua de drenaje. La ET_p del cultivo fue estimado en 65.5 cm de agua, por lo tanto el cultivo estaba subirrigado, con un déficit hídrico estimado de 10 cm. Al ser un suelo arcilloso el almacenamiento de agua en el perfil podría haber compensado el déficit. No hay estimaciones independientes de los volúmenes de drenaje.

La simulación del UNSATCHEM se utilizó como entrada para las condiciones iniciales. En la Figura 3 se muestra la relación de la CE con el tiempo durante el ciclo de cultivo del trigo. Exceptuando el último valor a los 120 días, los demás valores se muestran en el punto medio en el tiempo entre riegos, con lo que los contenidos de agua son aproximadamente comparables. Consistentemente con la falta de riego, los niveles de salinidad aumentaron en la zona radicular a lo largo del tiempo y hubo poca migración del frente salino a mayor profundidad. Al final del ciclo, las condiciones son más secas y por lo tanto la CE del agua del suelo era aún mayor. Estos valores de CE del agua del suelo son los que experimenta el cultivo. La expresión de los datos de la CE en términos del extracto mostraría un aumento menor para el último intervalo de tiempo.

La predicción del rendimiento relativo fue de 0.98, de acuerdo con las observaciones de Rhoades et al. (1988a) donde no se encontró reducción en rendimiento de trigo con relación al control cuando se utilizaba esta secuencia de riego con agua dulce y salina. El modelo predice que se obtiene una cosecha completa del potencial total con un manejo del riego como se ha descrito. También predice que la influencia del agua salina en este momento se extiende hasta 140 cm, pero el perfil se salinizó significativamente y continuó aumentando su salinidad debido a la falta de lixiviación desde la zona radicular.

Al segundo cultivo que se le aplicó la simulación fue la remolacha azucarera. Hubo una lixiviación

Tabla 1. *Balance hídrico (cm)*

	Agua del Río Colorado	Drenaje	Total	ET_p
1982 Trigo	13.2	42.4	55.6	65.5
1983 Remolacha azucarera	44.7	80.0	124.7	102.9
1983 Melón	62.7	0	62.7	42.7

Fuente: (Rhoades et al., 1988b)

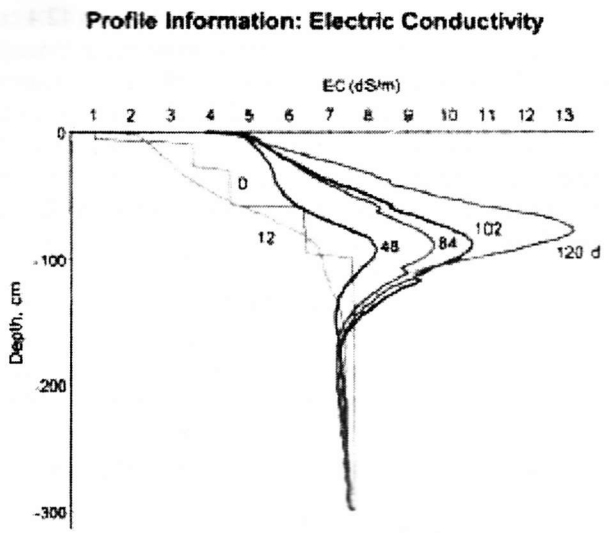


Figura 3. Relación entre la CE y la profundidad (depth) a lo largo del tiempo (días), para una simulación de cultivo de trigo utilizando una secuencia de 13.2 cm de agua dulce y 42.4 cm de agua de drenaje.

inicial del suelo hasta 80 cm de profundidad como consecuencia de la aplicación de agua dulce en exceso a la evapotranspiración (ET). Tras la aplicación de agua de drenaje, empezando el día 79, hubo un aumento en la salinidad, pero no aumento adicional en salinidad en la zona radicular después del día 119. Las condiciones en la zona radicular el día 150 representan cambios del contenido de agua más que aumentos en el contenido de sales. A pesar de haber aplicado un riego suficientemente superior a la ET de este cultivo, la salinidad se mantuvo constante durante el ciclo de cultivo. De acuerdo con el régimen de riego, el frente de sal emigra hacía los drenes. El modelo predecía un rendimiento relativo de 0.98 también en concordancia con las observaciones de Rhoades et al. (1988a), en las cuales no hubo ninguna reducción en el rendimiento de la remolacha azucarera con relación al testigo utilizando agua del Río Colorado.

La predicción de pérdida de agua en los drenes durante el ciclo de cultivo de la remolacha azucarera fue de 17 cm, de acuerdo con la aplicación de campo de 22 cm de agua por encima de la evapotranspiración. Los valores medidos de CE en el extracto, se convirtieron a la CE del agua del suelo multiplicando por un factor de 1.5, para corregir los cambios en el contenido del agua.

La Figura 4 muestra una buena relación entre la CE medida (Rhoades et al., 1988b) y la CE predicha por el modelo en la zona radicular después de dos años, al final del experimento con la remolacha azucarera. Las diferencias entre la predicción de los modelos y las medidas observadas pueden ser el resultado de las suposiciones realizadas acerca de la distribución de densidad de raíces con la profundidad. Esta simulación se hizo con una distribución trapezoidal estándar, ya que la distribución de densidad de raíces no fue aportada en el experimento de campo. A pesar de los limitados datos de entrada y la ausencia de optimización de los parámetros, el modelo pudo predecir volúmenes de drenaje y concentraciones de sales medidas sin observarse una pérdida de rendimiento.

Un factor importante con respecto al criterio para riego es el impacto de la lluvia, tanto frecuencia como cantidad. El criterio asume solamente la calidad del agua, sin considerar la interacción con lluvias. En climas mediterráneos las lluvias ocurren durante el invierno, así que la transición entre riego y lluvia es un evento. En otros climas, como en las Grandes Llanuras de Estados Unidos, la lluvia ocurre intercalada con los eventos de riego.

Los niveles tóxicos de B en agua de drenaje son una de las mayores limitaciones en la reutilización del agua de drenaje en el oeste de los Estados Unidos. Como ya se mencionó anteriormente, existe la

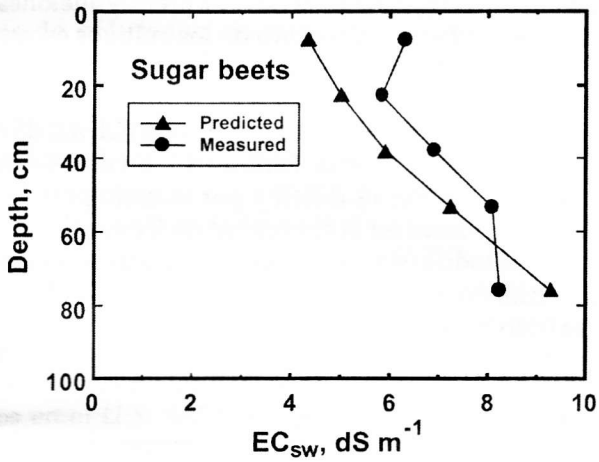


Figura 4. Comparación de salinidad predicha (predicted) y observada (measured) con la profundidad (depth) tras dos años de cultivo con uso secuencial de agua dulce y de drenaje en cultivo de remolacha (sugar beet).

necesidad de desarrollar prácticas de manejo para el uso de esta agua. Los siguientes ejemplos (Suárez, 2002) demuestran la capacidad de predicción del modelo y su utilidad como herramienta de manejo.

Los resultados de los experimentos utilizando columnas con suelo Pachappa fueron obtenidos utilizando el modelo UNSATCHEM 3.1 (Suárez, 2002), para absorción y desorcion a varios pH. El modelo pudo predecir con mucha precisión la curva descrita para Cl^- y B. El ajuste es muy satisfactorio considerando que no hubo optimización de parámetros para este suelo, basado en datos o medidas relacionadas, siendo la única variable específica del suelo el área superficial medida.

El uso del modelo para el manejo del agua cuando se riega con agua alta en B se demuestra con el siguiente ejemplo (Suárez, 2002), suponiendo que se dispone de una cantidad limitada de agua de alta calidad o que existe una pluviometría baja, y que la de alta calidad debe complementarse con agua de baja. Aunque el agua de baja calidad a menudo no puede utilizarse para la producción agrícola sostenible, se puede utilizar de forma cíclica, con otra de mayor calidad, recuperándose el suelo periódicamente a través del lavado, o estas aguas pueden utilizarse en parcelas distintas en cultivos de tolerancia variable. Este concepto puede extenderse al uso de agua con alto B. Se pueden hacer predicciones, según el modelo, en términos de salinidad y composición del suelo incluyendo B (si está disponible) y rendimiento relativo del cultivo.

El agua de drenaje de la vertiente oeste del Valle Central de California utilizada para el riego contiene entre 0.4 a 0.8 mmol L^{-1} de B y una CE de 8-14 dS/m. En estas simulaciones se seleccionó una concentración de B de 0.8 mmol L^{-1}, suponiendo una distribución radicular homogénea y un consumo de agua uniforme en una zona radicular de 50 cm. El perfil del suelo estuvo inicialmente libre de B.

Para la simulación el valor de ET introducido en el modelo fue de 1 cm/día, con riegos que correspondían a una aplicación media de 2 cm/día (fracción de lixiviado de 0.5), resultando un total de 200 cm de agua a lo largo del ciclo de cultivo de 100 días. Se tomó un área superficial del suelo de 100 m^2/g, que corresponde a un suelo con una capacidad de absorción de B relativamente baja. Un lavado elevado y una baja capacidad de absorción de B dan como resultado un movimiento de éste en el suelo con relativa rapidez. Se establece un perfil de estado casi estacionario en la zona de las raíces, tras 80 días con una concentración máxima de 1.6 mmol/L. La concentración por debajo de la zona radicular es al final constante con un valor de 1.6 mmol/L.

Se realizó otra simulación similar a la que se ha descrito, pero en este caso el suelo tenía alta capacidad de absorción de B (Suárez, 2002). La cual da como resultado un frente de B más inclinado y un movimiento más lento en el perfil del suelo. Este perfil sigue estando muy lejos del estado estacionario a pesar de los 100 días de riego. Las concentraciones de B son significativamente más bajas que aquellas del primer caso.

Las simulaciones siguientes corresponden a las anteriores excepto que ahora la fracción de lixiviación es de 0.1. Tras 100 días el perfil aún no está en un estado estacionario y el frente B está precisamente llegando a la profundidad de 100 cm. La concentración máxima de B en el suelo llegará finalmente a 8.0 mmol/L. La simulación final es para una fracción de lixiviado de 0.1 y área superficial alta. Después de 100 días, el frente de concentración B se extiende tan solo a 25 cm y la concentración máxima es de sólo 0.80 mmol/ L, mucho menor que el valor del estado estacionario de 8.0 mmol/L, y ligeramente por encima de la concentración de B en el agua de riego. De acuerdo con un área superficial alta, y por lo tanto con un alto número de lugares de adsorción y así, con un gran número de puntos de absorción, la línea del frente de concentración es relativamente inclinada.

En la Figura 5, se presentan las concentraciones medias de B en la zona radicular, para cada una de las cuatro simulaciones, (Suárez, 2002). Las simulaciones indican que para un suelo con una alta sensibilidad hay poco riesgo de B durante el primer ciclo de cultivo. El suelo con un lavado alto y una elevada área superficial presentó una concentración de B más alta en la zona radicular durante todo el ciclo de cultivo. En este estado estacionario, un manejo con menos lavados presentaría al final concentraciones de B sensiblemente más altas que en el suelo donde el lavado era mayor. Sin embargo, el sistema se puede controlar en un estado de transición continua. En este caso, la práctica de manejo recomenda-

da (en ausencia de consideraciones de salinidad) sería la de aplicaciones mínimas de agua. La concentración media de B en la zona radicular sería lo suficientemente baja como para que la mayoría de los cultivos pudieran cultivarse sin pérdida de rendimiento. Un manejo sostenido requeriría lluvias de invierno o bien el lavado con agua de mejor calidad.

Tal y como se muestra en la Figura 5, en los suelos con un área superficial baja, la concentración de B en la zona radicular aumenta rápidamente tanto con un lavado alto como con uno bajo. Al principio de la temporada el uso de un lavado bajo da como resultado menor cantidad de B en la zona radicular, ya que no se alcanzan los valores de estado estacionario. Alrededor del día 70 hay una variación en el manejo de la fracción de lavado baja, teniendo como resultado mayores concentraciones de B en la zona radicular. En este caso, parece preferible la elección de un lavado bajo, al menos al principio de la temporada de riego y especialmente si la sensibilidad al B es mayor durante las primeras etapas del crecimiento. Para los suelos con un área superficial baja, la mayoría de los cultivos tendrían una reducción significativa de rendimiento debido a la toxicidad del B.

CONCLUSIÓN

El uso de aguas degradadas o salinas requiere reevaluación de los criterios de calidad de agua para riego. El modelo UNSATCHEM pudo predecir los resultados de un uso cíclico de agua salina y dulce para el riego de trigo y remolacha azucarera sin pérdida de rendimiento. Además se demuestra la utilidad del modelo en el manejo del riego cuando se utilizaron en escenarios temporales, aguas con altos niveles de B, especialmente para aquellos suelos que adsorben fuertemente el B. La singularidad de cada caso individual hace que la generalización de los resultados sea difícil y sugiere la necesidad de modelar enfoques para manejar suelos salinos y degradados y agua para el riego.

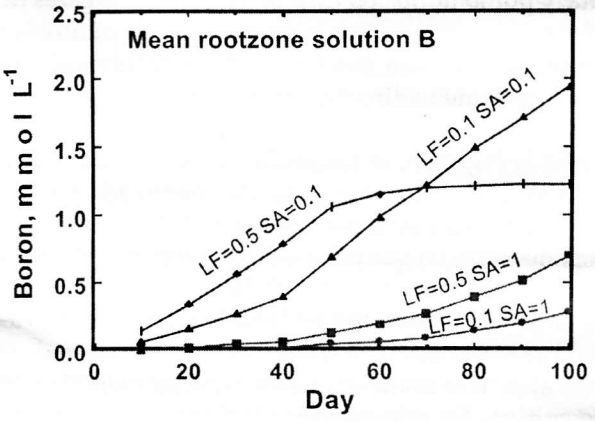


Figura 5. Concentración media de boro de la solución de suelo de la zona radicular (Mean rootzone solution B) con el tiempo relacionado con la fracción de lavado (LF) y área superficial del suelo (SA) expresada en 10^3 m^2/g (Suárez, 2002).

BIBLIOGRAFÍA

AYERS, R.;WESTCOT. 1985. Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev.1 FAO. Rome 174pp.

CARSEL, R.F.;R.S. PARRISH. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research. 24: 755-769.

GOLDBERG, S.; S.M. LESCH; D.L. SUÁREZ. 2000 Predicting boron adsorption by soils using soil chemical parameters in the constant capacitance model. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1356-1363.

GRATTAN, S.R.; C. GRIEVE; J. POSS; P. ROBINSON; D.L.SUÁREZ; S.E. BENES. 2004. Evaluation of salt-tolerant forages for sequential water reuse systems. Agric. Water Manage.70: 109-120

GRATTAN, S.R.; C. SHENNAN; D. MAY; J. MITSHELL; R. BUREAU. 1987. Use of drainage waters for irrigation of melons and tomatoes. Calif. Agric. 41: 27-28.

MCNEAL, B. L. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. Soil Science Society of America Proceedings 32: 190-193.

RHOADES, J. 1984. Use of saline water for irrigation. Water Quality Bulletin 12: 14-20.

RHOADES, J.;F. BINGHAM; J. LETEY;A. DEDRICK; M. BEAN; G. HOFFMAN; W. ALVES; R. SWAIN; P. PACHECO; R. LEMERT. 1988a. Reuse of drainage water for irrigation: Results of Imperial

Valley Study I. Hypothesis, experimental procedures and cropping results. Hilgardia 56: 1-16.

RHOADES, J.; F. BINGHAM; J. LETE; P. PINTER; R. LEMERT; W. ALVES; G. HOFFMAN; J. REPOGLE; R. SWAIN; P. PACHECO. 1988b. Reuse of drainage water for irrigation: Results of Imperial Valley Study II. Salinity and water balance. Hilgardia 56: 17-44.

SUÁREZ,D.L. 2001. Sodic soil reclamation: Model and field study. Aust. J. of Soil Res. 39: 1225-1246.

SUÁREZ,D.L. 2002. Evaluation of management practices for use of low quality waters for irrigation: Model simulations. In Proceedings, Meeting of International Union of Soil Scientists, August 14 -21 Bangkok, Thailand, Symposiums No. 34. 1096: 1-8.

SUÁREZ, D. L.; J.D. RHOADES; R. LAVADO; C.M. GRIEVE. 1984. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. Soil Sci. Soc. Am. J 48: 50-55.

SUÁREZ, D.L.; J. SIMUNEK. 1993. Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 2. Parameter selection, sensitivity analysis and comparison of model predictions to field data. Water Resources Res. 29: 499-513.

SUÁREZ, D.L.; J. SIMUNEK. 1997. UNSATCHEM: Unsaturated water and solute transport model with equilibrium and kinetic chemistry. 61: 1633-1646.

SUÁREZ, D.L.;J.D. WOOD; S.M. LESCH. 2006. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. Agric. Water manage. 86: 150-164.

U.S. SALINITY LABORATORY STAFF. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No. 60. U.S. Dept. of Agriculture. Washington D.C.

VAN GENUCHTEN, M. TH. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 892-898.

COMISIÓN I - FERTILIDAD

USO DE LAS BASES DE DATOS EN LA CALIBRACIÓN E INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS DE SUELOS. CASO CAFÉ

USE OF DATA BASES IN CALIBRATION AND INTERPRETATION OF SOIL TESTS

*Francisco E. Restrepo Higuita**

RESUMEN

Los análisis de suelos son un importante instrumento para ajustar las recomendaciones de dosis y fórmulas de fertilizantes de modo que la fertilización resulte más económica, pero además deben propender por la sostenibilidad ambiental. Para ello es indispensable que dicho instrumento esté debidamente calibrado de modo que su interpretación sea adecuada. En el caso del café, esa calibración detallada se dificulta, especialmente debido a la gran heterogeneidad de los suelos cafeteros del país, la mayoría de los cuales son jóvenes y no han alcanzado su madurez, por lo cual conservan muchas de las propiedades heredadas del material parental. En ese sentido cobra vital importancia el uso de las bases de datos de los laboratorios de suelos, compiladas por regiones fisiográficas y por cultivo. Para el cultivo del café en Antioquia, se han procesado más de cincuenta mil muestras para análisis de suelos que han permitido caracterizar la zona cafetera antioqueña. De acuerdo con esa caracterización, existe alta probabilidad de respuesta del café a las aplicaciones de correctivos de acidez, así como a las enmiendas orgánicas, al nitrógeno, potasio, calcio y magnesio como nutrimentos, mientras que la probabilidad de respuesta al fósforo y al azufre es media. En relación con los micronutrimentos, sólo se tiene alta probabilidad de respuesta a la aplicación de boro. Con el análisis de la base de datos se han venido ajustando las recomendaciones de fertilizantes basadas en el programa de interpretación de análisis de suelos para café en Antioquia.

Palabras claves: suelos, fertilidad, fertilización, bases de datos, análisis, café.

ABSTRACT

Soil tests are an important tool to provide the best economic dose and grades of fertilizers, but they must also propend to environmental sustainability. If an accurate interpretation process is to be made, it is a requisite that a good calibration has been achieved. For coffee crops in Colombia, this calibration is particularly difficult, as soils from coffee-growing regions are quite heterogeneous; most of them are young soils, which have not reached maturity and still exhibit many properties they have inherited from their parent materials. Under these conditions, soil data base analysis, compiled from physiographic regions and for specific crops, play an important role. Over fifty thousand soil tests processed to date provide information that is quite useful to characterize coffee-growing regions in the department of Antioquia (Colombia). Based on this characterization, it can be said that there's a high probability to obtain response to liming practices, as well as organic amendments, and to nitrogen, potassium, calcium and magnesium applied as nutrients, while there's a medium-range probability to obtain response to phosphorus and sulfur. Regarding to micronutrients, it can only be expected to obtain response to boron applications. Data base analysis has become quite an useful tool to adjust recommendations for coffee crop, based on the interpretation program developed in Antioquia.

Key words: Soils, fertility, fertilization, soil tests, summary, data base, coffee crop.

* Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Calle 49 N° 50 – 21. Medellín, Colombia. Correo electrónico: francisco.restrepo@cafedecolombia.com

INTRODUCCIÓN

Para lograr ser competitivo en negocios agrícolas, es necesario fertilizar los cultivos de una manera racional, efectiva y segura, de manera que se logre además la sostenibilidad ambiental y económica del sector agrícola. Para estos fines, los análisis de suelos se convierten en un importante instrumento para encontrar las dosis y fórmulas de fertilizantes más económicas. No obstante, para que el instrumento del análisis de suelos cumpla su cometido, es indispensable que esté debidamente calibrado lo cual garantizará que su interpretación sea adecuada (Lazcano–Ferrat 2005).

Para el caso de la caficultura colombiana, esta calibración detallada se dificulta por varias razones, especialmente debido a la gran variabilidad que presentan los suelos de la zona cafetera. Gran parte de ellos no han alcanzado el equilibrio con el medio ambiente o *madurez del suelo*. La mayoría son suelos jóvenes pertenecientes a los órdenes Inceptisol, Entisol y Andisol, en los cuales las propiedades heredadas del material parental juegan aún un papel fundamental en la determinación de las propiedades químicas, físicas y biológicas. En consecuencia, el análisis de las características heredadas de la roca madre es indispensable para la definición del uso potencial y de las prácticas de manejo adecuadas para cada tipo de suelo (Schaufelberger 1962, Suárez y Restrepo 2003).

En este sentido, Lazcano–Ferrat (2005) sugiere que los servicios de análisis de suelo deben calibrar sus análisis de acuerdo con la clasificación del suelo, por lo menos por unidades o grupos de manejo, para estimar el estado de los nutrimentos poco móviles en el suelo, tales como el P y el K. Esto es especialmente importante en lugares en donde las condiciones del subsuelo permiten que las raíces de las plantas crezcan a profundidad en el perfil y puedan extraer los nutrimentos disponibles que se encuentran ahí.

Para hacer frente a esta situación y anticipándose a estas recomendaciones, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia realizó los estudios generales de zonificación y uso potencial de los suelos de la zona cafetera con base en el concepto de ***unidad de capacidad*** (FNC 1992, 2000, 2001). Bajo esta categoría se agrupan suelos que se han desarrollado a partir de un mismo material parental, y que son tipificados por uno o varios perfiles modales, de acuerdo con el grado de evolución del suelo o de meteorización del material parental de esa *unidad*. En forma paralela con la definición de las unidades de capacidad, se ha adelantado la clasificación taxonómica de los perfiles descritos en los estudios hasta el nivel de *sub-grupo*, de acuerdo con el sistema internacional (Soil Survey Staff 1999).

La caficultura de Antioquia está ubicada en las cordilleras occidental y central, donde predominan materiales ígneos y metamórficos. Basaltos, dioritas, andesitas, esquistos, cuarzo dioritas y grano dioritas son los materiales parentales de más común ocurrencia. En la vertiente del Río Cauca, sobre ambas cordilleras, se presentan también importantes áreas de suelos derivados de materiales volcánicos (cenizas y aglomerados sedimentario – volcánicos). La diversidad de materiales parentales y condiciones ambientales dan origen a situaciones muy diversas de fertilidad natural y de productividad de los suelos cafeteros, que se ven reflejadas por supuesto en las respuestas del cultivo a las distintas prácticas de manejo, de manera particular a la fertilización (FNC 1992, 2001; Suárez y Restrepo 2003). Por estas razones, es necesario hacer una caracterización de las muestras de suelos obtenidas en cada "Unidad de manejo", o provenientes de cada tipo de material parental de interés.

VALIDEZ DE LAS BASES DE DATOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Acerca del valor de las bases de datos de análisis de suelos han surgido una serie de cuestionamientos sobre si representa o no la fertilidad real de los suelos. Entre estos factores que podrían afectar la validez de las bases de datos de análisis de suelos están:

- Que las muestras son suministradas por los mejores agricultores. ¿Esto tendería a sesgar los resultados hacia una mayor fertilidad? En los estudios realizados se ha llegado a la conclusión de qu aunque se detectan algunas diferencias entre las muestras enviadas por los mejores agricultores y las tomadas aleatoriamente (especialmente en potasio), tales diferencias no son significativas y no ponen en duda la validez de las bases de datos (Donohue 1987).

- La inclusión de muestras "problema", o de investigación por algún síntoma de deficiencia o efecto particular. ¿Esto inclinaría los resultados hacia una menor fertilidad? Sin embargo, las muestras de suelo – problema normalmente son muy pocas frente al total de muestras de un laboratorio. En algunas investigaciones en el laboratorio de suelos de Virginia – USA, sobre una población total de más de 100.000 muestras, se encontró que menos del 2% correspondía a "muestras problema", y que esta pequeña proporción no afectaba significativamente la base de datos (Donohue 1987).

  En el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional en Medellín también se reciben algunas muestras – problema, o muestras de investigación. Sin embargo, éstas no distorsionan la base de datos, puesto que son muy pocas y se almacenan en un archivo independiente como "Muestras de investigación". Algo similar sucede con las muestras de investigación recibidas en el Comité de Cafeteros de Antioquia, de modo que en la base de datos, éstas no se consideran. En todo caso se descartan valores extremos que no puedan ser explicados en condiciones normales de cultivo.

- Compendios de datos sobre diferentes regiones fisiográficas. Si las diferentes regiones fisiográficas presentan distintas propiedades de suelos, esto puede desequilibrar los resultados. Donohue (1987) plantea que cuando entre las regiones los materiales parentales son muy diferentes, para tener un diagnóstico más acertado de la fertilidad de los suelos, es necesario separar las bases de datos por regiones fisiográficas. Se han detectado grandes diferencias en la evaluación de varias características del suelo, especialmente en valores de pH, M.O., P, K, Ca y Mg disponibles, los cuales están muy relacionados con el material parental del suelo y con los contrastes que se registran en sus condiciones climáticas, como se verá más adelante.

- Elaboración de bases de datos sobre diferentes cultivos. Muestras que son tomadas de cultivos fertilizados y encalados de forma diferente podrían distorsionar los datos, puesto que los diferentes elementos tendrían distintas tendencias, de acuerdo con los niveles de fertilización recibidos. Es claro que deben esperarse grandes diferencias entre resultados de análisis de suelos tomados para maíz frente a otras tomadas en pasturas nativas, que nunca se han fertilizado, o en cultivos de flores que generalmente han recibido fertilizaciones intensas. Por tanto, es indispensable separar los datos para cada cultivo individual.

- Muestreo de suelos en diferentes épocas del año. En la zona templada, por la influencia de las estaciones, los niveles de P, K y el pH del suelo, tienden a variar durante el año, lo cual puede afectar los resultados de los análisis. Sin embargo, si la proporción relativa de las muestras de suelo recibidas en otoño y en primavera es similar de año a año, esto no tendría influencia significativa en los compendios (Donohue 1987). No obstante, en la zona tropical, sin influencia de las estaciones, este efecto no se presenta, ya que las variaciones son debidas fundamentalmente a las fertilizaciones realizadas a los cultivos y la extracción de los mismos.

- Otros factores adicionales que pueden influir sobre las bases de datos, podrían ser, entre otros: la variación año a año de los niveles de los elementos en el suelo, las diferencias climáticas dentro de una región, las muestras tomadas de tierras arrendadas a corto plazo, la recolección de muestras no representativas por los agricultores, uso de promedios y medianas en los análisis, y diferencias en los métodos de análisis y calibraciones en los laboratorios de las distintas regiones. Con relación a las variaciones anuales, Sadeghian (2003) reporta grandes cambios en pH, P, K y Mg, debido a las aplicaciones de P, K y Mg a suelos cultivados en café. Por su parte, Cardona y Sadeghian (2005) reportan cambios significativos originados por la cantidad y distribución de las lluvias en dos regiones contrastantes.

  Sin embargo, el efecto de tales factores puede ser minimizado, separando los datos por regiones y/o por material parental, expresando las tendencias por categorías de "Bajo", "Medio" y "Alto" para cada elemento, y expresando el método de extracción de cada uno, en general.

USO DE LAS BASES DE DATOS DE ANÁLISIS DE SUELOS

Los dos usos de mayor importancia son: 1) La evaluación de las recomendaciones de fertilizantes

y enmiendas, y 2) Para fomentar el uso adecuado de fertilizantes y enmiendas. A partir de estos dos aspectos se desprenden otros de igual importancia.

El primero de los usos citados permite mejorar la calibración y afinar la interpretación de los análisis de suelos tomados para cualquier cultivo en una región determinada. Pueden hacerse comparaciones entre distintos años, para ver cómo evolucionan las condiciones del suelo y las necesidades de fertilizantes y enmiendas. En el segundo caso, los resultados obtenidos pueden ser usados en los programas de extensión que propendan por la sostenibilidad ambiental y económica de la producción agrícola, mediante el uso de herramientas de este tipo.

BASE DE DATOS DE ANÁLISIS DE SUELOS PARA CAFÉ EN ANTIOQUIA

Desde finales de la década de 1980, la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia inició una campaña de promoción de los análisis químicos de suelos, tendiente a racionalizar las aplicaciones de fertilizantes y enmiendas en el cultivo del café.

Las muestras se han procesado en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Hasta la fecha se han procesado en Antioquia más de cincuenta mil análisis de fertilidad (pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al y Textura) y más de mil quinientas muestras para análisis de micronutrimentos (Fe, Mn, Cu, Zn y B). La identificación de las muestras permite analizarlas separadamente para cada una de las unidades de manejo del suelo. No obstante, cuando no se ha identificado adecuadamente el material parental del cual proviene una muestra, éste se clasifica en el grupo de "Unidad desconocida", de modo que no se distorsione la información. Además, los análisis se separaron para cada una de las principales regiones cafeteras del departamento: Suroeste, Occidente, Norte – Nordeste y Oriente. La distribución porcentual por rangos de las distintas variables, presenta tendencias similares entre las distintas regiones. No ocurre lo mismo con las distintas "Unidades de manejo". De manera general, puede señalarse que:

- El 68% de las muestras presentan valores de pH (En agua 1: 1 vol.) inferior a 4.9 para las distintas regiones, con la excepción del Occidente, donde cerca del 44% de las muestras tienen pH inferior a 4.9. Cenicafé señala como "adecuado" para café el rango 4.9 – 5.5 (Valencia 1999), al cual apenas corresponde un 26.4% de las muestras. La fuerte acidez es un rasgo distintivo de los suelos cafeteros de Antioquia. Esto sugiere que la práctica del encalado puede ser recomendable para café. No obstante, entre las unidades de suelos sí existen grandes diferencias (Figura 1, Figura 2).

- En relación con la materia orgánica (Walkley y Black), cerca del 40% de las muestras analizadas

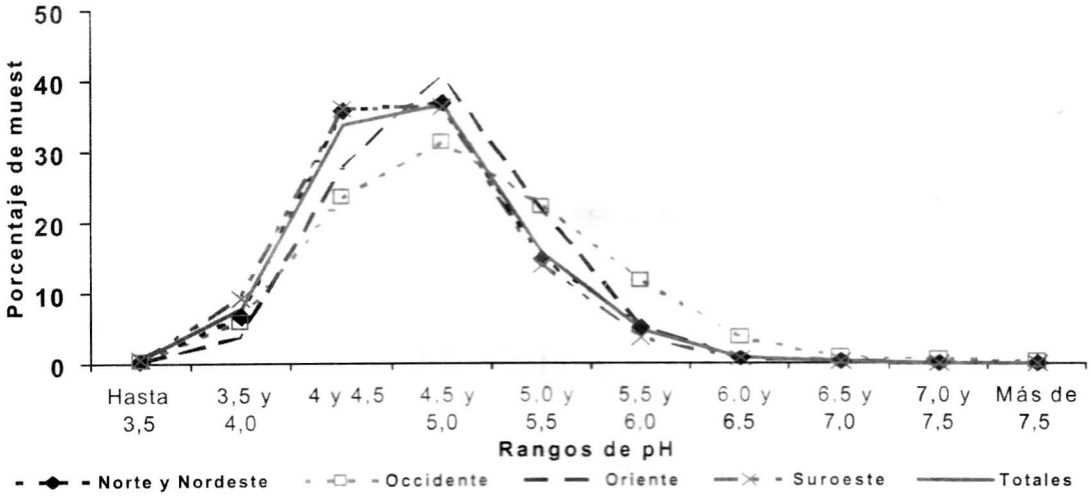


Figura 1. Valores de pH de los suelos de las distintas regiones cafeteras de Antioquia.

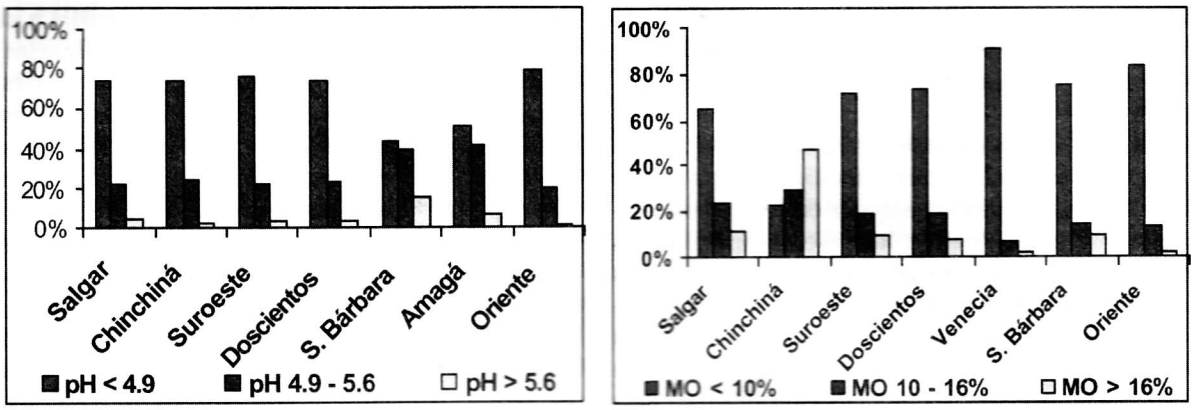


Figura 2. *Distribución del pH y la MO en muestras de suelo de distintas unidades de manejo.*

están en el rango de 4 - 8%, mientras que un 12.5% presentan contenidos inferiores al 4%. El 73.3% de las muestras tiene M. O. inferior a 12%, y sólo un 26.7% del total de muestras superan dicho valor, considerado "adecuado" para café (Valencia 1999). Este bajo contenido de M. O. tiene implicaciones obvias en el suministro de N a las plantas. Entre regiones, los niveles más bajos se presentan en los suelos del Occidente y los del Norte - Nordeste, en contraste con el Suroeste, donde se concentra la mayor proporción de suelos derivados de materiales volcánicos, en los cuales se favorece la acumulación de M. O. (Soil Survey Staff 1999), y más del 47% de las muestras de Unidad Chinchiná (Derivado de cenizas volcánicas) registran niveles superiores al 12% (Figura 2).

- En cuanto al fósforo (P Bray II), Cenicafé sugiere que el nivel crítico para cafeto está en el rango de 6 a 14 mg kg^{-1} (Valencia 1999). Sólo el 19.1% de las muestras evaluadas están en esta categoría. Un número muy apreciable de muestras (casi un 40% del total) está por debajo de 4 mg kg^{-1}, mientras que un 14% supera el nivel de 100 mg kg-1. Todas las regiones del departamento presentan una distribución muy similar de los niveles de fósforo disponible. No ocurre lo mismo con las unidades de suelo, entre las cuales hay grandes diferencias. Se destacan por su bajo contenido las unidades Oriente (derivada de grano diorita) y Chinchiná, mientras que las de mayores niveles de P son Salinas (Cuarzo diorita), Salgar (Esquistos arcillosos), Peñol (Cenizas volcánicas) y Doscientos (derivada de Basalto augítico) (Figura 3).

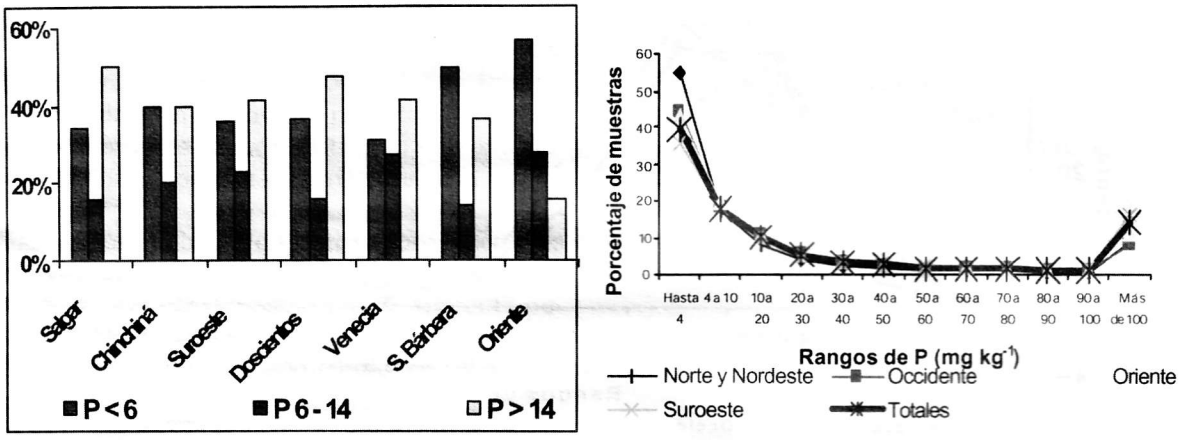


Figura 3. *Distribución del contenido de fósforo por unidad de suelos y regiones cafeteras de Antioquia.*

- Para el potasio, la investigación de Cenicafé sugiere que los niveles "adecuados" para el cafeto están entre 0.29 y 0.41 $cmol_c\ kg^{-1}$ (Valencia 1999). El 16.2% de las muestras del departamento están dentro de esta categoría, mientras que el 37.8% están por encima del rango y el 46% están por debajo. El 13.7% de las muestras superan el nivel de 0.88 $cmol_c\ kg^{-1}$, considerado tope por encima del cual no hay respuesta a las aplicaciones de potasio. Sin embargo, entre las distintas unidades de manejo se detectan grandes diferencias. Los contenidos más bajos están en las unidades: Oriente, Aures (Esquisto moscovítico cuarzoso) y Abejorral (Pizarras), todas ellas ubicadas en la región del oriente Antioqueño. En tanto que las que registran contenidos más altos son Salgar, Suroeste (aglomerados) y Doscientos, predominantes en el suroeste de Antioquia, y posiblemente se deben a las aplicaciones sucesivas de fertilizantes ricos en K (Figura 4).

- El calcio intercambiable (Ac-NH_4 1M pH 7) presenta también una distribución similar entre regiones. Dentro del rango "adecuado" que reporta Cenicafé (1.6 a 4.2 $cmol_c\ kg^{-1}$) (Valencia 1999) se ubica un 28.7% del total de registros. Los niveles más bajos se encuentran en Norte–Nordeste y Oriente, donde se presenta la mayor precipitación (PPT > 3000 mm) y donde el material parental predominante es la granodiorita (más del 50% de las muestras tienen menos de 1.0 $cmol_c\ kg^{-1}$). Como contraste, los suelos del Occidente presentan los mayores niveles de calcio intercambiable (46% de las muestras están por encima de 4.2 $cmol_c\ kg^{-1}$). Esto confirma lo discutido sobre la necesidad de usar enmiendas calcáreas, pero permite así mismo aclarar que para la región del occidente esta práctica debe hacerse con especial cuidado. En cuanto a las unidades, por sus bajos contenidos se destacan Oriente y Chinchiná, mientras la unidad Amagá (de una diorita anfibólica) es la de mayor contenido de Ca.

- En relación con el magnesio (Ac-NH_4 1M pH 7), cerca del 20% de las muestras presentan contenidos en el rango de 0.5 a 0.9 $cmol_c\ kg^{-1}$, considerado "adecuado" (Valencia 1999). Pero el 37% están por debajo de 0.5 y el 43% de las muestras supera el nivel de 0.9 $cmol_c\ kg^{-1}$. Al igual que con el calcio, el Occidente muestra los mayores niveles de magnesio, mientras que los más bajos se observan en el Oriente y en el Norte-Nordeste. Se ve también que la práctica del encalado es recomendable, pero con énfasis en fuentes de magnesio, y que debe prestarse especial atención a las regiones de Oriente, Norte-Nordeste y a las unidades Chinchiná y Oriente (Figura 4).

- Los reportes de Cenicafé y de la literatura mundial señalan como adecuada una relación Mg: K cercana a 2 (Valencia 1999, Suárez y Restrepo 2003). En un 48% del total de muestras esta relación es mayor que 2, mientras que en un 26% dicha relación es menor que 1. Bajo la primera condición pueden presentarse problemas con el

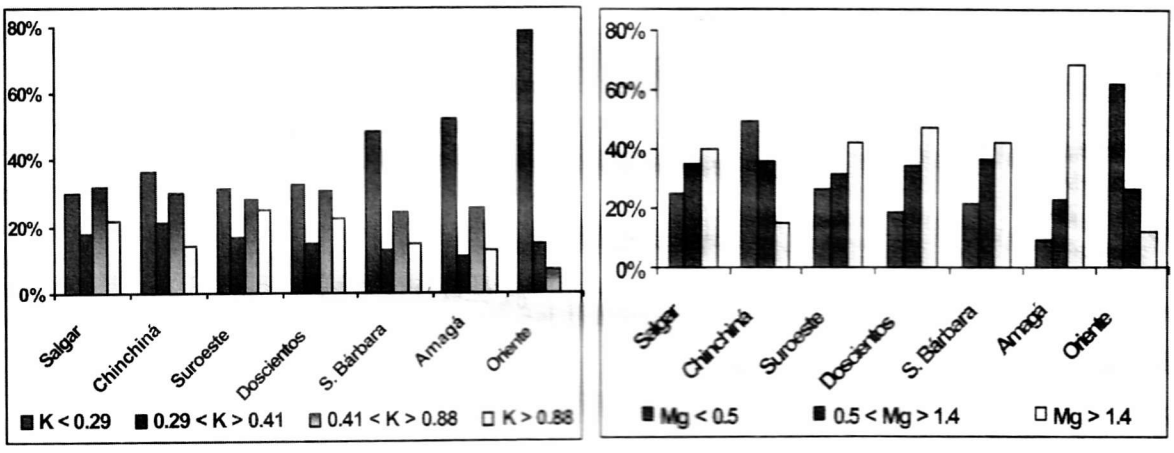


Figura 4. Distribución del contenido de K y de Mg en las distintas unidades de suelos de Antioquia.

suministro de potasio, y en el segundo escenario, problemas de deficiencia de magnesio. Entre regiones, el Occidente muestra un mayor exceso relativo de magnesio, y el Oriente de potasio, dado el material parental dominante en cada región, serpentinas en el occidente y cenizas volcánicas y granodioritas en el oriente.

- Como es de esperar, el aluminio intercambiable muestra una tendencia parecida a la del pH del suelo. Los menores niveles se observan en el Occidente, región que registra a su vez los mayores contenidos de bases. Cenicafé señala como limitante un nivel de aluminio en el suelo superior a 1.0 $cmol_c\ kg^{-1}$, y saturaciones del complejo de cambio superiores al 60% (Valencia 1999, Suárez y Restrepo 2003). El 78.2% de las muestras analizadas en Antioquia tienen más de 1.0 $cmol_c\ kg^{-1}$, mientras que el 37% presentan saturaciones de aluminio superiores al 60%. Este concepto refuerza la importancia del encalado en los suelos cafeteros de Antioquia.

- Con relación al azufre, el 44.8% de las muestras presenta contenidos inferiores a 10 mg kg^{-1}, mientras que sólo el 26.9% de los análisis registran valores entre 10 y 15 mg kg^{-1}, considerado "adecuado" para café. Entre los suelos derivados de diferentes materiales parentales, se destacan por sus bajos contenidos las unidades Sonsón (Cenizas volcánicas), Peñol y Oriente, todas ellas en la región del Oriente Antioqueño y con más del 60% de las muestras con niveles "Bajos" esto es, inferiores a 10 mg kg^{-1}. Por su parte, las unidades Chinchiná, Doscientos y Salgar registran niveles bajos sólo entre el 28 y el 35% de las muestras analizadas.

- Aunque los micronutrimentos aparentemente no han sido limitantes para el cultivo, dado el intenso reciclaje que se presenta con los aportes de materia orgánica en la hojarasca, algunos síntomas de sus deficiencias se presentan con alguna frecuencia. De los resultados de más de mil quinientas muestras para micros en café en Antioquia, es posible hacer algunas consideraciones:

  - El 64% de las muestras analizadas para B presentan contenidos por debajo de 0.5 mg kg^{-1}, nivel crítico reportado (Suárez y Restrepo 2003). Sólo el 25.9% de las muestras tienen contenidos entre 0.5 y 1.0. Estos datos explican las frecuentes observaciones de síntomas de deficiencia de B en el campo (Restrepo 2006). Debe tenerse especial cuidado en las unidades Venecia (Areniscas feldespáticas), Oriente y Chinchiná, en las cuales es mayor la frecuencia de datos inferiores a 0.5 mg kg^{-1} (Figura 5).

  - Únicamente un 0.1% de las muestras presentan contenidos de Zn por debajo de 1.0 mg kg^{-1}, mientras el 70.7% presenta contenidos superiores a 2.0 mg kg^{-1} (Figura 5). No obstante, la relación P: Zn es mayor de 10 en el 38.2% de las muestras estudiadas. Esto podría explicar la alta frecuencia con que se presentan síntomas de deficiencia de Zn en café en Antioquia. En la literatura mundial se reporta un inadecuado

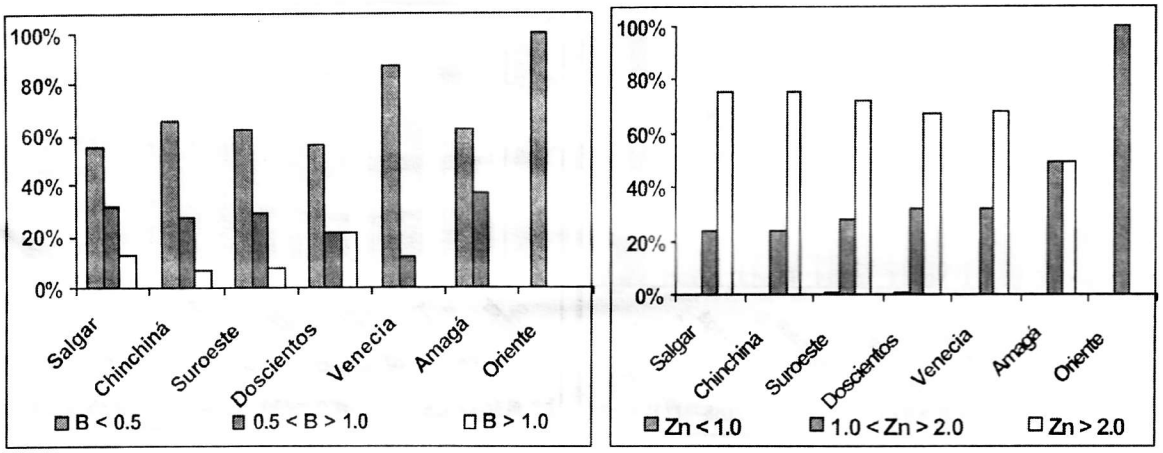


Figura 5. Distribución del contenido de B y de Zn en las distintas unidades de suelos de Antioquia.

suministro de zinc cuando la relación P: Zn es superior a 10 (Suárez y Restrepo 2003). Además, más del 15% de las muestras presentan contenido de P superior a 100 mg kg^{-1}, y bien se conoce que los excesos de P en el suelo pueden inducir síntomas de deficiencia de Zn.

- Sólo el 1.8% de las muestras analizadas presentan contenidos de Fe por debajo de 30 mg kg^{-1}. La ocurrencia de esta deficiencia es muy poco frecuente en cafetales en producción. Sólo se presenta en zocas en pleno crecimiento, por un efecto fisiológico más que por falta de disponibilidad del elemento en el suelo.

- Solamente el 0.1% de las muestras presentan contenidos de Cu por debajo de 1.0 mg kg^{-1}. Esta deficiencia es prácticamente desconocida en café en Colombia. Sólo se registró algún dato con contenido de Cu inferior al nivel crítico en la unidad doscientos.

- Otro tanto ocurre con el manganeso. El 11.2% de las muestras está por debajo del nivel crítico de 5.0 mg kg^{-1} (Valencia 1999). Los síntomas de deficiencia de Mn que se presentan en café parecen estar asociados a excesos de calcio en almácigos y en café en levante. No obstante, existen grandes diferencias entre unidades de suelo, siendo más deficiente en las unidades Chinchiná, Salinas y Peñol, en contraste con las unidades Salgar, Venecia, Suroeste y Doscientos, que registran excesos de Mn en más del 70% de las muestras, coincidiendo con pH bajo en todos los casos.

CONCLUSIONES

1. Las bases de datos de análisis de suelos constituyen una importante herramienta para mejorar la calibración e interpretación de los análisis de suelos para un cultivo determinado.

2. Más que la regionalización de los datos, es importante analizar de modo independiente las bases de datos para los suelos derivados de distintos materiales parentales, entre los cuales se encuentran tendencias diferentes.

3. Para el cultivo del cafeto en Antioquia, la base de datos de análisis de suelos ha sido útil para mejorar las recomendaciones de fertilizantes para el cultivo de café y la interpretación de los resultados de los análisis de suelos.

4. En general, existe alta probabilidad de respuesta a las aplicaciones de enmiendas calcáreas como correctivos de acidez, así como a las enmiendas orgánicas, al nitrógeno, potasio, calcio y magnesio como nutrimentos en café en Antioquia.

5. La probabilidad de respuesta del cafeto a las aplicaciones de fósforo es media. Sin embargo, en los suelos de la unidad Oriente, esa probabilidad de respuesta es alta.

6. En relación con los micronutrimentos, en el cultivo de café en Antioquia sólo se tiene probabilidad alta de respuesta a la aplicación de boro.

7. Para el Zn, en general la probabilidad de respuesta a su aplicación en café es muy baja. Sin embargo, debe tratarse cada lote de manera individual, según la manifestación de síntomas de deficiencia, dados sus antagonismos con otros elementos que pueden estar en exceso en el suelo, en particular el fósforo.

BIBLIOGRAFÍA

BRUULSEMA, T. W. 2006. Soil fertility in the northeast region. Better crops with plant food. USA. 90 (1): 8–10.

CARDONA, D. A. y S. SADEGHIAN. 2005. Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrío de Inga spp. Cenicafé. Colombia. 56(2): 127 - 141.

DONOHUE, S. J. 1987. The value and use of soil test summaries. Soil Science Society of America. USA. 21: 133–144.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA (FNC). 1992. Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos de zona cafetera del suroeste de Antioquia. Santafé de Bogotá. Colombia. 453 p.

_____ 1992. Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos de la zona

cafetera del oriente de Antioquia. Santafé de Bogotá. Colombia. 240 p.

_____ 2000. Suelos de la zona cafetera colombiana: hacia el siglo XXI, Resúmenes. Chinchiná. Colombia. 52 p.

_____ 2001. Estudio de zonificación y uso potencial de los suelos de la zona cafetera del occidente de Antioquia. Chinchiná. Colombia. 473 p.

_____ 2006. Base de datos de los análisis de suelos para café en Antioquia. Comité de Cafeteros de Antioquia. Medellín. Colombia. 250 p. (Sin publicar).

FIXEN, P. E. 2006. Soil test levels in North America. Better crops with plant food. USA. 90 (1): 4 – 7

GRISALES G., A. 1977. Suelos de la zona cafetera. Clasificación y uso. Ediciones Fondo cultural cafetero. Medellín. Colombia. 80 p.

LAZCANO FERRAT, I. 2005. Los resultados de los análisis de suelos como un elemento para el manejo integral del suelo. INPOFOS. México. 8 p.

MURRELL, S. 2006. North central soil test summary: Changes in Phosphorus and Potassium. Better crops with plant food. USA. 90 (1): 14 – 15.

RESTREPO H. F. E. 2006. Evaluación de la respuesta del café (*Coffea arabica* L.) a la fertilización con boro en un Andisol del Suroeste Antioqueño. Tesis maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 144 p.

SADEGHIAN, S. 2003. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados en café. Cenicafé. Colombia. 54(3): 242 – 257.

SCHAUFELBERGER, P. 1962. Apuntes geológicos y pedológicos de la zona cafetera de Colombia. Tomo I. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná. 238 p.

SILVA, J. A. 2000. Collection of calibration data for interpreting soil and plant tissue analyses. In: Silva J. A. y R. Uchida, eds. Plant nutrient management in Hawaii's soils, Approaches for tropical and subtropical agriculture. College of tropical agriculture and human resources. University of Hawaii at Manoa.

SOIL SURVEY STAFF. 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2a edition. Agriculture Handbook N° 436. Soil Survey Staff. Washington D.C. 869 p.

SUAREZ, J. D. y F. E. RESTREPO. 2003. El cultivo del café en el departamento de Antioquia; Diagnóstico de deficiencias nutricionales, interpretación de análisis de suelos y recomendación de fertilizantes y enmiendas. In: Universidad Nacional de Colombia (Eds.). Curso teórico – práctico sobre interpretación de análisis de suelos – Memorias. Medellín. Colombia. 23 p.

VALENCIA A., G. 1999. Fisiología, nutrición y fertilización del cafeto. Agroinsumos del café S.A. – CENICAFÉ. Chinchiná. Colombia. 94 p.

MANEJO INTEGRADO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE FLORES BAJO INVERNADERO

INTEGRATED FERTILIZATION AND IRRIGATION MANAGEMENT IN GREENHOUSE CUT FLOWERS CROP

Daniel Ortega Rey, John Jairo Franco**

RESUMEN

El programa MIRFE (Manejo integrado de riego y fertilización) se creó con el fin de optimizar el uso de los recursos involucrados en el manejo de la nutrición y riego en la producción de flores de corte. El programa MIRFE desarrolla metodologías de: diagnóstico, control, operación y aseguramiento al proceso de riego y nutrición evaluando con base en monitoreos el estado de los recursos agua, suelo y los factores clima y planta, mediante estrategias innovadoras de manejo y uso de tecnologías de información. El SEM (Sistema experto MIRFE) surge como una necesidad para administrar el manejo de los datos y se constituye en una herramienta para la planeación y toma de decisiones MIRFE. En este artículo se define el programa MIRFE, se mencionan sus objetivos y se describen los componentes del SEM y su aplicación.

Palabras claves: Riego, Nutrición vegetal, Fertirriego, Sistema experto.

ABSTRACT

The MIRFE program (Manejo Integrado de Riego y Fertilización, Integrated Fertilization and Irrigation Management) was created with one objective: To make better use of the resources involved in the nutrition and irrigation of cut flowers. The MIRFE program develops methodologies for diagnosis, control, operation and quality assurance of the irrigation and nutrition process. The MIRFE program evaluates the water and soil resources, the weather conditions and the nutritional and physiological status of the plant and works with innovative management strategies and information technologies. The SEM (Sistema Experto MIRFE, MIRFE Expert System) arises with the need of data management and works as a tool for planning and decision making in MIRFE. In this paper the program MIRFE is defined, its objectives are mentioned and described along with the components and applications of SEM.

Key words: Irrigation, Plant Nutrition, Fertirrigation, Expert System.

INTRODUCCIÓN

En el pasado, las prácticas de riego, labranza, adecuación de tierras y nutrición no contaban con metodologías ni herramientas que permitieran el control, aseguramiento de los procesos y la toma de decisiones en el sistema de producción de flores. Muchas de ellas, eran transferidas de sistemas de producción de otras latitudes, con otros sistemas de manejo y nivel tecnológico, y en condiciones ambientales, culturales y sociales diferentes. Por su parte, las decisiones técnicas eran tomadas empíricamente sin argumentos o con viejos y arraigados paradigmas que en muchos casos fueron heredados de generación en generación. No significa con ello, que muchas experiencias exitosas del pasado no se consideren en la actualidad,

* Departamento Técnico G.R.Chía S.A. Centro Comercial Centrochía Local 2017 Chía, Cundinamarca. Correo electrónico: dortega@grchia.com, jjfranco@grchía.com

Uno de los principales desafíos de la agricultura intensiva es obtener el máximo aprovechamiento de los recursos hídricos por parte de la planta y del mismo modo, atender la demanda nutricional de los cultivos, en cada uno de sus estados fenológicos, de manera equilibrada y balanceada, bajo condiciones edáficas y ambientales adecuadas para que las plantas puedan expresar su potencial genético y así obtener el mejor beneficio en términos de producción y calidad.

Como respuesta a esta realidad, en G.R.Chía a finales de 1997 se comenzó a conceptuar un programa que con las mismas características del MIPE, abordara de manera integral los procesos de riego y nutrición. Como sistema integrado se consideraron las propiedades y características de los suelos o sustratos, las condiciones climáticas (evapotranspiración, temperaturas, humedad relativa, radiación, etc.), la disponibilidad y calidad agronómica del agua de riego, los requerimientos nutricionales específicos de los cultivos, los sistemas de siembra, las labores de cultivo, el control de malezas, plagas y enfermedades.

Con este enfoque, se desarrolló el programa: MANEJO INTEGRADO DE RIEGO Y FERTILIZACIÓN. "**MIRFE**" que propende por el control y aseguramiento de todos los procesos involucrados en el manejo de suelos, riego y nutrición, buscando optimizar el uso de los recursos y la producción en un marco de sostenibilidad ambiental y económica.

OBJETIVOS DEL PROGRAMA

- Asegurar que los procesos de riego y nutrición favorezcan la máxima expresión del potencial genético de las plantas.
- Racionalizar y optimizar el uso del agua, los suelos y los fertilizantes de manera que la producción y la calidad de las flores de exportación sean sostenibles desde el punto de vista ambiental y económico.
- Monitorear los recursos, suelo y agua y los factores clima y cultivo, así como la eficacia en la ejecución de los planes de acción.
- Fundamentar las decisiones en monitoreos (hechos y datos), mediante las metodologías de toma de datos para la acción.
- Desarrollar sistemas de información que permita el análisis georeferenciado de los datos de monitoreo de los recursos para:
  - Tomar las mejores decisiones de riego y nutrición para los cultivos.
  - Garantizar consistencia en los planes de manejo.
  - Constituir una memoria técnica de las áreas de producción.
  - Generar desarrollo tecnológico.
- Desarrollar y orientar líneas de investigación y experimentación aplicada que generen conocimiento y desarrollo en los sistemas de producción.
- Enmarcar el programa MIRFE dentro de un esquema de gerencia por procesos.

DEFINICIÓN DEL PROGRAMA MIRFE

El programa MIRFE desarrolla metodologías de: diagnostico, control, operación y aseguramiento al proceso de riego y nutrición evaluando con base en monitoreos el estado de los recursos agua y suelo y los factores clima y planta mediante estrategias innovadoras de manejo y uso de tecnologías que permitan alcanzar altos estándares de calidad y productividad, económica y ambientalmente sostenible.

SISTEMA EXPERTO MIRFE (SEM)

El proceso de fertirrigación implica una serie de decisiones y operaciones complejas que requieren de un sistema de información que permita el manejo del gran volumen de datos recolectados en el campo a través del proceso de monitoreo y a su vez facilite la toma de decisiones consistentes.

Un sistema experto es un capítulo de la *Inteligencia Artificial (IA)* que ejecuta, a partir de una base de conocimientos, estándares y reglas (Sistemas de información), algunas tareas que normalmente requieren cierto nivel de experiencia por parte del humano (Alam y Elliot, 2003).

Bajo este concepto, se entiende que es un software que *imita* el comportamiento de un experto humano en la toma de decisiones o la solución de

un problema, se puede almacenar conocimiento experto para un campo determinado de la producción y solucionar un problema mediante deducción lógica de conclusiones (Jackson, 2002).

COMPONENTES

El SEM se compone de entradas de información (input) que son recolectadas en el campo, mediante un monitoreo estratégico de algunas variables de producción que afectan el medio de cultivo, el riego o la nutrición. Esta información es procesada mediante conocimiento experto que se modela con lógica matemática. El resultado de este proceso se presenta como una salida (output) de información que es usada por el usuario para planear, tomar decisiones y ejecutar las acciones pertinentes para que después vuelva a monitorear el resultado obtenido y comenzar de nuevo el ciclo.

Entradas (input):

Monitoreos de los factores clima y planta y de los recursos agua y suelo.

Base de conocimiento experto (know how):

Conocimiento corporativo, experiencia, formas de hacer las cosas, literatura, criterios de interpretación, cultura, investigación, nivel tecnológico.

Salidas (output):

Recomendaciones, planes de acción consistentes, alternativa de ejecución, mejores decisiones, documentación, facilidades administrativas, evaluaciones de los procesos.

MÓDULOS DEL SISTEMA EXPERTO MIRFE (SEM)

El programa MIRFE, según la red de procesos definida, debe administrar y asegurar los procesos operativos de: adecuación del medio de cultivo, riego y nutrición. Los anteriores procesos constituyen los módulos del sistema experto SEM.

Módulo de adecuación del medio cultivo

Según el sistema de producción, ya sea suelo o sustrato, este módulo contempla el estudio de las propiedades y características del medio de cultivo, desde el punto vista físico y químico, medido directamente en el campo y caracterizado en el laboratorio mediante técnicas analíticas apropiadas, para definir las necesidades de adecuación del terreno, labranza, arquitectura de camas o contenedores, presiembras, enmiendas físicas e infraestructura de riego necesaria.

Módulo de riego

Este módulo aplica un modelo para definir la lámina y frecuencia de riego según los datos obtenidos del monitoreo de clima, la condición de humedad del suelo o sustrato, el estado de las plantas y la infraestructura de riego.

Las entradas al módulo son: el análisis físico del suelo o sustrato, el tipo y estado fenológico del cultivo, las mediciones diarias de evapotranspiración medidas con un atmómetro modificado (Broker y Law 1991) (Alam y Elliott 2003), el grado de humedad medido por tensiómetros u organolépticamente (USDA.1998), la salinidad del medio y la eficiencia de los sistemas de irrigación evaluada en campo. Las salidas de este módulo son: la orden de riego que incluye: el sistema de riego a emplear, el volumen total a aplicar por sector, la frecuencia y horario, la secuencia y prioridades de riego y las áreas de refuerzo.

Para definir la lámina de riego, existen varios enfoques, unos que utilizan modelos basados en información climática para estimar la evapotranspiración del cultivo y con ello calcular la lámina de reposición y otros que emplean el uso de diferentes sensores que estiman el potencial hídrico directamente en el suelo.

La primera aproximación puede ser definida en términos generales como:

$$ET = Kc \times ETo$$

Donde: ET es la máxima evapotranspiración para un cultivo específico, Kc es el coeficiente de cultivo y ETo es la evapotranspiración potencial del lugar como la define la FAO (Doorenbos y Pruitt 1977).

La ecuación de Pennan-Monteith permite estimar la evapotranspitración potencial de manera más precisa pero requiere de mucha información que no

siempre esta disponible en los cultivos. Kc permite relacionar los efectos de las características específicas del cultivo y depende del estado fenológico de las plantas y el sistema de producción (tipo y frecuencia de riego, cobertura del suelo, sistema de siembra, etc)

La aplicación de estos modelos es limitada en cultivos intensivos bajo invernadero debido a las permanentes modificaciones de parámetros agronómicos, climáticos o edáficos que no pueden ser fácilmente involucrados dentro de las ecuaciones clásicas tales como: cosecha permanente de flores que afecta el área foliar y la cobertura, técnicas de agobio (rosa), podas, control de humedad relativa y temperatura en invernaderos (calefacción y riegos ambientales), control de radiación, uso de pantallas térmicas, uso de "mulch", calidad agronómica del agua de riego, fertirrigación, salinidad, riegos de alta frecuencia (microirrigación), acondicionadores de suelo, etc.

La segunda aproximación se fundamenta en la medida del potencial hídrico del suelo por medio del uso de sensores entre los cuales los más utilizado son los tensiómetros y bloques de yeso o nylon, estos últimos en desuso en sistemas intensivos con fertirriego porque sus lecturas son afectadas por los contenidos de sales en el suelo.

El uso de tensiómetros esta limitado debido a que su lectura es puntual y se requiere de un gran número de baterías distribuidas espacialmente sobre todo en áreas de producción con heterogeneidad de suelos, cultivos y manejos agronómicos.

Tradicionalmente los tensiómetros han sido utilizados para definir frecuencias de riego, su uso para el cálculo de las láminas ha estado restringido debido a que se requiere la determinación de las curvas de tensión y esfuerzo de humedad del suelo las cuales son afectadas igualmente por las diferentes prácticas propias de cultivos intensivos mencionadas anteriormente.

La metodología utilizada por el programa MIRFE en el módulo de riego para determinar las necesidades de agua diaria, se basa en el uso de la medida directa de la evapotranspiración por medio del atmómetro modificado (Etgage model A) instalado dentro de los invernaderos a la altura de las plantas ajustado por la eficiencia de los sistemas de irrigación, el contenido de sales en el suelo y una constate de riego (Kr) que depende del contenido actual de humedad del suelo, textura, sistema de producción, cultivo y estado fenológico.

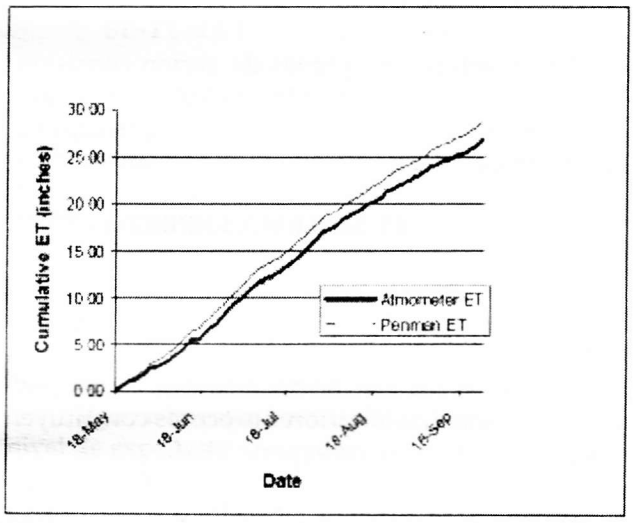
Para el cálculo de la lámina de riego diario el modelo utilizado es el siguiente:

$$L_r = ET_{gage} \times K_r \times E_r \times F_l$$

Donde L_r es la lamina de riego expresada en mm $día^{-1}$, ET_{gage} es la lectura en mm medida en 24 horas. K_r es la constante de ajuste de riego, E_r es el inverso de la eficiencia del sistema de irrigación, F_l es la fracción de lixiviación adicional requerida para el control de sales.

K_r es una constante de ajuste que se determina en campo para cada condición en función del contenido de humedad (organoléptico) o tensión de humedad (tensiómetro), tipo de suelo y cultivo.

La humedad en el campo se determina mediante la tensión de humedad del suelo y la apreciación organoléptica que fue modificada del método original del USDA (1998) a 4 clases discretas que varían desde suelo seco (tensión alta 18cb – 20cb) hasta suelo saturado (tensión cero). La condición de humedad es medida en el campo en cada módulo de



Gráfica 1. *Relación entre las medidas del atmómetro modificado y la Eto estimada por el método de Pennan-Monteith (Bauder 1999)*

Tabla 1. Relación entre la humedad del suelo y la constante de humedad.

Humedad	Tensión (cb)	Kr
1	> 18	2.0 - 3.0
2	16 -18	1.2 - 2.0
3	10 - 16	0 - 1.2
4	< 10	0

riego, que se caracteriza por su homogeneidad en suelo, cultivo y condiciones climáticas.

Módulo de nutrición

Este módulo define las formulas de fertirrigación y su frecuencia de aplicación, basado en el proceso de diagnóstico de la nutrición.

Las entradas al módulo son: análisis de suelos, foliares, de agua para riego, síntomas visuales de fisiopatías determinados en campo, monitoreo semanal de la conductividad eléctrica (CE) o la concentración de nitratos y pH del extracto saturado para sistemas de producción en suelo y diaria del agua lixiviada en el drenaje en sistemas de producción en sustrato.

Las salidas de este módulo son: concentración de los diferentes elementos nutrientes en el agua de riego (fórmula), la frecuencia de fertilización, los pedidos a almacén de fertilizantes por centro de costo, cantidades de solución nutritiva concentrada a preparar por módulo de fertilización, instrucciones para la preparación de solución madre y los sectores de refuerzo de nutrición, definiendo para cada uno, los sistemas y dosis a aplicar.

La información de análisis completos de suelos y análisis foliares es interpretada por medio de normas propias para cada suelo y cultivo calibradas con las zonas de máximo rendimiento.

Los análisis de tejido vegetal se interpretan por medio del método tradicional de niveles críticos y actualmente se está implementando el método DRIS (Walworth y Sumner 1987).

La definición de la frecuencia de fertirriego busca mantener o corregir los niveles óptimos de balance nutricional en la solución del suelo o sustrato. Para ello se basa en el monitoreo semanal de la conductividad eléctrica (CE) o la concentración de nitratos del extracto saturado para sistemas de producción en suelo y diaria del agua lixiviada en el drenaje en sistemas de producción en sustrato.

Módulo de control del proceso

Un aspecto fundamental para el éxito de los sistemas de fertirrigación es el control permanente tanto de la programación como del funcionamiento de los equipos de fertirriego. Se entiende por control la medición continua de algunos parámetros que indican la eficacia con la cual se están ejecutando los planes de riego y nutrición.

Las entradas de este módulo son: volumen de agua, CE y pH medido directamente en los emisores de cada módulo de riego, análisis completo del agua de fertirriego tomada en los emisores;volumen de agua, CE y pH del agua de drenaje medido en cada uno de los módulos de riego, especialmente en sistemas de cultivo en sustrato. Otra entradas son salidas de los módulos ya mencionados como volumen de riego programado, porcentaje de drenaje deseado, CE, pH y concentración de elementos nutrientes de la formula de fertirriego y drenaje, relación de inyección y caudal de cada módulo.

Las salidas del módulo son: comparativa entre lo programado y realmente ejecutado de parámetros de riego como, volumen de agua aplicada por módulo, caudal, tiempo de riego, porcentaje de drenaje (suelo y sustrato); y de fertirriego como relación de inyección, conductividad eléctrica y pH. Se realizan gráficas y mapas donde se pueden observar los sitios con baja eficacia de cada parámetro mencionado, información que le permite al técnico identificar áreas con posibles problemas de riego o nutrición y adicionalmente tareas de mantenimiento del sistema como calibración de válvulas, sectores con taponamiento de emisores (sectores con deficiencias en uniformidad de riego), etc.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOREFERENCIADO

Para relacionar la información del programa MIRFE con la información de producción, manejo

de plagas y enfermedades, labores culturales y costos se desarrolló un sistema de información georeferenciado llamado SIGAL que permite ver la información histórica de cada uno de los módulos en forma de mapas. Esta información permite determinar la influencia del MIRFE en calidad y productividad de las diferentes áreas de producción.

BIBLIOGRAFÍA

ALAM, M; ELLIOTT, J. 2003. Validating the use of an atmometer as an irrigation management tool. ASAE. Paper number: 032142.

BAUDER, T. 1999. Atmometers, A flexible tool for irrigation scheduling. AGRONOMY NEWS, Vol. 19, No. 6. p: 7-9.

BRONER, I. and LAW, R. A. P., 1991. Evaluation of a modified atmometer for estimating reference ET. Irrigation Science, 12: 21-26.

DOORENBOS, J. and PRUITT, W. O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.

JACKSON, P. 2002. Introduction to Expert Systems. Third Edition. Addison-Wesley. ISBN: 0-201-87686-8. 542p

USDA. 1998. Estimating Soil Moisture by Feel and Appearance. USA.

WALWORTH, J.L.; SUMNER, M.E. 1987. The Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). Adv. Soil Sci. p: 149-188.

COMISIÓN II - QUÍMICA, MINERALOGÍA Y GÉNESIS

HERENCIA GEOQUÍMICA Y MINERALÓGICA EN LA GÉNESIS DE SUELOS, ALTIPLANOS ANDINOS DE COLOMBIA

GEOCHEMICAL AND MINERALOGICAL HERITAGE IN SOILS FROM THE ANDEAN COLOMBIAN HIGH PLAINS

Sergio Gaviria M. *

RESUMEN

Los suelos formados a partir de materiales que han sido transportados en las zonas montañosas y se han acumulado en los altiplanos de los valles interandinos, conservan en su composición mineralógica y química la huella de su origen y de las condiciones ambientales prevalecientes durante la pedogénesis.

Las asociaciones de arcillas y algunos minerales arcillosos particulares presentes en sedimentos y suelos se han revelado como excelentes marcadores ambientales y paleoambientales, así como indicadores de origen de los materiales de partida de los suelos actuales en los altiplanos.

Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden principalmente a investigaciones realizadas en la región de Cundinamarca y Boyacá desde hace diez años, con énfasis en las relaciones entre rocas aflorantes y suelos.

Palabras claves: altiplanicie, depósitos, arcillas, cuaternario, sedimentos, paleoambiente.

ABSTRACT

Mineralogical and chemical composition of soils developed in the Andean highlands from Colombia revealed environmental conditions during their genesis. Clay minerals from sediments and soils are used here as mineralogical markers of rock sources. Clay associations show also changes in (paleo)environment when rocks and sediments where exposed to weathering.

The results discussed in this paper are those obtained during the last decade, mainly in the region of Cundinamarca and Boyacá high plains.

Key words: high plain soils, clay minerals, quaternary, sediments, (paleo)environment.

INTRODUCCIÓN

Los actuales altiplanos de la Cordillera Andina Colombiana son el resultado del relleno de valles intramontanos con materiales procedentes de la erosión y transporte de las rocas que afloran en las cuencas de aporte en ambientes fluviales y lacustres. Es el caso de los grandes altiplanos existentes en la Cordillera Oriental, específicamente en Cundinamarca y Boyacá, donde las rocas que conforman las cuencas

* Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Apartado Aéreo 14490, Bogotá, D.C. Correo electrónico: sgaviriam@unal.edu.co

de aporte son principalmente de origen sedimentario, depositadas en ambientes marinos hasta continentales. Por otro lado, en zonas de actividad volcánica, los altiplanos se han formado gracias a la llegada de flujos y depósitos de caída directa producidos por las erupciones rellenando depresiones donde se han acumulado los diferentes materiales. Tal es el caso de los altiplanos de Nariño situados al pie de los volcanes en el extremo sur del país.

En aquellas regiones montañosas alejadas de los centros volcánicos, los depósitos son principalmente sedimentos producidos por erosión mecánica y/o química, con influencia tectónica y glacial, asociados en menor proporción con productos volcánicos depositados en forma de lluvias de cenizas. En cambio, en las zonas de influencia directa de los volcanes, los depósitos están dominados por flujos y materiales de caída directa, eventualmente asociados con aportes que sufrieron transporte por el agua constituyendo diferentes depósitos fluvio-volcánicos.

Las asociaciones de minerales en sedimentos y suelos dan información muy valiosa sobre las fuentes de los materiales y las transformaciones que han sufrido las rocas durante su exposición y transporte. Entre los minerales secundarios, las arcillas son sin duda los marcadores ambientales más utilizados. Los suelos formados a partir de dichos materiales conservan en su composición química y mineralógica la huella de su origen y de las condiciones ambientales prevalecientes durante la pedogénesis. Los suelos son por lo tanto testigos de procesos de evolución de los paisajes y ayudan a reconstruir su historia (Gaviria et al, 2004 y 2005).

En este artículo se hace énfasis en los procesos de formación de suelos formados a partir de rocas sedimentarias en los altiplanos de la Cordillera Oriental, particularmente en la sabana de Bogotá y la cuenca de la laguna de Fúquene. Se hace referencia a algunos resultados obtenidos en la región de Nariño como marco de comparación con las fuentes volcánicas directas. La influencia del clima y sus variaciones en el pasado queda reflejado asimismo en los productos de alteración mineral a medida que los materiales se han ido reciclando desde la parte alta de las cuencas hasta las altiplanicies. Algunos depósitos de ladera que han quedado colgados en las vertientes de los valles, constituyen testigos de pedogénesis sucesivas, principalmente a partir del Pleistocénico Superior (Sarmiento y Gaviria, 2005).

LOS ALTIPLANOS ANDINOS

La Cordillera Oriental de Colombia corresponde a la región montañosa del país donde existen las más extensas altiplanicies, cuyo origen ha sido objeto de numerosos estudios geológicos y paleoambientales (Van der Hammen et al, 1973; Ingeominas, 1979, 2004). Numerosos también son los estudios de cartografía e investigaciones sobre génesis de suelos en las laderas y en las zonas planas, muchos de ellos con el objeto de evaluar las condiciones para riego y drenaje (IGAC, ver estudios desde 1965; Faivre, 1988; Garzón, 2005).

Las planicies de Bogotá y Fúquene son el resultado de la sedimentación en ambiente lacustre a partir de la erosión de las rocas de edades cretácicas y paleógenas que conforman el paisaje montañoso que bordea los altiplanos (Ingeominas, 1979). Actualmente la superficie plana de los valles se sitúa cerca a la cota 2550 msnm y las divisorias de agua alcanzan en las partes más altas los 3700 msnm (Fig. 1).

Estas cuencas intramontanas fueron rellenadas en el transcurso del período Cuaternario, dejando un gran volumen de sedimentos fluviales y lacustres acumulados, en lo que conforma las altiplanicies de Bogotá, Ubaté y Chiquinquirá. De acuerdo con las investigaciones efectuadas mediante estudios del polen fósil, conservado en los sedimentos de estos

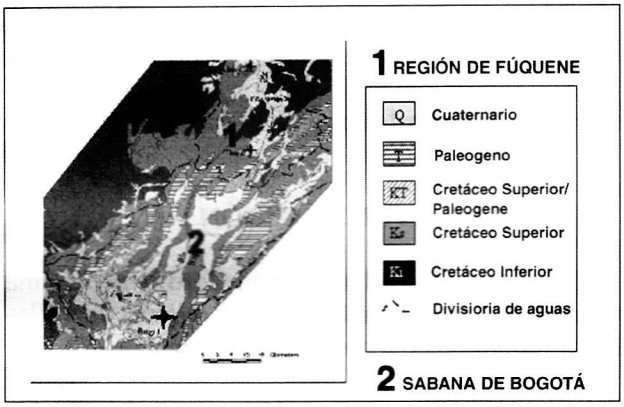


Figura 1. *Esquema geológico de la zona de estudio, altiplanos de Bogotá y Fúquene.*

rellenos (ver estudios de Van der Hammen y colaboradores desde 1960), se tiene un amplio conocimiento de las variables paleoclimáticas que han venido operando durante dicho período de tiempo.

Los procesos de meteorización química y el transporte mecánico, que son controlados por las condiciones ambientales imperantes durante la historia del depósito son igualmente sensibles a los ciclos climáticos. Los intervalos fríos y cálidos conocidos como períodos glaciales e interglaciales respectivamente, están caracterizados también por diferencias en las condiciones de humedad (Van der Hammen y González, 1963; Van der Hammen et al, 1973; Van der Hammen, 1995). En la Sabana de Bogotá se han estudiado estos ciclos durante todo el período Cuaternario por medio de núcleos perforados hasta la base del depósito, que en la parte central en Funza alcanza casi 600 metros de espesor (Hooghiemstra, 1981; Hooghiemstra y Sarmiento, 1991, Torres et al., 2005). En los sedimentos lacustres de la laguna de Fúquene se han estudiado los depósitos hasta 70 metros de profundidad que cubren aproximadamente el último ciclo interglacial – glacial y el Holoceno, es decir unos 150. 000 años de historia (Van der Hammen y Hooghiemstra 2003).

Durante los períodos fríos de la última glaciación predomina el transporte mecánico. Los minerales no alterados que fueron arrancados de las rocas frescas por el hielo, dejan su huella mineralógica en los sedimentos acumulados durante las fases de descongelamiento, producto del transporte fluvioglaciar. Durante los períodos interglaciares como el actual, predominan los procesos de meteorización química y las diferentes formas de transporte de partículas coloidales con intensidades diferentes que dependen de las condiciones de humedad. Por debajo de 3000 msnm (límite inferior de los glaciares en los períodos más fríos), las laderas que rodean la planicie estuvieron permanentemente sometidas a procesos de meteorización química (Gaviria et al, 2004 y 2005). Otros aportes a la cuenca provienen de la actividad volcánica, registrados como capas de cenizas en los sedimentos de lago y presencia de paleosuelos en las laderas y los piedemontes.

Para entender los mecanismos de aporte mineral a los suelos, es necesario tener en cuenta el entorno paleogeográfico para evaluar las zonas expuestas a la erosión en cada período, las condiciones hidrodinámicas durante el transporte y la sedimentación en los lagos, y el efecto de los cambios fisicoquímicos que producen la desestabilización de las suspensiones aportadas por las aguas de escorrentía y la consecuente floculación de las arcillas durante el transporte hacia las planicies.

ASOCIACIONES DE ARCILLAS EN ROCAS Y SEDIMENTOS

En la Figura 2 se presenta un esquema general de las asociaciones de arcillas en rocas y sedimentos en las unidades geológicas que afloran en la región (Ingeominas, 1979; Gaviria et al, 2005), de acuerdo con el esquema geológico presentado anteriormente.

Resultados anteriores indican que todas las muestras de rocas arcillosas o sedimentos provenientes de las unidades geológicas, contienen silicatos de aluminio hidratados con potasio (arcillas), sílice y hierro, este último en forma libre como óxido en diferentes proporciones según el nivel, o incluidos en las estructuras de los minerales arcillosos. Las arcillas oscuras contienen sulfuros y

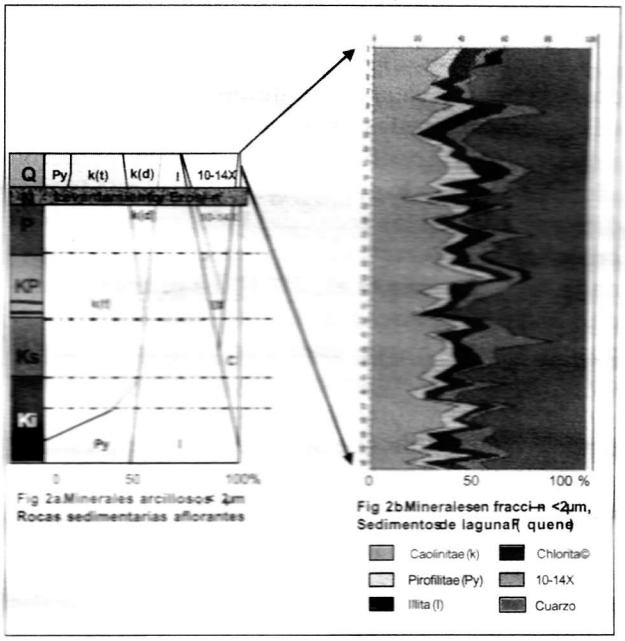


Figura 2. Asociación de minerales en la fracción <2µm de rocas sedimentarias y sedimentos Cuaternarios de la sabana de Bogotá y la cuenca de Fúquene (Adaptado de Gaviria et al, 2005).

materia orgánica, en especial aquellas asociadas a mantos de carbón entre el Cretáceo y el Paleógeno (KT) y en algunos niveles de las lutitas negras, resentes en los niveles marinos de la base del Cretáceo Superior y a lo largo del Cretáceo Inferior (Gaviria et. al., 2004 a).

Los minerales arcillosos que predominan en los ambientes marinos del tope del Cretáceo Inferior estudiados en la cuenca de Fúquene (Figura 2a), están constituidos por pirofilitas e illitas (Gaviria et al, 2005). Hacia la base de la columna estratigráfica, las proporciones relativas de los dos minerales son iguales, mientras que hacia el tope disminuye el contenido de pirofilita y aparece y se incrementa el de caolinita. En los niveles arcillosos del Cretáceo Superior, se presentan arcillas caolínitas bien cristalizadas e illitas, mientras que la pirofilita no se presenta. A medida que se asciende en la secuencia, aparecen otros productos arcillosos de tipo clorítico y esmectítico probablemente como resultado de la transformación de arcillas 2: 1 de tipo illita. La simplicidad de la mineralogía hacia la base de la columna refleja la progresiva desaparición de caolinita que es reemplazada por pirofilita probablemente como resultado de procesos diagenéticos en los niveles más antiguos (Zelazny y White, 1989).

La caolinita es un producto neoformado, resultado de la meteorización de diferentes tipos de rocas silicatadas expuestas en condiciones tropicales y sintetizado en el continente. De este mineral fueron identificados por lo menos dos especies que fueron diferenciadas en las rocas del Paleógeno una bien cristalizada, k(t), y otra mal cristalizada o desordenada, k(d) (Gaviria et al., 2004). La primera es exclusiva de las rocas del Cretáceo Superior y probablemente corresponde a un producto ordenado por efecto del enterramiento de las rocas. La segunda aparece y aumenta su contenido en las rocas terciarias a medida que se sube en la serie estratigráfica y corresponde probablemente al aporte de caolinita heredada de otras fuentes.

En los niveles del Paleógeno, las lodolitas carbonosas depositadas en zonas costeras y transicionales de ambientes reductores son muy ricas en caolinita bien cristalizada asociada con illitas y algunos minerales interestratificados. Las lodolitas varicoloreadas típicas de depósitos continentales acumuladas en condiciones más oxidantes presentan una asociación más compleja, constituida principalmente por arcillas caoliníticas bien cristalizadas k(t) junto con caolinitas desordenadas k(d), con illitas (I) y productos interestratificados esmectíticos (10-14Sm), cloríticos (10-14C) y/o vermiculíticos (10-14V), indicados en general como 10-14X. Estos últimos, reflejan procesos de meteorización ocurridos en las rocas fuente durante la sedimentación, a expensas de las illitas que disminuyen progresivamente hacia la parte superior de la secuencia.

En la Figura 2b se presentan los resultados de la variación en la composición de los principales minerales arcillosos en función de la profundidad para 70 metros de sedimentos perforados del fondo de la laguna de Fúquene. Se incluye el cuarzo, mineral no arcilloso presente en la fracción <2µm.

Las arcillas muestran una asociación aun más compleja que las rocas, ya que además de los minerales aportados por las rocas del Paleógeno y del Cretáceo Superior, aparece en casi todos los niveles la pirofilita, mineral característico de los niveles más antiguos de las rocas cretácicas aflorantes en esta cuenca. La pirofilita es un mineral muy resistente y se conserva sin alterarse en rocas, sedimentos y suelos (Gaviria et al 1995, 2004 b). Por lo tanto, su presencia en los sedimentos Cuaternarios de Fúquene es indicativo de herencia directa de las rocas cretácicas que afloran en las inmediaciones de la actual laguna.

La illita, mineral arcilloso que acompaña a la pirofilita en las rocas del Cretáceo medio, sigue un comportamiento parecido, lo que confirma el incremento del aporte de estas rocas a la laguna durante las épocas favorables a la erosión de las laderas aledañas a la planicie. Sin embargo, aportes de éste y otros minerales arcillosos procedentes de otras formaciones, distorsionan esta posible señal paleoambiental.

Los otros minerales arcillosos procedentes de varias fuentes, son más difíciles de correlacionar. Es el caso de la caolinita que fue identificada como mineral común en casi todos los niveles de roca a partir del Cretáceo Superior. Este mineral arcilloso fue analizado de manera global en los sedimentos de Fúquene, sin diferenciar las dos especies que aparecen sistemáticamente en las series terciarias k(t) y k(d) y es el más abundante en la asociación de arcillas para la mayoría de los niveles del pozo Fúquene. Sin embargo, es de esperar que el contenido de caolinita

desordenada aumente en los períodos en los cuales el aporte de rocas del Paleógeno se incrementa. Lo anterior ocurre cuando aumenta la erosión de las partes altas de la cuenca y en las laderas medias de la planicie donde afloran estas rocas, por transporte en suspensión en los afluentes que alimentaban el lago. El aporte actual de sedimentos ricos en caolinita por el río Ubaté (Garzón 2005), atestigua este proceso en condiciones climáticas interglaciales. Su contenido debe disminuir durante los períodos fríos, cuando las masas de hielo cubrieron estos materiales y quedaron protegidos de la acción erosiva, siendo las rocas Cretácicas con caolinita bien cristalizada la mayor fuente de este mineral.

Los minerales interestratificados que constituyen una mezcla de productos heredados de rocas terciarias y/o transformados por procesos de meteorización a partir de rocas del Cretáceo Superior, producen una señal mixta de difícil interpretación.

RELACIONES ROCA - SUELO

Las unidades-roca que afloran en el área ejercen su influencia en la formación de muchos de los suelos. Como se indicó anteriormente, el material parental es en estos casos heredado de las formaciones sedimentarias antiguas. Los suelos pueden desarrollarse directamente a partir de las rocas in situ, o sobre materiales transportados mecánicamente a partir de ellas por los diferentes procesos de erosión. Muchos de los suelos actuales son sin embargo el producto de la transformación de materiales con influencia de cenizas volcánicas que recubrieron periódicamente las topografías expuestas. Estos suelos han sido objeto de gran cantidad de estudios desde hace muchas décadas (IGAC, 1965, 1977; 1980; 1984; 1985). Por el contrario, las relaciones entre los materiales locales y los suelos no han sido estudiados con la misma intensidad.

Las propiedades y la evolución de los suelos dependen en gran medida de la naturaleza de los materiales. En los párrafos siguientes se presentan algunas de las evidencias encontradas en varias investigaciones realizadas en la región durante los últimos años:

El contenido variable de pirofilita en los diferentes niveles de sedimentos de Fúquene está indicando probablemente mayores aportes por erosión de las rocas del piedemonte interno, que quedan expuestas a la denudación durante los períodos secos como efecto de la disminución de la cobertura vegetal protectora. Lo anterior se puso en evidencia recientemente en el estudio de los minerales arcillosos de los suelos hídricos del humedal de Fúquene (Garzón 2005). En contraste, durante los períodos húmedos y fríos de la última glaciación, la invasión de la vegetación de páramo como consecuencia del descenso de las temperaturas y el incremento de la acidez de los suelos por acumulación de materia orgánica, son causantes de la disminución en el aporte de sedimentos por floculación desde estas áreas aledañas a la planicie y por lo tanto decrece el contenido de pirofilita.

Este mineral no se presenta en los sedimentos ni en los suelos de la sabana de Bogotá, donde los aportes se dan a partir de la misma serie de rocas que en la región de Fúquene, pero solamente a partir de los niveles correspondientes al Cretáceo Superior hacia arriba, rocas que no contienen pirofilita. Otros trabajos han mostrado la presencia de pequeñas cantidades de pirofilita en la Altillanura Oriental de los Llanos, lo que confirma que los niveles del Cretáceo Inferior ricos en pirofilita presentes en la vertiente oriental de la Cordillera han sido fuente de minerales para los suelos llaneros durante buena parte del Cuaternario (Gaviria, 1993).

Por otro lado, la distribución de suelos en la región de la sabana de Bogotá ha permitido establecer relaciones estrechas entre procesos pedogenéticos y condiciones climáticas pasadas y presentes prevalecientes en los diferentes ecosistemas que conforman actualmente la Sabana de Bogotá (Fölster & Hetsch, 1978; Faivre, 1988; Malagón et al., 1990 y 1995); se han detectado además variaciones importantes en la orientación de la evolución de los suelos por el aporte de materiales volcánicos llegados en forma de lluvias de ceniza, como consecuencia de eventos eruptivos en la Cordillera Central (Jaramillo, 1980; Malagón et al., 1991; Faivre & Gaviria, 1992). Actualmente se plantea la posibilidad de aportes de materiales procedentes de focos volcánicos situados en la misma Cordillera Oriental como es el caso del volcán de Paipa recientemente estudiado (Pardo et al, 2005) y otros posibles focos en proceso de investigación (Galvis J., comunicación personal).

Se establecieron secuencias genéticas de suelos controladas por la litología y las condiciones climáticas locales, tanto en la zona plana como en las zonas de ladera que enmarcan la región. La evolución de los minerales arcillosos de los suelos se ha correlacionado con su comportamiento físico, particularmente los procesos de lixiviación y transporte de partículas, bajo la influencia de materiales volcánicos (Faivre 1988). Los productos amorfos de tipo alofánico y la halloisita deshidratada son productos típicos asociados a estos procesos en la sabana de Bogotá. Estudios actuales que se realizan en el altiplano de Nariño indican que la fuente de halloisitas está efectivamente asociada a vidrios y minerales de origen volcánico (Investigación volcánica en el altiplano de Nariño, Universidad Nacional – Ingeominas), pero al contrario de los que ocurre en la Cordillera Oriental, las halloisitas conservadas en los depósitos volcánicos presentan un alto estado de hidratación.

Cuando los suelos se desarrollan sobre areniscas duras del Cretáceo o del Paleógeno que afloran en las zonas escarpadas, o sobre depósitos arenosos generados a partir de ellas, su evolución está limitada por la pobreza en minerales alterables de estas rocas generalmente cuarzosas. Además, la textura arenosa de los materiales da lugar a suelos muy permeables, con baja capacidad de retención de agua y de nutrientes. Los suelos que presentan bajo desarrollo de los horizontes pedológicos (Gaviria et al, 2004c).

Cuando afloran las arcillolitas de las Formaciones Paleógenas o más antiguas, generalmente en las laderas y las colinas del interior de los altiplanos, los suelos se desarrollan bajo la influencia de materiales ricos en productos alterables, constituidos por arcillas de diferente naturaleza. Los suelos se caracterizan por presentar en estos casos un horizonte de alteración cuyo desarrollo y propiedades dependen principalmente de la historia genética de los materiales geológicos y de su composición (Gaviria et al, 2004c).

Sobre arcillas ricas en sílice y bases de tipo 2: 1, tales como Illitas, Cloritas, Esmectitas e Interestratificados I-X, heredadas o transformadadas a partir de los sedimentos antiguos, la alteración es más intensa que sobre materiales donde predominan las Caolinitas (pobres en sílice y bases) o los productos arcillosos enriquecidos en aluminio como la Gibbsita, resultantes de una intensa alteración del depósito antiguo durante su formación (Gaviria et al. 2004c). En el primer caso, los suelos tienen propiedades vérticas, y son ricos en nutrientes aportados por los minerales arcillosos que se alteran; además, las propiedades expansivas de algunos de estos minerales confieren a los suelos características físicas particulares, debido a los cambios de volumen y al fracturamiento que se genera durante los ciclos de humedad y sequía. Los suelos son poco permeables y presentan inestabilidad mecánica por los procesos de contracción y expansión que se acentúan en zonas de pendiente, dando lugar localmente a intensos procesos de erosión. En el segundo caso, los suelos heredan las características de la alteración antigua, con un avanzado estado de evolución y estabilidad mecánica, pero se caracterizan por ser pobres en nutrientes.

En la parte plana, los suelos se han desarrollado a partir de sedimentos recientemente depositados en condiciones lacustres o fluviátiles, generalmente de textura fina, ricos en arcillas provenientes de la erosión de formaciones antiguas, mezcladas con cenizas volcánicas, limos, arenas y productos de la pedogénesis ocurrida en las áreas de aporte. La proporción de cada uno de estos materiales varía localmente, de acuerdo con la posición del área de depósito respecto a las áreas de aporte. Los suelos presentan un desarrollo pobre del perfil que se incrementa con la edad del depósito.

Los procesos de disección han creado terrazas lacustres encima de las cuales el desarrollo de los suelos se ha dado bajo condiciones pedoclimáticas variadas, dependientes del grado de permeabilidad de los materiales y de los cambios ocurridos en el nivel freático a través del tiempo. Cuando los materiales son ricos en arcillas expansivas, los procesos de contracción y expansión acentúan la incorporación de la materia orgánica hasta cierta profundidad y dan lugar a la formación de suelos poco permeables con perfil poco diferenciado y características vertisólicas.

Finalmente, en la planicie aluvial, los suelos hidromorfos se desarrollan incipientemente sobre los depósitos más recientes. Los procesos que ocurren en estos medios están controlados por las reacciones de oxido-reducción que se crean por la

presencia de tablas de agua. El hierro se solubiliza, una parte reprecipita localmente como óxidos de hierro que forma manchas amarillas o rojizas en la zona de fluctuación del nivel freático, mientras que otra parte desaparece transportado por las aguas que circulan, dando lugar a una matriz de color gris clara que se generaliza en condiciones de hidromorfía permanente.

CONCLUSIONES

La composición de las arcillas de las rocas expuestas en los altiplanos marca contrastes muy fuertes entre los ambientes de sedimentación y los procesos post-sedimentarios. Las rocas marinas de ambientes reductores sometidas a enterramiento y diagénesis se caracterizan por minerales arcillosos simples y bien cristalizados como pirofilitas e illitas. La primera es el resultado de la transformación post-sedimentaria de la caolinita. Las caolinitas bien cristalizadas son características de los niveles del Cretáceo Superior.

Las rocas del Paleógeno presentan asociaciones de minerales arcillosos más complejas como consecuencia del aporte de productos de meteorización que fueron preservados durante la sedimentación. Son característicos de estos niveles, las caolinitas desordenadas k(d) y los minerales interestratificados. Las illitas, las caolinitas bien cristalizadas k(t) y el cuarzo son minerales heredados de otras rocas más antiguas.

Las asociaciones de arcillas presentes en los sedimentos de los altiplanos, recogen el aporte de todas las fuentes que afloran en las cuencas. Algunas de las rocas aportaron minerales arcillosos característicos, que se reconocen como exclusivos de algunas de las rocas y sirven como marcadores de fuente para los sedimentos. Es el caso de la pirofilita, mineral resistente que se conserva durante los procesos de meteorización y pedogénesis.

Las asociaciones de arcillas en los suelos indican además de las posibles fuentes locales aportantes, el efecto de la exposición y los procesos de meteorización que han transformado los minerales. Es el caso de los productos interestratificados que resultan de la alteración de minerales arcillosos más simples como illitas y cloritas.

Los productos halloisíticos en los suelos son buenos indicadores de aportes volcánicos y ayudan a caracterizar procesos de meteorización y pedogénesis ligados a fuentes lejanas y a condiciones particulares de drenaje.

BIBLIOGRAFÍA

FAIVRE P. 1988. Lessivage et planosolisation dans les sequences de sols caracteristiques des milieux intrandins de Colombie (Amerique du sud). These Docteur e Sciences, Universite de Nancy I, 563p.

FÖLSTER H. 1981. Vegetation-climatic relation of cold-phase paleosol in the Colombian Andes. Rev. CIAF, 6: (1-3), 193-199.

FÖLSTER H.; HETSCH W., 1978. Paleosol sequences in the Eastern Cordillera of Colombia. Quaternary Research, 9: 38-248.

GAVIRIA S.; SARMIENTO G., FERNANDEZ J; DELGADO E. 2005. Aportes de la mineralogía de arcillas a la reconstrucción paleoambiental de la cuenca lacustre de Fúquene. Geología Colombiana No. 30, pp. 67-75.

GAVIRIA S.; SARMIENTO G.; FERNÁNDEZ J.; DELGADO E.; GONZÁLEZ O.: y HERNÁNDEZ O. 2004a. Entorno fisicoquímico en el transporte de arcillas, altiplanos de la Cordillera Oriental, Colombia. Memorias IX Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia, Paipa, pp. 58 – 70.

GAVIRIA S.; DUARTE, R.; ROMERO, F.; THOREZ, J. y BERRÍO, J. C. 2004b. Procesos de erosión, transporte y depósito durante el Cuaternario. En: Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. *Publicaciones Geológicas Especiales* 17: 169-217. Ingeominas, Bogotá.

GAVIRIA S.; FAIVRE, P.; VAN DER HAMMEN, TH. 2004c. Origen y evolución de suelos. En: Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. *Publicaciones Geológicas Especiales* 17: 139-168. Ingeominas, Bogotá.

HOOGHIEMSTRA H. 1981. Vegetational and Climatic History of the High Plain of Bogotá, Co-

lombia: a continuos record of the last 3. 5 million years. *Dissertationes Botanicae*, 79. Vaduz, J. Cramer.

HOOGHIEMSTRA H.; SARMIENTO G. 1991. Long continental pollen record from a tropical intermontane basin: Late Pliocene and Pleistocene history from a 540-meter core. Episodes (14) 2 p 107-115.

IGAC, 1985. Estudio general de suelos de los municipios del oriente de Cundinamarca y del municipio de Umbita (Boyacá), 620p.

IGAC, 1984. Estudio regional integrado del altiplano Cundiboyacense. Estudio general de suelos. Proyecto IGAC ORSTOM, Bogotá, 117p.

IGAC, 1980. Estudio general de clasificación de los suelos de la cuenca alta del río Bogotá para fines agrícolas. 2a ed. 234p.

IGAC, 1977. Estudio general y detallado de suelos de los municipios de Cota, Funza, Mosquera y parte de Madrid, Departamento de Cundinamarca. Bogotá, 669p.

IGAC, 1965. Suelos de Ubaté - Chiquinquirá. Estudio detallado del valle y general de la zona. Bogotá, 187p.

INGEOMINAS, 2004. Aspectos geoambientales de la Sabana de Bogotá. *Publicaciones Geológicas Especiales* 301. Ingeominas, Bogotá

INGEOMINAS, 1979. Mapa geológico del cuadrángulo K-11.

MALAGÓN D.; LLINÁS R.; PULIDO, C.; CHAMORRO C.; FERNÁNDEZ J. 1995. Suelos de Colombia. origen, evolución, clasificación, distribución y uso, IGAC, 632p.

MALAGÓN D.; LLINÁS R.; PULIDO, C. 1990. Paleosuelos del piso Alto Andino (Páramos que circundan a Santafé de Bogotá), Investigaciones 2(2): 1-198, IGAC, Bogotá.

SARMIENTO G.; GAVIRIA S. (2005). El entorno geológico y los procesos cuaternarios en el valle de Ubaté – Chiquinquirá: Origen de la Laguna de Fúquene. X Congreso Colombiano de Geología, Bogotá. 16pp.

TORRES V.; VNDENBERGHE J.; HOOGHIEMSTRA H. 2005. An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. Palaeogeography, palaeoclimatology, Palaeoecology 226, 127-148.

VAN DER HAMMEN, T (ed), 1995. Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogotá y alrededores. Análisis geográficos 24, Instituto Geográfico Agustin Codazzi, Bogotá.

VAN DER HAMMEN T.; HOOGHIEMSTRA H. 2003. Interglacial – glacial Fúquene 3 pollen record from Colombia: an Eemian to Holocene climate record. Global and Planetary Change.

VAN DER HAMMEN T.; HELMENS, 1990. Mapa del Neógeno - Cuaternario de la Sabana de Bogotá, Cuenca Alta del Río Bogotá, Hojas 1 y 2, Ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá.

VAN DER HAMMEN T.; WERNER J. H.; VAN DOMMELEN H., 1973. Palynological record of theupheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian eastern Cordillera and the early evolution of its High Andean biota. Review Paleobotany and Palynology, 16: 1-122.

VAN DER HAMMEN, T.; GONZÁLEZ E., 1963. Historia del clima y vegetación del Pleistoceno Superior y del Holoceno de la Sabana de Bogotá. Boletín Geológico, XI (1-3): 189-266.

MOVILIDAD IÓNICA Y DIAGNÓSTICO QUÍMICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO

IONIC MOBILITY AND CHEMICAL DIAGNOSIS OF THE SOIL FERTILITY

*Raúl Zapata H.**

RESUMEN

Las metodologías químicas para evaluar la fertilidad se fundamentan en la extracción del nutriente desde la fase sólida del suelo, el cual puede estar en solución, en forma intercambiable, precipitada y/o adsorbida o acomplejada. Se supone que estas formas son las que contienen el nutriente en forma disponible. Este artículo presenta la relación que existe entre la calibración de los métodos químicos para evaluar la fertilidad y el movimiento de los iones en el suelo hacia la raíz.

Palabras claves: calibración, fósforo, potasio, difusión, flujo de masas.

ABSTRACT

The chemical methodologies to evaluate the fertility are based on the extraction of the nutrient from the solid phase of the soil, which can be in solution, interchangeable, precipitated form and / or adsorbed or complex. It is supposed that these forms are those that contain the nutrient in available form. This article presents the relation that exists among the calibration of the chemical methods to evaluate the soil fertility and the movement of the ions in the soil towards the root.

Key words: calibration, phosphorus, potassium, diffusion, mass flux.

INTRODUCCIÓN

Tener un buen dato analítico es algo deseable pero no suficiente. Es necesario que las metodologías para evaluar la fertilidad del suelo estén correlacionadas y calibradas; si no lo están, no se podrá medir el contenido real de nutrimentos del suelo y por lo tanto será difícil hacer buenas recomendaciones de fertilizantes. Eckert (1987) considera que en el proceso de análisis de suelo para evaluar su fertilidad se deben incluir diferentes pasos interrelacionados, ellos son: el muestreo del suelo en el campo, la preparación de la muestra, el análisis químico, la interpretación de resultados y la recomendación de fertilizantes y enmiendas. Para lograr lo anterior se debió realizar primero todo un programa de correlación (Corey, 1987) y de calibración (Evans, 1987).

De las tres etapas que Barber (1962) considera que gobiernan el proceso de absorción de nutrientes por la planta, sólo una de ellas está relacionada con el suelo y se trata del movimiento de iones desde la superficie de los sólidos del suelo hasta la superficie de la raíz. Las otras dos etapas están relacionadas con el movimiento de nutrientes desde el exterior de la raíz al interior y su posterior traslocación a otras partes de la planta.

Para que los iones sean utilizados por la planta, éstos deben liberarse y moverse desde el sólido que los contiene hasta la solución del suelo y llegar a la

* Ph. D. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Correo electrónico: rdzapata@unalmed.edu.co; rdzapata@unal.edu.co

superficie de la raíz donde son absorbidos. Las raíces de las plantas mantendrán este movimiento hasta que sea agotada la reserva disponible del ión.

El diagnóstico y el pronóstico en el análisis de suelo

El principio básico de la evaluación química de la fertilidad de un suelo es el de proveer información de su estado nutricional, que es el diagnóstico, así como el de predecir la respuesta relativa a la aplicación de fertilizantes, que es el pronóstico. El estado nutricional de los suelos cultivados varía y las prácticas de manejo cambian, por lo que el diagnóstico y el pronóstico que se pueden hacer con los análisis de suelo fallará, si continuamente no se están correlacionando y calibrando los métodos (Evans, 1987).

Correlación y calibración

Cualquier extractante es útil para evaluar la disponibilidad de un nutrimento en el suelo, si éste previa y continuamente se ha correlacionado y calibrado (Cate y Nelson, 1965; Corey, 1987). Algunos autores como León (1994), Stelly y Halmiton (1967); Waugh et al. (1973), usan los términos correlación y calibración indistintamente para referirse a la relación o asociación entre los resultados analíticos y las respuestas de los cultivos, mientras que Corey (1987) y Evans (1987) consideran que son dos procesos distintos y que uno debe darse después del otro.

La correlación expresa el grado de concordancia que existe entre la extracción química y la cantidad del nutrimento presente en el suelo; este análisis permite separar los suelos en dos poblaciones: suelos deficientes y suelos suficientes; para el caso de un suelo donde el nivel de suficiencia se haya superado aplicando fertilizantes, esta correlación se debe dar entre la cantidad extraída y las dosis crecientes de fertilizante aplicadas al suelo. Mientras más estrecha sea esta relación, medida por algún estadístico, mejor se considera el método químico. Los estudios de correlación sólo intentan determinar la eficacia extractiva de los métodos utilizados y conviene que estos se apliquen a un gran número de suelos y de nutrimentos.

Una vez seleccionada la metodología química por el proceso de correlación, se procede a la calibración con los cultivos y suelos seleccionados, bajo unas condiciones agroecologicas y técnicas de manejo específicas. La calibración relaciona la cantidad extraída por el método químico, previamente seleccionado en el paso de la correlación, con el rendimiento del cultivo.

Cuando la cantidad de un nutrimento i en el suelo es deficiente la producción vegetal o la cantidad de nutriente tomada por el cultivo, Yi, puede ser expresada de la forma siguiente:

$$Y_{1=} f_1 (c,m.\ Fi, s, cl) \quad (1)$$

donde: c: es el cultivo seleccionado; m: son las prácticas fitotécnicas y de manejo agrícola en general, incluyendo el manejo de plagas, de enfermedades, de malezas y las formas de fertilización; Fi: es la cantidad de nutrimento i presente en ese momento en el suelo, en condición deficitaria; s: es un suelo o grupo de suelos con unas particularidades físicas, químicas y biológicas, incluyendo las cantidades de otros nutrimentos en condiciones no deficitarias ni tóxicas; cl: representa las influencias meteorológicas durante el desarrollo del cultivo.

Por otra parte, si el extractante químico, Qi, del nutrimento i, ha demostrado estar relacionado con la cantidad de este presente en el suelo a través de la fertilización con dicho elemento, se tiene la función siguiente:

$$F_1 = f_2 (Qi)e \quad (2)$$

donde el sufijo e se refiere a las condiciones estándares para ejecutar la metodología de extracción del nutrimento i. Como condición estándar se entiende el procedimiento realizado en el laboratorio, el cual incluye la preparación de la muestra, la relación suelo: solución extractora, el tiempo y la forma de agitación, la manera de separar el suelo de la solución extractora (filtración, centrifugación). Una vez separada la solución extractora del suelo, se puede utilizar la técnica analítica mas conveniente para cuantificar la cantidad extraída. La correlación está representada por la ecuación (2).

La calibración resulta de relacionar el rendimiento o cualquier medida biométrica de la planta con la cantidad extraída del nutriente por el método químico seleccionado con la ecuación (1):

$$Y_1 = f_3\,(Qi)c,m,s,cl,e \quad (3)$$

La calibración está representada por la ecuación (3) e indica que Yi puede describirse cuantitativamente mediante los valores del análisis químico, Qi, siempre que la relación se aplique al ecosistema agrícola seleccionado, al grupo de suelos escogidos, con el manejo ya definido y en determinadas condiciones estándares de análisis; cualquier cambio en alguna de estas condiciones, le disminuye capacidad de diagnosticar y predecir al análisis de suelo.

Difusión y Flujo de Masas

Una fracción muy pequeña de los nutrimentos que toma la planta, se encuentra en la solución del suelo, por lo que debe ser abastecida continuamente por la fase sólida, que actúa como reservorio. Estos reservorios pueden ser: el complejo de intercambio, los sólidos inorgánicos parcialmente solubles, los compuestos orgánicos mineralizables, los iones adsorbidos y los complejos órgano metálicos. Los extractantes utilizados por los métodos químicos actúan de diferentes manera, según la forma como se presente el nutrimento en la fase sólida, aunque la naturaleza química de las formas extraídas no siempre se conoce (Olsen y Khasawaneh, 1980).

Una adecuada nutrición de la planta está determinada por la concentración de iones en la solución que rodea a la raíz. Consecuentemente, las raíces de las plantas podrán remover cantidades significativas de iones, si estos se pueden mover rápidamente, desde el sólido hasta las superficies de las raíces (Barber, 1984).

El flujo de masas es el movimiento de iones a través del suelo hasta la raíz, causado por el movimiento convectivo del agua absorbida por la planta. La cantidad de nutrimentos que se mueven por éste flujo, está relacionada con la cantidad de agua transpirada por la planta y la concentración de la solución del suelo (Barber, 1984). Cuando el flujo masa y la intercepción radical no suplen adecuadamente de iones a la raíz, la difusión trae a estos hasta la superficie de las raíces (Barber, 1962).

La difusión de nutrimientos sucede por el movimiento browniano o movimiento térmico de los iones en la solución del suelo causado por un gradiente de concentración entre la solución del suelo y la solución que baña a la raíz. Cuando existe este gradiente se da un movimiento de materia, desde la zona de mayor concentración, hasta la zona donde ésta sea menor. La raíz continua absorbiendo iones, el equilibrio no se alcanzará y estos continuarán difundiéndose hacia ella. Si la velocidad de absorción por la raíz es mayor que la velocidad de desorción del ión desde el sólido del suelo se crea deficiencia en la planta. Algunos modelos de predicción de absorción de nutrientes por la planta consideran que la intercepción radical como una forma de difusión en función de la edad de la planta (Barber, 1984).

Por la forma como actúan los extractantes químicos, se espera que exista una correlación significativa solo para los nutrientes que llegan a las raíces de la planta por difusión. Si los nutrientes los toma la planta por flujo de masas, esta correlación no se dará (Barber, 1984).

Calibración de métodos químicos para P y K

Los cultivos de flores en el Oriente Antioqueño se realizan en camas formadas con suelos del horizonte A de Andisoles mezclados con materiales compostados. Estas se encalan y se les aplican fertilizantes potásicos y fosfatados. Durante las semanas que se desarrolla el cultivo se fertirrigan con soluciones que contienen todos los macro y micro nutrientes.

Es común observar en estos cultivos una fuerte deficiencia de K en crisantemos en la semana cinco después de sembrados, situación que no se explica por los niveles de K aplicados al suelo y por la adición continua de este elemento que se hace con el fertirriego. Los análisis de suelo muestran valores altos que reflejan la aplicación que se ha hecho y la continua aplicación por el fertirriego. Es un reto explicar el porqué de esta deficiencia. Respuesta que se podría buscar en la calibración del método o en el mecanismo como llega el K del suelo a las raíces del cultivo.

Esta investigación se realiza con el fin de buscar la explicación porque se ha encontrado correlación significativa con soluciones extractantes para P y no se ha logrado tener correlaciones significativas para K. Se espera que si se identifica la forma como el nutriente llega a la superficie de la raíz se encuentra la explicación buscada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología desarrollada procura identificar la forma como se mueven el P y el K en el suelo. Para hacer esto, se colocó un cilindro de PVC con suelo sobre un plato de cerámica húmedo con un contenido de humedad a capacidad de campo y dejando la parte superior descubierta para facilitar la evaporación del agua, por diferencia del peso se calculó la cantidad de agua perdida durante 10 días. Al final de estos días se hicieron secciones delgadas del cilindro de suelo y se determinaron las cantidades de fósforo y potasio por Bray 2 y acetato de amonio 1M N pH 7, respectivamente. Para identificar cual de los mecanismos de difusión y flujo de masas aporta P y K a la planta se utilizó la metodología desarrollada por Vargas et al (1983) y Toro (1994). Se determinó la cantidad total de nutrientes extraídos por crisantemos (*Dendranthema grandiflora*, Var. Vero) cada semana hasta la cosecha, para lo cual se muestreo suelo y planta (raíces y parte aérea) durante doce semanas que dura el ciclo del cultivo. Igualmente se evaluó la velocidad de absorción de nutrientes por la planta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación se presentan y discuten de la manera siguiente: inicialmente se presenta la información sobre la movilidad iónica del fósforo y el potasio en el suelo, luego los resultados de la absorción de potasio por el crisantemo para ilustrar como la forma de llegar el potasio a las raíces de esta planta influye en su evaluación química por los métodos utilizados para evaluar su disponibilidad.

Se observa en la figura 1 que el movimiento de agua causado por la evaporación hizo que el potasio se distribuyera en el suelo, se acumuló una mayor cantidad de potasio en la superficie y esta disminuye con la profundidad. A medida que ascendía el agua, el potasio es arrastrado y acumulado en superficie.

En investigaciones previas Zapata (1992) ha encontrado que en estos Andisoles el complejo de intercambio retiene con baja energía una fracción del potasio, especialmente cuando se tienen valores altos de Ca intercambiable (Cuadro 1). Lo anterior, favorece que esta parte del potasio sea fácilmente movilizada a medida que asciende el agua del suelo. El fósforo tiene un comportamiento diferente al potasio. Los Andisoles fijan fuertemente este elemento y no permiten que este se mueva por flujo de masas en el suelo, como se evidencia en la figura 1.

En la figura 2 se observa que las cantidades de nutrientes que la planta ha absorbido durante las doce semanas que se muestreo aumentan continuamente. Entre las semanas cuatro y cinco las cantidades absorbidas no se incrementan y es en la época donde se observa la deficiencia foliar de este elemento.

Con el objeto de entender esta deficiencia se graficó la velocidad de absorción en función del tiempo y se presenta en la figura 3.

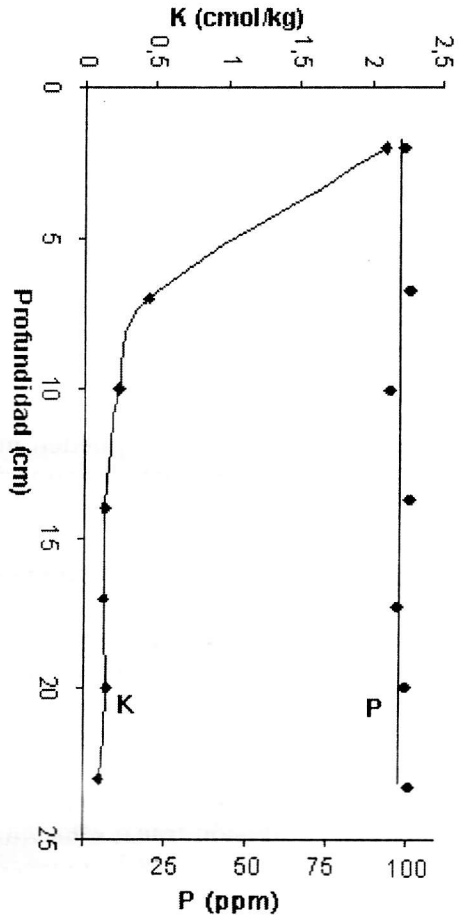


Figura 1. *Distribución del fósforo y potasio en profundidad por acción del flujo de masas en el suelo después de evaporarse una lámina de 0,55 cm de agua.*

Cuadro1. *Cantidades de elemento en el suelo de la cama durante los doces semanas que duró el cultivo del crisantemo.*

Semana	$N\text{-}NO_3$	P	B	K	Mg	Ca
	ppm			$cmolkg^{-1}$		
1	85	120	2.4	0.22	6.9	19.9
2	5	76	0.8	0.82	6.6	18.4
3	32	87	0.9	1.51	7.5	21.1
4	51	110	1.0	1.76	6.9	25.7
5	135	115	2.9	4.55	5.8	24.1
6	162	125	2.2	2.30	7.1	22.7
7	24	145	1.9	0.91	6.2	25.7
8	232	143	1.7	0.98	7.0	28.3
9	69	110	0.8	0.65	5.0	18.3
10	134	105	1.0	2.30	9.7	25.7
11	49	105	1.1	2.90	6.1	26.2
12	105	94	1.0	0.97	5.4	19.1

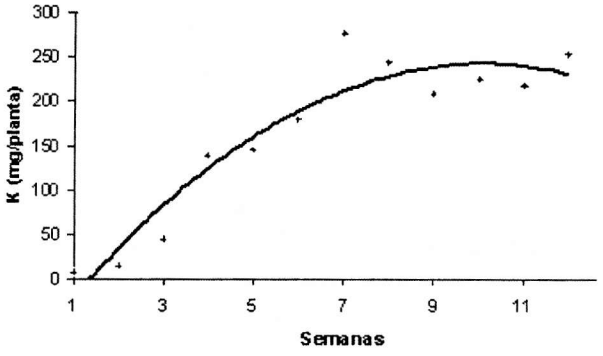


Figura 2. *Cantidades de potasio absorbidas por el crisantemo durante doce semanas.*

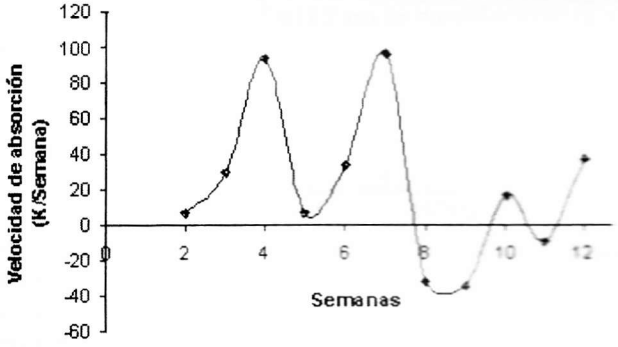


Figura 3. *Velocidad de absorción del potasio(mg/semana) en el tiempo que dura el cultivo.*

La velocidad de absorción del potasio por la planta es alta en las primeras cuatro semanas, se desacelera y se reactiva después de la semana cinco; luego decae como se observa en la figura 2 para finalmente incrementarse. Las raíces toman el potasio que esta retenido con baja energía (Zapata 1995) en la época de mayor demanda por la planta. Se esperaba que en la semana siete se presentara una nueva deficiencia pero esta no se presentó posiblemente debido a que a partir de la semana dos se inició la aplicación de una solución de fertirriego con 120 ppm de potasio entre otros nutrientes.

Las cantidades de fósforo tomadas por la planta en el tiempo se presentan en la figura 4. Estas cantidades se incrementan a medida que se desarrolla el cultivo. El crisantemo toma fósforo del suelo durante todos sus estados de crecimiento.

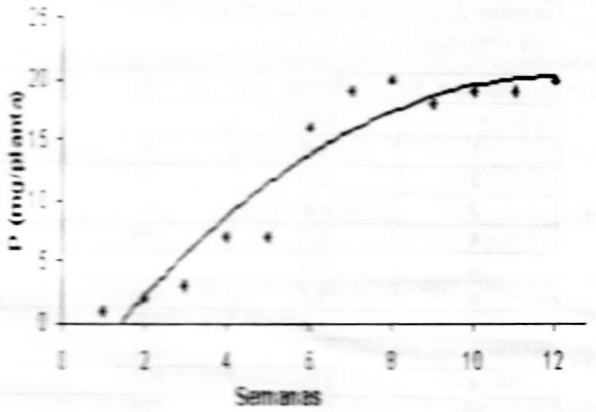


Figura 4. Cantidades de fósforo absorbidas por el crisantemo durante doce semanas.

En la figura 5 se observa que la velocidad de absorción de fósforo durante el tiempo de desarrollo del cultivo es baja en la primeras tres semanas y luego se incrementa fuertemente en las semanas cinco y seis para luego decrecer y no absorber más fósforo. La baja velocidad inicial de absorción de fósforo puede estar influida por el poco desarrollo de raíces en esta etapa de la planta que alcanza a 1.9 m de longitud (cuadro 2).

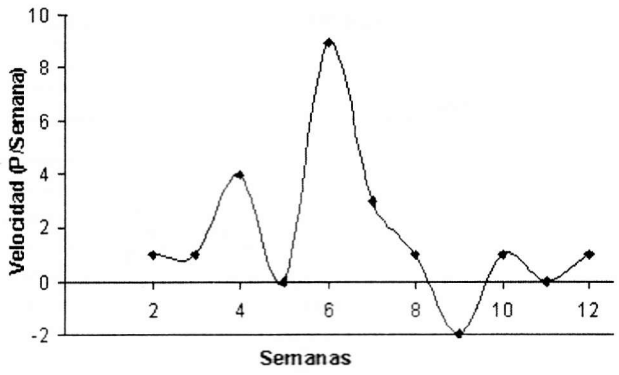


Figura 5. Velocidad de absorción del fósforo (mg/semana) en el tiempo que dura el cultivo.

En las figuras 6 y 7 se presentan los mecanismos que aportan nutrientes a las raíces de las plantas. La difusión es el mecanismo que predomina en la nutrición de fósforo ya que aporta casi el 100 % de la cantidad que toma la planta. En el caso del potasio la difusión no es importante como mecanismo que aporta este nutriente en las primeras semanas de desarrollo de la planta; en este estado de desarrollo de la planta es el flujo de masas el que facilita la llegada de potasio a las raíces, hasta llegar a la semana 4 cuando los dos mecanismos, difusión y flujo de masas aportan potasio en proporciones iguales.

Como se observó en la figura 1 una fracción del potasio se mueve por flujo de masas, lo cual explica el aporte que hace este mecanismo en las primeras semanas para suministrar potasio a las raíces, una vez agotada esta fracción, el potasio que queda en los coloides intercambiadores es la fuente desde donde se difunde hacia la raíz. La desorción de este potasio es más lenta que la absorción por la raíz creándose la deficiencia de potasio en la planta.

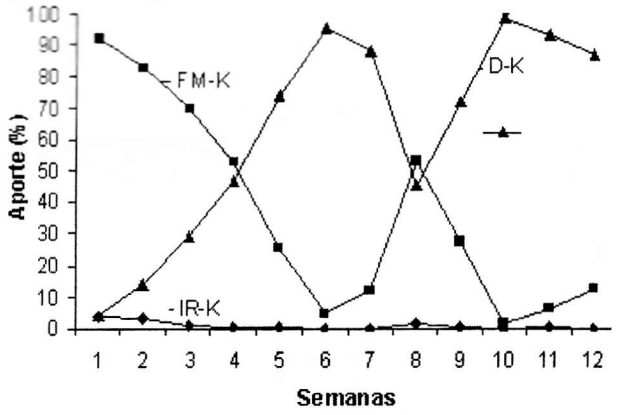


Figura 6. Cantidad de potasio en porcentaje aportada por cada uno de los mecanismos que suplen nutrientes a las raíces de la planta (D: difusión, FM: flujo de masas, IR: intercepción por raíces).

Cuadro 2. *Longitud de raíces y cantidades de elementos absorbidos por la planta de crisantemo durante las doce semanas de crecimiento.*

Semana	Raíces	K	P	Ca	Mg	B
	(m)	mg/planta				
1	1,9	8	1	2	1	0,01
2	1,3	15	2	4	2	0,01
3	1,9	45	3	8	4	0,05
4	3,5	139	7	22	10	0,10
5	6,4	146	7	21	9	0,09
6	8,1	180	20	24	11	0,07
7	9,6	276	20	29	11	0,09
8	10,2	244	20	36	12	0,12
9	11,6	209	14	44	20	0,18
10	14,2	226	15	51	25	0,18
11	15,7	217	19	46	26	0,19
12	13,2	254	20	41	30	0,20

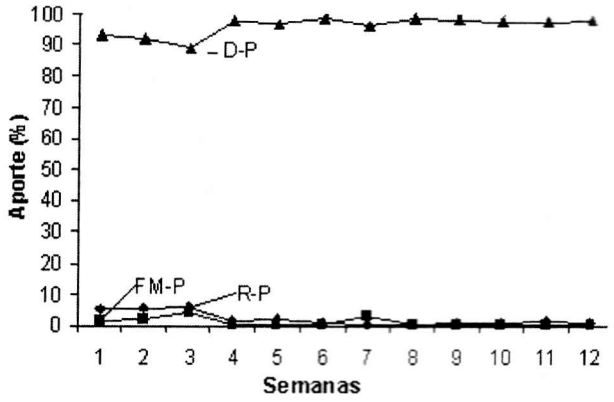


Figura 7. *Cantidad de fósforo en porcentaje aportada por cada uno de los mecanismos que suplen nutrientes a las raíces de la planta (D: difusión, FM: flujo de masas, IR: intercepción por raíces).*

El síntoma visual de deficiencia de potasio en el cultivo se observa en la semana cuatro, época en donde los dos mecanismos aportan por partes iguales la cantidad de potasio que toma la planta y es previo a la semana tres del desarrollo, en la que se tiene la mayor demanda de este nutriente. La deficiencia se da porque la planta toma potasio a una velocidad mayor a la que los dos mecanismos le aportan a las raíces. El potasio fácilmente disponible que se mueve por flujo de masas se agota y la planta debe hacer uso de un potasio que se libera a una velocidad.

Las cantidades de potasio extraído del suelo con acetato de amonio 1M pH 7 no se correlacionó (r = 0.1459) con el potasio absorbido por la planta, figura 8. Por lo tanto, este método no permite predecir la disponibilidad de potasio en este suelo para este cultivo.

La cantidad de fósforo extraída con Bray 2 se correlacionó significativamente (r = 0.8476) con la cantidad que la planta absorbió. Esto muestra lo calibrado que es este método para evaluar la disponibilidad de fósforo.

Los extractantes químicos son soluciones ácidas, básicas y/o de sales que actúan generalmente de dos maneras: aumentando la solubilidad del compuesto que contiene el nutrimento o reemplazándolo en el compuesto; no son selectivos para hacer la extracción. Un nutriente extraído puede provenir de

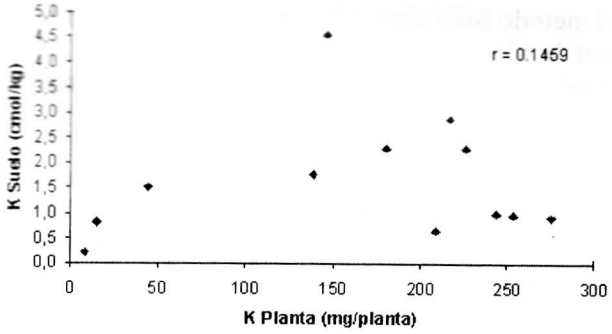


Figura 8a. Relación entre la cantidad de potasio extraído con acetato de amonio 1M pH y el absorbido por la planta.

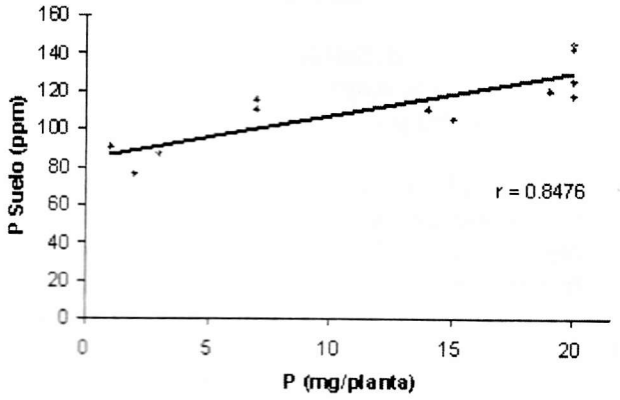


Figura 8b. Relación entre la cantidad de fósforo extraído con Bray 2 y el absorbido por la planta.

diferentes fuentes. Así, Bray 2 puede solubilizar fósforo adsorbido o de diferentes compuestos precipitados como una sal de aluminio o de hierro. El potasio es extraído del complejo de intercambio al ser reemplazado por el NH_4^+ de la solución extractora, pero igualmente puede extraerse de compuestos de potasio de baja solubilidad como algunos fertilizantes que pueden estar presentes en el suelo.

CONCLUSIÓN

En esta investigación se observó que los iones de potasio y fósforo tienen diferentes formas para moverse en el suelo y que las raíces de las plantas tienen diferentes mecanismos para absorberlos.

La difusión fue el mecanismo que aporta el fósforo a las raíces lo cual permitió que se correlacionara

el método Bray 2 con la cantidad de fósforo tomada por la planta. El acetato de amonio 1M pH 7 no mostró esta correlación al no predominar ninguno de los mecanismos.

La deficiencia de potasio que se presenta en la semana cinco en crisantemos se debe a que el suelo no suministra el potasio a las raíces a la velocidad a la que estas lo absorben.

BIBLIOGRAFÍA

BARBER, S. A. 1962. A diffusion and mass flow concept of soil nitrient availability. Soil Sci. 93:39-49.

BARBER, S. A. 1984. Soil Nutrient Biodisponibility. A Mechanisistic Approach. John Willey and Sons. New Yirk. 397 p.

CATE, R. B. y L. A. NELSON. 1965. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina Agr. Exp Stn. International Soil Testing Series. Tech. Bull. N° 1.

COREY, R. B. 1987. Soil test procedures: Correlation. En: J. R. Brown (Ed.) Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation. Am. Soc. of Agr. Madison, Wi. 15-22p.

ECKERT, D. J. 1987. Soil test interpretation: Basic cation saturation ratios and sufficiency levels. En: J. R. Brown (Ed.) Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation. Am. Soc. of Agr. Madison, Wi. 53-64p.

EVANS, C. E. 1987. Soil test calibration. En: J. R. Brown (Ed.) Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration and Interpretation. Am. Soc. of Agr. Madison, Wi. 23-30p.

LEON, S. A. 1994. Evaluación de la fertilidad del suelo. En: F. Silva (Ed.) Fertilidad de suelos. Diagnóstico y Control. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Santafé de Bogotá. 155-186p.

OLSEN, S. R. y F. E. KHASAWNEH. 1980. Uses and limitations of physical chemical criteria for assessing the status of phosphorous in soils. En: F. E. Khasawneh (Ed.) The role of phosphorous in agriculture. Am. Soc. of Agr. Madison. Wi. 301-404p.

STELLY, M. y H. HAMILTON. 1967. Soil testing and plant analysis. Part 1 Soil analysis. Am. Soc. of Agr. Madison, W.

TORO, L. F. 1994. Evaluación de los mecanismos que suplen el N, K, Ca, Mg y B a la raíz del rosal (*Rosa sp.*) Bajo condiciones de invernadero. Tesis Ing. Agrónomo. Univ. Nacional, Medellín. 58 p.

VARGAS, R., E. J. MEURER y I. ANGHINONI (1983). Mecanismo de suplemento de fósforo, potasio, calcio e magnesio as raizes de milho em solos do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo. 7: 143-148.

WAUGH, L. D., R. B. CATE y L. A. NELSON (1973) Discontinuous models for rapid correlation, interpretation and utilization of soil analysis and fertilize response data. North Carolina State University, Raleigh. 105p.

ZAPATA, N. 1995. Termodinámica y cinética de intercambio ionico potasio calcio en un Andisol de Antioquia. Tesis Químico. Univ. de Antioquia, Medellín. 56 p.

COMISIÓN III - FÍSICA, CONSERVACIÓN Y MANEJO

APROXIMACIÓN METODOLÓGICA AL MANEJO POR SITIO-ESPECÍFICO DEL SUELO PARA LA SOSTENIBILIDAD Y COMPETITIVIDAD DE CULTIVOS TRANSITORIOS EN COLOMBIA

SOME APPROACHES FOR SITE-SPECIFIC SOIL MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE AND COMPETITIVE ARABLE CROP PRODUCTION IN COLOMBIA

*Fabio R. Leiva Barón**

RESUMEN

La agricultura específica por sitio (AEPS), también llamada agricultura de precisión, pretende optimizar la producción agrícola a partir del manejo de la variabilidad específica de los agroecosistemas. Dentro de la AEPS, el manejo de suelos es quizás el área de mayor investigación y aplicación a nivel mundial. El manejo por sitio-específico del suelo permite un mejor conocimiento de la unidad productiva y facilita la utilización de los insumos necesarios, en la cantidad requerida, en el sitio adecuado y en el momento oportuno, minimizando los impactos ecológicos negativos y mejorando la productividad. A pesar de estas ventajas, un punto crítico es su rentabilidad; subsiste el problema de justificar financieramente las inversiones extras en tecnología y los costos de obtención de la información necesaria para determinar los factores limitantes en la producción y corregirlos. En el presente artículo se plantean posibles beneficios ambientales y económicos del manejo por sitio-específico del suelo, enfatizando en las implicaciones del concepto de variabilidad y en alternativas tecnológicas y de gestión de la información en cultivos transitorios. El análisis muestra que es posible reducir costos en la investigación y en la aplicación práctica del manejo por sitio-específico del suelo mediante el uso de tecnologías adecuadas, mejoras de la eficiencia en la generación y manejo de información, así como en el uso adecuado de la geoestadística. El manejo por sitio-específico del suelo tiene un gran potencial en el desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles y competitivos en nuestro medio, pero se requiere mayor compromiso y apoyo para avanzar en su investigación en Colombia.

Palabras claves: Agricultura de precisión, geoestadística, tecnología de la información.

ABSTRACT

Site-specific management (SSM), also called precision farming, is based on variability of agro-ecosystems and aimed at optimizing crop production. Site-specific soil management (SSSM) is one of the main areas of research and field applications of SSM and may lead to improved knowledge of crop production and precise application of inputs which in turn reduces risk of environmental damage and enhances crop productivity. In spite of that, economics of SSM is a matter of concern, particularly in terms of technology investment and cost of acquiring data and converting it to information. The objective of this paper is to point out possible environmental and economics benefits of SSSM in Colombia, emphasizing the concept of variability and possibilities for technology and information management in arable crops. The results show that there is scope to reduce costs on research and field application of SSSM

* Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Apartado Aéreo 14490, Bogotá, D. C. fax: 057 1 3165176. Correo electrónico: frleivab@unal.edu.co

where using appropriate technology, improved information management and systematic geostatic methods. SSSM has a great potential for arable crop production. More support for research on SSM in Colombia is needed.

Key words: precision agriculture, geostatistics, information technology.

INTRODUCCIÓN

La producción agraria nacional está experimentando cambios profundos. El reciente cierre de negociaciones en el Tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos y los acuerdos comerciales con Mercosur y otros países plantean un sistema macroeconómico más abierto, y como consecuencia una producción agropecuaria expuesta a mayor competencia con productos provenientes de otros países. Adicionalmente, se tienen exigencias cada vez mayores de las comunidades hacia una agricultura más amigable con el ambiente; en particular, los consumidores muestran mayor interés sobre la manera como se producen los alimentos y sobre la calidad e inocuidad de éstos. Así, el productor del campo encuentra grandes presiones para cumplir con guías ambientales e implementar buenas prácticas agrícolas, manteniendo la productividad y bajos costos de producción. En otras palabras, se exige una agricultura competitiva y sostenible en mercados nacionales e internacionales. ¿Cómo responder entonces a tantas exigencias simultáneamente? El riesgo es alto; quien no cumpla con las nuevas condiciones puede salir del mercado.

En este contexto, una parte considerable de la agricultura en nuestro país se encuentra en alto riesgo. Tal es el caso de los agroecosistemas cuyo manejo se basa en recomendaciones generales, con labores bastante similares aún en distintas regiones geográficas, sin tener en cuenta las especificidades propias del cultivo, del sitio y de la agroempresa. Ese manejo inadecuado conlleva a un pobre entendimiento del proceso productivo, a degradación ambiental y uso ineficiente de los recursos disponibles, trayendo consigo baja productividad, altos costos de producción y dificultades para competir.

La agricultura específica por sitio (AEPS) es una concepción que busca optimizar el proceso productivo basada en la variabilidad del agroecosistema (Leiva, 2003). La AEPS permite un mayor conocimiento del sistema productivo, facilita la utilización racional de los insumos y puede mejorar la productividad, aportando beneficios considerables en aspectos técnicos, ambientales y económicos (Zhang et al., 2002.). Dentro de la concepción de la AEPS, el manejo de suelos es quizás el área de mayor investigación y aplicación a nivel mundial. Con el manejo por sitio-específico del suelo se busca optimizar la gestión de este recurso de acuerdo con sus características particulares, racionalizando el uso de insumos externos y promoviendo una producción ambientalmente sana y rentable. Así, el manejo por sitio-específico del suelo se plantea como una opción para estimular una agricultura más ecológica y competitiva. Sin embargo, para su implementación es necesario contar con tecnología adecuada e información confiable, las cuales pueden resultar costosas frente al posible beneficio.

En el presente artículo se plantean beneficios ambientales y económicos del manejo por sitio-específico del suelo, enfatizando en las implicaciones del concepto de variabilidad, y en alternativas tecnológicas y de gestión de la información en la investigación e implementación de la AEPS, en el contexto de una agricultura sostenible y competitiva en Colombia.

1. El concepto de variabilidad y sus implicaciones en la práctica agrícola

La AEPS se basa en el manejo de la variabilidad del agroecosistema. Así, es necesario precisar los diferentes tipos de variabilidad y su posible grado de control en la agricultura.

La variabilidad puede ser natural, inducida (antrópica), espacial o temporal (Tabla 1). Esta diferenciación es importante para poder establecer las causas de la variabilidad y definir sistemas de manejo.

Para el manejo del cultivo bajo la concepción de AEPS, además de la variabilidad de los diferentes parámetros, es importante establecer los factores sobre los cuales se tiene control y aquellos sobre los cua-

Tabla 1. *Diferentes tipos de variabilidad en sistemas agrícolas*

Tipo de variabilidad	Característica	Ejemplos
Natural	Debida a procesos de la propia naturaleza	Características de los suelos, del clima, de la topografía y de las especies vegetales y animales
Inducida	Debida a las actividades antrópicas y en particular a las prácticas de manejo en los cultivos	Compactación en la cabeceras de los lotes debido a maquinaria agrícola, resistencia de ciertos individuos por uso indebido de agroquímicos
Espacial	Indica las variaciones que ocurren en una finca y aún en un mismo lote, y se determina mediante muestreos en diferentes sitios	Contenidos de un nutriente en el suelo o diferencias en rendimiento de un cultivo en distintos sitios del lote
Temporal	Indica las variaciones que ocurren en el tiempo, y se determina mediante muestreos en diferentes lapsos o épocas	Cambios en el clima, en el contenido de humedad del suelo o de un nutriente durante el ciclo del cultivo

Fuente: Adaptado de Leiva (2003)

les se tienen escasas posibilidades de intervenir (Tabla 2). Desde los puntos de vista técnico y económico, el manejo del cultivo se debe orientar hacia aquellos factores que tienen alto impacto sobre la producción, presentan mayor variabilidad y pueden ser controlados. Este es el caso del manejo de nutrientes del suelo, una de las áreas de mayor desarrollo en AEPS. En contraste, el clima (temperatura, humedad, régimen de lluvias) es una de las fuentes de variación más importantes en agricultura, con grandes implicaciones para la producción del cultivo; sin embargo, en la práctica difícilmente podemos modificarlo en un cultivo en particular, a menos que se trabaje en condiciones controladas bajo cubierta (invernadero).

Tabla 2. *Grado de control y de variabilidad temporal de factores relacionados con el suelo que afectan la productividad del cultivo*

Posible control	Variabilidad temporal	Manejo en campo
Estructura del suelo	Relativamente alta en cultivos transitorios. Baja variabilidad en perennes, particularmente en aquellos ya establecidos	Sistema de labranza, adición de materia orgánica
pH	Relativamente baja, depende de la fertilización y del uso de correctivos	Uso de correctivos y manejo de la fertilización
Disponibilidad de agua	Alta	Sistemas de riego y de drenaje
Nivel superficial del suelo	Relativamente baja, depende de prácticas mecánicas de manejo del suelo	Sistemas de labranza y adecuación de tierras
Nutrientes del suelo	Relativamente alta, depende de la rotación de cultivos y de la fertilización	Manejo de la fertilización, adición de materia orgánica, uso de correctivos
Encharcamientos	Relativamente baja, depende de la topografía y del clima	Sistemas de drenaje y nivelación del terreno
Escaso control		
Textura del suelo	Bastante baja	En algunos casos, por adición de otros tipos de suelo
Clima	Relativamente alta	Cultivos bajo cubierta (invernaderos)
Topografía	Bastante baja	Adecuación de tierras (?)
Factores desconocidos	Alta, media, baja	Desconocido

2. Alternativas tecnológicas y de gestión de la información en la investigación e implementación de la AEPS

La AEPS involucra básicamente cuatro (4) fases: i) Medición y recolección de datos; ii) Análisis de datos y generación de información; iii) Establecimiento y aplicación de sistemas de manejo por sitio (toma de decisiones); iv) Evaluación y seguimiento (Figura 1). La siguiente discusión se centra en el análisis y discusión de posibles alternativas para mejorar las tres primeras fases.

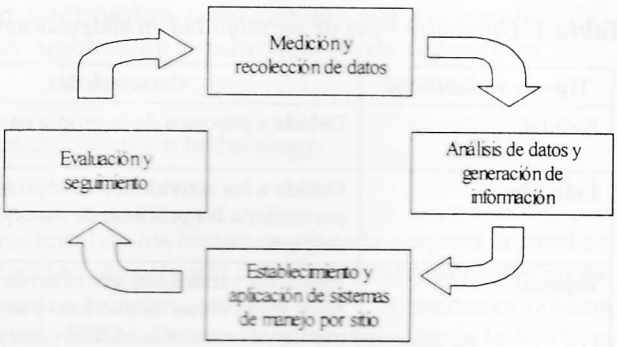


Figura 1. Fases para la agricultura específica por sitio (AEPS)

2.1 Tecnologías adecuadas

En países desarrollados se utilizan tecnologías relativamente sofisticadas para facilitar el manejo por sitio-específico (Tabla 3); y, a medida que se generaliza su adopción el costo disminuye, haciéndolas más atractivas (Zhang et al., 2002). Sin embargo, estas tecnologías distan de ser una alternativa factible para nuestras condiciones; entre otras, debido a economías de escala; esto significa que se requiere un tamaño mínimo de finca para justificar financieramente la inversión (Leiva et al., 1997), a menos que sea un trabajo multipredial (contratistas).

En la implementación del manejo por sitio-específico en nuestro país se tienen barreras, tales como los costos, el acceso limitado y la necesidad de adaptación de la tecnología, aunado al bajo nivel de gestión de un sector importante de los productores agrícolas. Por consiguiente, se hace necesario incentivar y financiar la investigación evaluativa y adaptativa de metodologías y tecnologías (hardware y software) aplicables a sistemas productivos en nuestro medio. P. ej. en el proyecto "Manejo sostenible del suelo bajo la concepción de agricultura de precisión", dirigido por Leiva y colaboradores en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, en cultivos de arveja y maíz en la Sabana de Bogotá, se utilizan diferentes niveles tecnológicos, incluyendo algunos sencillos e intensivos en uso de mano de obra; tal es el caso, de la generación de mapas digitales, con el apoyo de un computador, usando como guía las hileras de los cultivos y un decámetro, para obviar el uso del GPS (http://agronomia.unal.edu.co).

2.2. Medición y recolección de datos

Para el manejo por sitio-específico es vital contar con información confiable; sólo a partir de ésta se puede identificar, cuantificar y analizar la variabilidad del agroecosistema y sus causas probables, y así, definir estrategias de manejo. La fase de medición y recolección de datos es de particular relevancia, pues-

Tabla 3. Tecnologías utilizadas en países desarrollados en las diferentes fases de la AEPS

Fase	Tecnología utilizada
Muestreo y recolección de datos	Sistemas de posicionamiento global (SPG), sensores locales o remotos, mapas (digitales), fotos (digitales), sistemas de información geográfica (SIG), computador, maquinaria y equipo especializados, sistemas de posicionamiento geográfico (SPG)
Análisis de datos y generación de información	Sistemas de información geográfica (SIG), mapas digitales, computador
Establecimiento de sistemas de manejo y aplicación de insumos	Maquinaria y equipo especializado (sistemas de aplicación de tasa variable), sistemas de posicionamiento geográfico (SPG), mapas digitales, sistemas de soporte de decisiones (SSD), computador
Evaluación y seguimiento	Mapas digitales, sistema de soporte de decisiones (SSD), computador

to que en ésta no se busca un valor promedio de una variable en un lote, sino más bien establecer la correlación espacial de una o más variables dentro del lote o zona. Senay et al. (1998) clasificaron los métodos para medir la variabilidad a nivel de campo en: mediciones continuas, discretas y remotas.

La más común de las mediciones continuas ("sobre la marcha") es la elaboración de mapas de rendimiento del cultivo, p. ej. con un sensor en la cosechadora combinada (Leiva et al., 1997). Las mediciones discretas en puntos específicos son las más usadas en estudios de suelo y de desarrollo del cultivo, p. ej. mediciones directas en campo o muestreo del suelo para evaluar sus propiedades en el laboratorio. Las mediciones remotas se realizan con la ayuda de satélites o aeronaves con sensores y pueden cubrir todo o la mayor parte de un lote (Plant, 2001).

El conocimiento previo del clima y del lote, incluyendo la génesis del suelo y el manejo agronómico, facilita definir el muestreo discreto de suelos más adecuado en puntos específicos, tanto para el manejo por sitio-específico, como para experimentos de campo. Las cuadrículas regulares (redes rígidas o grillas) son uno de los métodos más utilizados para el muestreo y tienen la ventaja de que permiten evaluar la existencia de dependencia espacial de una variable. Sin embargo, su uso puede presentar desventajas, p. ej. cuando una línea de la cuadrícula coincide con surcos de fertilización, o bien cuando existen diferentes series de suelos o pendientes en el lote. En estos casos se recomienda un muestreo estratificado. En el proyecto de Leiva y colaboradores se viene muestreando el suelo y el cultivo utilizando una cuadrícula de 25X25 m en dos lotes de dos hectáreas cada uno, para un total de 32 puntos de muestreo por lote. Sin embargo, previo a iniciar el experimento, mediante red rígida se realizó un estudio detallado de suelos con el fin de determinar posibles zonas de muestreo.

El método discreto por puntos, en el cual se toman muestras para llevar al laboratorio, presenta algunos inconvenientes: el tiempo de muestreo y aquel transcurrido hasta obtener resultados suelen ser considerables, así como los costos de muestreo y de los análisis. El uso de equipos para adquisición directa de datos en campo es una alternativa que conduce a ahorros significativos de tiempo y probablemente resulta más económica. No obstante, esto depende de la confiabilidad y el costo del equipo. Recientemente se han desarrollado equipos de campo con sensores, entre los cuales se destacan: el espectrómetro infrarrojo para determinar contenido de humedad en la planta; el medidor de conductividad eléctrica en el suelo (de buena correlación con los contenidos de arcilla y humedad del suelo); y, el medidor foliar de clorofila para evaluar el nivel de nitrógeno en las plantas (Plant, 2001). Godwin et al. (2003) desarrollaron un método de campo de bajo costo para evaluar la variabilidad en la textura y por consiguiente el tipo de suelo, midiendo la inducción electromagnética (EMI) en el suelo a capacidad de campo.

Los sensores remotos permiten generar información sobre el estado de la vegetación o del suelo, mediante medidas de reflectancia (la razón de la energía reflejada sobre la energía incidente como una función de la longitud de onda) o emitancia (energía radiante). Esa información es suministrada en películas fotográficas o de manera digital; estas últimas han ganado bastante aceptación y su disponibilidad ha mejorado en los últimos años. Una destacada utilización de la fotografía digital, en estudios de cultivos, es el desarrollo de índices de vegetación, que son combinaciones algebraicas de la reflectancia medida en el dosel de la planta para diferentes longitudes de onda (Plant, 2001). El uso de sensores remotos digitales puede resultar económico y permite tomar decisiones sobre la marcha; pero la tecnología está en desarrollo y no siempre es accesible en nuestro medio; de otro lado, las escalas disponibles a veces no corresponden a las requeridas o pueden ser muy costosas, y en ciertos casos es necesario realizar muestreos en campo para establecer correlaciones con los valores obtenidos por dichos sensores. Godwin et al. (2003) utilizaron una cámara fotográfica digital adaptada a una avioneta para establecer en tiempo real el desarrollo de cultivos de cereales, calculando un índice de vegetación a partir de la medición del macollamiento (densidad de tallos) y área verde. A partir de este índice se realizó, sobre la marcha, la fertilización nitrogenada del cultivo. El método resultó más apropiado y económico que el uso de mapas históricos de rendimiento del cultivo; además permite reducir el potencial de percolación del nitrógeno, con lo cual se disminuye del riesgo de eutrofización.

La tecnología y los métodos para recolección de datos con fines de manejo por sitio-específico se encuentran en sus inicios en el país. Se debe promover la investigación en este tema.

2.3 Análisis de datos y establecimiento de sistemas de manejo

El análisis de datos debe conducir a establecer los factores limitantes en la producción y en lo posible a corregirlos, mediante el establecimiento de sistemas de manejo que disminuyan los impactos ambientales negativos y mejoren la rentabilidad. Esto representa un gran reto, puesto que la producción de cultivos depende de una serie de fenómenos y variables, muchas veces poco entendidos y que interactúan de manera compleja. Dado el volumen y las características de la información generada, el manejo por sitio-específico exige una visión sistémica que permita su comprensión e implementación de una manera integral.

La geoestadística es la herramienta básica para analizar datos georreferenciados y para generar información confiable. El análisis geoestadístico sistemático permite conocer las características de variabilidad y de correlación espacial de los datos, así como estimar valores de una variable en sitios donde no ha sido medida (Goovaerts, 1999). Así mismo, permite estimar distancias adecuadas de muestreo (estadística univariada), identificar correlaciones entre variables y definir zonas de manejo específico en campo (estadística multivariada).

Estadística univariada. Este análisis aplica los conceptos básicos de la geoestadística a una sola variable. Previo a este análisis se usa la estadística descriptiva para determinar medidas de tendencia central y de dispersión, existencia de valores atípicos ("outliers") y conocer si los datos corresponden a una distribución normal. Esto incluye el cálculo de la media, la mediana, la varianza, el coeficiente de variación, los valores máximos y mínimos, y los coeficientes de sesgo y de curtosis. Luego se establecen las características de variabilidad y de correlación espacial de los datos usando el semivariograma, el cual se calcula con la ecuación (Vendrusculo et al., 2004):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(Xi) - Z(Xi+h)]^2 \quad (1)$$

Donde: γ(h) es la semivarianza; N(h) es el número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$ separados por una distancia h.

A partir de los datos originales se calcula el semivariograma experimental, el cual luego debe ser ajustado a un modelo matemático teórico (Figura 2). Los parámetros fundamentales del semivariograma son la pepita (Co), la meseta (C) y el rango (a). Si el valor γ (h) se incrementa con la distancia y estabiliza en un cierto valor (modelos exponencial, esférico y gausiano) se tiene una variable que presenta correlación espacial y dentro del rango (a) se pueden estimar, mediante interpolación, valores de la variable en sitios donde no ha sido medida. De otro lado, un semivariograma sin C ni rango (a) (modelo lineal) indica una dispersión infinita de la variable. Por su parte, el efecto pepita puro muestra un comportamiento totalmente aleatorio, sin correlación entre los valores de la variable en los diferentes sitios de muestreo, cualquiera sea la distancia que los separe.

Para las estimaciones de una variable en cualquier lugar del campo bajo estudio, a partir de los valores conocidos, comúnmente se utiliza kriging (krigeage), un estimador lineal que permite realizar interpolaciones de manera insesgada y con mínima varianza. Para el cálculo del estimador kriging, Z*(Xo), se utiliza la fórmula (Vendrusculo et al., 2004):

$$Z^*(Xo) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(Xi) \quad (2)$$

Donde: *N* es el número de valores $Z(x_i)$ usados en la predicción; λ_i es el peso asociado a cada valor medido X_i.

Una vez realizados los análisis anteriores se pueden construir de manera precisa mapas de distribución espacial de la variable bajo estudio. Estos mapas de variabilidad de diferentes propiedades son básicos para el manejo por sitio-específico del suelo (Figura 3).

La estimación de distancias adecuadas de muestreo en campo se puede realizar a partir de los

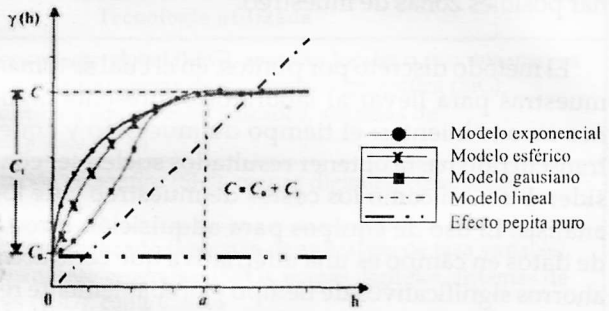


Figura 2. Modelos teóricos de semivariograma

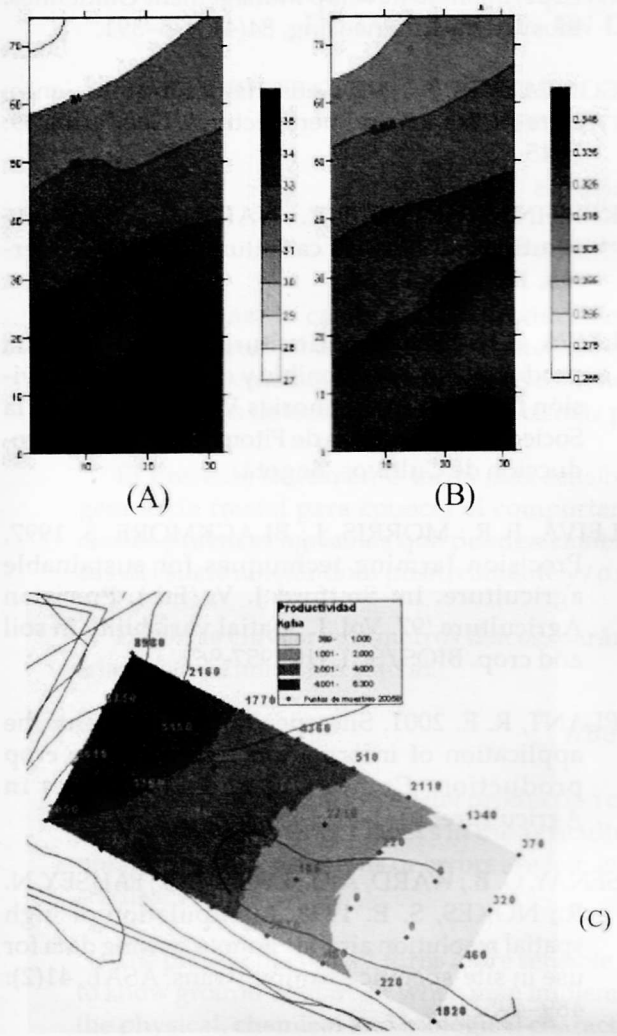


Figura 3. Mapas de humedad (A), densidad aparente (B) y productividad (C) en un cultivo de arveja en el Centro Agropecuario Marengo (Sabana de Bogotá)

semivariogramas y de kriging. Sin embargo, los semivariogramas y el estimador kriging sólo pueden ser conocidos después de tener los datos de campo. Kerry et al. (2004) propusieron el concepto de "semivariograma promedio", concluyendo que es posible establecer semivariogramas estandarizados para diferentes tipos de suelos, con el fin de orientar el muestreo en sitios donde no se dispone de información. Sus resultados indican que intervalos de muestreo equivalentes a la mitad del rango (a) resultan prácticos en campo. Para la evaluación de estas alternativas en nuestro país se requiere mayor investigación e interacción de la comunidad científica.

Geoestadística multivariada. El análisis geoestadístico multivariado aplica los conceptos de la geoestadística a más de una variable y permite conocer correlaciones entre variables en la zona de interés. El co-kriging (co-krigeage) es una generalización del kriging cuando las variables guardan relación entre sí. Para su utilización se requieren los modelos de semivariograma de cada una de las variables y el semivariograma cruzado entre las variables (Zhang et al., 1992). Para las variables correlacionadas Z_A y Z_B, el semivariograma cruzado se calcula con la ecuación:

$$\gamma_{AB}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_A(x_i) - Z_A(x_i + h)][Z_B(x_i) - Z_B(x_i + h)] \quad (3)$$

Donde: $\gamma_{AB}(h)$ es la semivarianza; Z_A la variable de interés y Z_B la variable auxiliar (secundaria).

La identificación de correlaciones entre variables resulta de particular interés con el fin de reducir el tiempo y los costos de muestreo. Esto es posible cuando una variable permite predecir el comportamiento de otra que presenta un comportamiento espacial similar (Krishnamurti and Naidu, 2003). En nuestro país no se han reportado estudios sobre el particular, por lo cual se requiere investigar esta promisoria alternativa para el manejo por sitio-específico del suelo. El desarrollo de métodos de predicción, tal como el uso de funciones de edafotransferencia, puede aportar notablemente en este proceso (Sonneveld et al., 2003).

Un problema relativamente común en estudios de suelos es el número elevado de variables que dificultan su interpretación. En estos casos se puede usar el análisis de componentes principales (ACP), el cual a partir de *n* observaciones de *p* variables, analiza si es posible representar adecuadamente esta información con un número menor de variables construidas como combinaciones lineales de las originales. En el proyecto de Leiva y colaboradores se viene usando el ACP, para reducir el número de variables de estudio, manteniendo una adecuada descripción de la estructura de dependencia de los datos de variables físicas y químicas del suelo y de rendimiento del cultivo. El método ha permitido definir zonas para el manejo de la fertilidad en cultivos de maíz y de arveja, con lo cual se espera mejorar la eficiencia de la utilización de los fertilizantes, la producción y la rentabilidad de esos agroecosistemas.

CONCLUSIONES

El presente artículo presenta y discute posibles beneficios ambientales y económicos del manejo por sitio-específico del suelo, enfatizando en las implicaciones del concepto de variabilidad y en alternativas tecnológicas y de gestión de la información en cultivos transitorios. Como resultado se puede concluir:

- La concepción del manejo específico por sitio puede aportar significativamente a la sostenibilidad y competitividad de la agricultura en Colombia, particularmente porque conlleva a un mejor conocimiento de la unidad productiva y una gestión más racional de insumos. En su implementación se requiere contar con tecnologías adecuadas.

- La recolección de datos y en general la obtención de información son aspectos críticos a tener en cuenta para guiar la toma de decisiones en ensayos de campo y en la implementación de la AEPS. El uso de métodos geoestadísticos sistemáticos permite mejorar la eficiencia y reducir costos en la gestión de la información.

- El desarrollo de la AEPS en nuestro país se encuentra en sus inicios. Se requiere mayor compromiso e interacción de la comunidad científica, y más apoyo de los organismos financiadores, con el fin de promover investigaciones que generen el conocimiento necesario para estimular su adopción en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto "Manejo sostenible del suelo en sistemas de cultivos transitorios bajo la concepción de agricultura de precisión", del Grupo de Investigación Desarrollo Sostenible y Gestión Ambiental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

BIBLIOGRAFÍA

GODWIN, R. J.; WOOD, G. A.; TAYLOR, J. C.; KNIGHT, S. M.; WELSH, J. P. 2003. Precision farming of cereal crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. Biosystems Engineering, 84(4): 375–391.

GOOVAERTS, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma 89: 1–45

KRISHNAMURTI, G. S. R. ; NAIDU R. 2003. Solid–solution equilibria of cadmium in soils. Geoderma, 113 (1-2): 17-30.

LEIVA, F. R. 2003. La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista In: Memorias VIII Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos, Bogotá.

LEIVA, F. R.; MORRIS, J.; BLACKMORE, S. 1997. Precision farming techniques for sustainable agriculture. In: Statford J. V. (Ed.). Precision Agriculture '97. Vol. I. Spatial variability in soil and crop. BIOS/SCI. UK, 957-965.

PLANT, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture, 30 (1-3): 9-29.

SENAY, G. B.; WARD, A.D.; LYON, J. G.; FAUSEY, N. R.; NOKES, S. E. 1998. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming. Trans. ASAE, 41(2): 489–495.

SONNEVELD, M. P. W.; BACKX1, M. A. H. M.; BOUMA, J. 2003. Simulation of soil water regimes including pedotransfer functions and land-use related preferential flow. Geoderma 112: 97– 110.

VENDRUSCULO, L. G.; MAGALHAES, P. S. G.; VIEIRA, S. R.; DE CARVALHO J. R. P. 2004. Computational system for geostatistical analysis. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), 61 (1):.100-107.

ZHANG, N.; MAHOUA, W.; WANG, N. 2002. Precision agriculture - a worldwide overview. Computers and electronics in agriculture, 36: 113-132.

ZHANG, R.; MYERS, D. E.; WARRICK, A. W. 1992. Estimation of spatial distribution of soil chemical using pseudo cross-variograms, Soil Science Society of America Journal, 56(5): 1444-1452.

APROXIMACIÓN FRACTAL PARA EVALUAR EL MANEJO DE LOS SUELOS EN DIFERENTES AMBIENTES

THE FRACTAL APPROACH TO EVALUATE THE SOILS MANAGEMENT IN DIFFERENT ENVIRONMENTS

*Raúl Madriñán Molina**

RESUMEN

El mantener la capacidad de producción vegetal del suelo tal vez sea el parámetro más importante para el establecimiento de labores en la explotación agrícola. Lo que trae un aumento de operaciones de campo, cuyos beneficios o desaciertos son sentidos, a largo plazo, muchas veces detectables con estudios más precisos.

El presente documento torna más sensibles los parámetros de evaluación utilizando la geometría fractal para conocer el comportamiento del suelo cuando el hombre implementa ciertas prácticas agrícolas que pueden cambiar las características físicas, químicas y biológicas del suelo afectándolo positivamente y/o negativamente.

Palabras claves: parámetros físicos, parámetros químicos, parámetros biológicos, geometría fractal, dimensión fractal.

ABSTRACT

Maintaining grounds vegetal production capacity is perhaps the most important parameter for the establishment of labors in the agricultural operation. What brings an increase of field´s operations whose benefits or errors are felt, in the long term often detectable with more precise studies.

The present document turns more sensible the evaluation parameters using fractal geometry to know ground's behavior when man implements certain agricultural practices that can change the physical, chemical and biological characters of the ground affecting it positively and / or negatively.

Key words: physical parameters, chemical parameters, biological parameters, fractal geometry, fractal dimension.

INTRODUCCIÓN

El suelo es para el hombre uno de los recursos más importantes, por lo que es necesario cuidarlo, conservarlo y recuperarlo, para asegurar la sostenibilidad de su producción. Sin embargo, es sometido en muchas ocasiones a un manejo inadecuado, sufriendo procesos degradativos acarreando una disminución de su productividad, a tal punto que tierras ricas y productivas dejan de serlo, generando problemas económicos y sociales.

A través de generaciones los agricultores han basado sus expectativas, usando sus tierras en una forma sostenible, otros lo hacen con base en recomendaciones de los servicios de extensión o de re-

* I. A. MSc. y PhD. Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. Correo electrónico: rmadrinanm@palmira.unal.edu.co

sultados experimentales que por lo general no se adaptan a las condiciones y necesidades de cada agricultor.

El incremento de la población, la falta de conciencia del hombre, el desconocimiento de la importancia de los recursos naturales, las políticas económicas mal fundamentadas y la presión económica, entre otros factores que vienen creciendo con el tiempo, han sido la causa de cambios drásticos en el uso de la tierra y de la expansión de la frontera agrícola en el mundo.

En las prácticas de campo se han hecho muchos cambios sin estudios previos de reconocimiento de los recursos de la tierra donde se indique cuál es el uso más apropiado y qué efectos pueden tener sobre el ambiente. Esto ha llevado a la pobreza, a la degradación ambiental, explotación económica ineficiente y pérdida de recursos materiales como suelo y agua.

En los estudios sobre pérdida de la productividad del suelo, son considerados comúnmente factores físicos y químicos, prestando por lo general una menor atención a los cambios biológicos en macro y microorganismos del suelo. Mantener la capacidad de producción vegetal del suelo tal vez sea el parámetro más importante para la fijación de las labores y rompimiento del ciclo de la agricultura itinerante. Por otro lado esta práctica incluye un aumento de operaciones, cuyos beneficios son sentidos, generalmente a largo plazo muchas veces detectables solamente con mediciones más elaboradas.

1. GENERALIDADES DE LOS PARÁMETROS

Los efectos que puede traer la implementación de prácticas de manejo al suelo, hace necesario relacionar los estudios del suelo con otras disciplinas como la biología, la ecología, la entomología, entre otras, por lo que a continuación relacionaré algunos parámetros que deben ser estudiados con mas detalle para conocer la sostenibilidad del suelo en diferentes ambientes:

- Física de suelos: densidad aparente, porosidad, retención de agua, agregación, color, temperatura, textura.
- Química y fertilidad del suelo: carbono total, humus (fracciones de ácidos fúlvicos libres, ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y humina), materia orgánica libre, mineralización, relación C/N.
- Biología del suelo: biomasa microbiana (C, N, P, S), enzimas (nitrogenasa, ureasa, fosfatasa, celulosa, proteasa), respiración del suelo (evolución del suelo), mesoorganismos y macroorganismos.
- Fitotecnia: Productividad de los cultivos, desarrollo radicular, desarrollo de la parte aérea, contenido de nutrientes de la parte aérea, control de malezas, necesidad del uso de herbicidas, eficiencia en la cobertura del suelo, control de erosión, facilidad del corte y/o cosecha (manual o mecánica), sustentación de niveles de cosecha año tras año, adecuación a rotación de cultivos, competición del abono verde por nutrientes y agua con el cultivo principal, igualmente en cultivos asociados.
- Socio – económicos: lucratividad, demanda de mano de obra, independencia tecnológica, nivel de satisfacción del agricultor, mejoría de la calidad de vida de éste, estabilización de las comunidades agrícolas.
- Ecológicas: disminución de la polución por nitratos, etc.; disminución en el uso de agrotóxicos en el suelo, necesidad de uso de herbicidas.
- Sistemas integrados de producción: Evaluaciones realizadas dentro de sistemas de producción incluyendo diversos factores y fuera del esquema experimental tradicional con parcelas, evaluación de las fincas auto sustentables.

2. COMENTARIOS SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS EN EL USO DE CIERTAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

Ciertas prácticas realizadas por el hombre afectan positivamente y/o negativamente la sostenibilidad de los suelos en diferentes condiciones ambientales, las cuales, son detectables utilizando parámetros cada vez más sensibles. El uso de la geometría fractal sirve para interpretar parámetros biológicos, químicos y físicos del suelo, dentro de su rango de escalas en espacio y tiempo, tornándose

una herramienta valiosa pues muestra como los objetos naturales exhiben generalmente simetría y/o afinidad dentro de valores límites de escala. (Perfect y Kay, 1995).

A continuación se dará una breve explicación sobre los conceptos básicos y después haciendo uso de algunas propiedades que se analizarán fractalmente.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

2.1.1. Dimensión Euclidiana y Dimensión Fractal

En la geometría euclidiana se puede medir fácilmente el largo (L) de una línea recta a través de una cierta escala de medida E, donde E = L, y se obtiene:

$$L(E)\, N\, E^{1} = Constante \quad (1)$$

En la ecuación (1) N es el número de unidades de medida, necesario para cubrir la distancia L. El exponente unitario es consistente con la dimensión euclidiana de la línea recta. En la medida en que disminuye E, N aumenta proporcionalmente, y viceversa, se obtiene un valor constante para la longitud (E). Análogamente, para 2 y 3 dimensiones, una superficie o volumen, respectivamente, tendríamos dimensiones Euclidianas 2 y 3.

Si la longitud que se quiere medir es tortuosa, la ecuación exponencial (1) permanece válida, excepto que L (E) no es constante para cualquier E. Para tales situaciones se demuestra que:

$$F = N\, E^{D} = Constante \quad (2)$$

Por analogía con la ecuación (1), F es la medida de la longitud y D es la dimensión que produce un valor constante para F, independientemente de la escala de medida E escogida. Esa dimensión D es llamada dimensión fractal de la línea y refleja el grado de tortuosidad de la misma. Un valor de D igual a 1, coincide con la dimensión topológica de la línea recta, significa que su longitud es constante, independiente de la escala de observación, por lo tanto se trata de una línea sin irregularidades en cualquier escala de observación.

Si se combinan las ecuaciones (1) y (2), tenemos:

$$L(E) = F\, E^{1-D} \quad (3)$$

Lo que equivale a: $L(E) = (FE^{-D})\, E^{1}$, o sea, son necesarias $F\, E^{-D}$ unidades de medida E para cubrir la longitud de la línea. Si la dimensión fractal D es mayor que 1 (línea tortuosa) una dimensión de la escala E representa un aumento del producto FE^{-D} mas que proporcional a la disminución de E, haciendo que L (E) aumente.

Mandelbrot (1983) sugiere que su dimensión Euclidiana (DE) sea designada por incremento fractal (Di). En el caso de una dimensión o incremento fractal seria $Di = D_1 - 1$; para dos dimensiones seria $Di = D_2 - 2$, para tres dimensiones seria $Di = D_3 - 3$; donde D_1, D_2 y D_3 son las dimensiones fractales del objeto para una, dos o tres dimensiones, respectivamente. Así el incremento fractal Di de un objeto, determinado en tres dimensiones, se aplica igualmente a cualquier plano.

2.2 APLICACIONES EN FÍSICA DE SUELOS

A partir de los conceptos anteriormente presentados, y aplicados al suelo, analizaremos la figura 1 (Tyler e Wheatcraft, 1989) que intenta simular las partículas del suelo, delineando la pared de un tubo capilar.

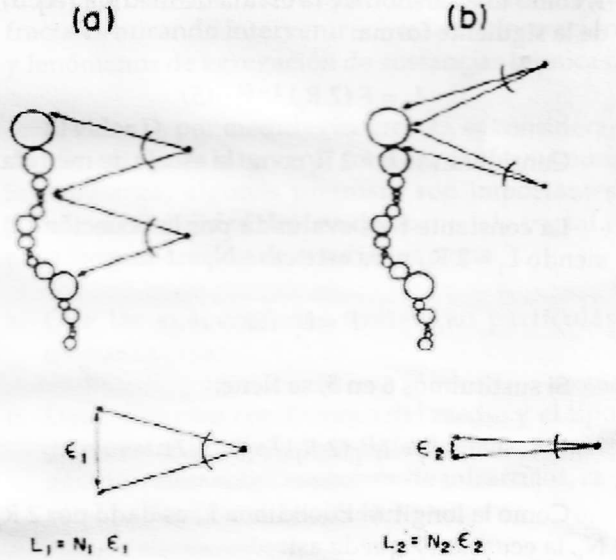


Figura 1. Representación de un tubo capilar delineado por partículas de suelo de diferentes tamaños; a) Longitud L, siendo estimado por una escala E.; b) Longitud L_2 siendo estimado por una escala $E_2 < E$. (Adaptadote Tyler y Wheatcraft, 1989).

Si ampliamos una parte de la figura 1 veremos partículas cada vez menores delineando las paredes del poro. La figura 1ª muestra la longitud L del poro medido con un compás con abertura E_1,y en la 1ᵇ el compás presenta una abertura E_2, menor que E_1. La longitud L_1 será $N_1 E_1$ y la longitud L_2 será N_2E_2, se observa que L_2 será mayor de L_1 pues la abertura menor del compás E_2 puede acompañar mejor las irregularidades a lo largo de la figura.

Arya e Paris (1981), intentaron establecer una relación entre el tamaño de las partículas del suelo para una clase textural y el tamaño de los respectivos poros, estimando la longitud de los poros a través de la siguiente ecuación:

$$L_i = 2\ R_i\ N^a_i \quad (4)$$

Donde 2 R_i es el diámetro de las partículas para una clase textural i, N_i es el numero de partículas en la misma clase i, y a es un factor que tiene en cuenta la no esfericidad de las partículas.

Utilizando los conceptos de geometría fractal, Tyler y Wheatcraft (1989) evaluaron la longitud verdadera del tubo capilar (L_i), formado por partículas de diferentes tamaños, tal como aparece en la figura 1, como una función de la escala de medida (eq. 3), de la siguiente forma:

$$L_i = F\ (2\ R_i)^{1-D} \quad (5)$$

Considerando E = 2 R_i como la escala de medida.

La constante F es evaluada por la ecuación (2), siendo L_i = 2 R_i, para este caso N_i = 1 luego:

$$F = L_i \quad (6)$$

Si sustituimos 6 en 5, se tiene:

$$L_i = L^D_i\ (2\ R_i)^{1-D} \quad (7)$$

Como la longitud Euclidiana L, es dado por 2 R_i N_i, la ecuación 7 queda así:

$$L_i = 2\ R_i\ N_i^D \quad (8)$$

Ahora bien, si se compara la ecuación 8 con la 4, se verifica que el factor empírico a de Arya y Paris (1981) es nada menos que la dimensión fractal del tubo capilar.

El volumen de las partículas y el de los vacíos para cada clase de tamaño de partículas del suelo pueden ser estimados respectivamente por las siguientes ecuaciones.

$$Vpi = {}^4/_3\ N_i\ .\ p\ .\ R^3_i \quad (9)$$

$$Vvi = \pi .\ r^2_i\ .\ L_i \quad (10)$$

R_i es el radio de las partículas en la clase i y r_i es el radio de los poros.

Las ecuaciones 8, 9 y 10 permiten la transformación de la ecuación de Laplace en una forma que relaciona el potencial mátrico del agua en el suelo ?$_i$ como el radio de partícula R_i de cada clase textural i, quedando así:

$$\Psi i = \frac{2\ .\ \sigma.cos\ \beta}{\rho.\ g\ .\ R_i} \left[\frac{2\ e\ N_i^{1-D}}{3} \right]^{-1/2} \quad (11)$$

Donde σ es la tensión superficial del agua; ß es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del capilar; ρ es la densidad del agua; g es la gravedad y es la razón de vacíos de la muestra de suelo igual al volumen de vacíos sobre volumen de partículas.

Los valores de la humedad volumétrica θ_i correspondientes al potencial hidráulico ψ_i son determinados acumulando el volumen de vacíos de la menor clase de partículas hasta la clase i. De esta forma es posible estimar una curva de retención para el suelo, conociendo su composición granulométrica. El patrón de distribución de partículas por tamaño es caracterizado por la dimensión fractal de la distribución que refleje la dimensión fractal de los poros o la tortuosidad de estos.

Turcotte, (1986), y Tyler y Wheatcraft, (1989), observaron una relación semejante a la ecuación (8), tomando la longitud L_i, el número de partículas N mayores que un R_i obtenido en un análisis textural:

$$N = K\ R^D_i \quad (12)$$

Siendo K una constante y D la dimensión fractal de la distribución textural del suelo. Una vez que la

composición textural representa una cohesión tridimensional de partículas, a dimensión D en la ecuación (12) corresponde a la dimensión fractal tridimensional D_3, cuyo incremento fractal es D_i igual a $D_3 - 3$.

Aplicando logaritmo a la ecuación (12) se verifica que la dimensión fractal puede ser evaluada por medio del coeficiente angular de la recta que relaciona log N (= Y) con log R (= X);

$$Log\ N = log\ K + D\ log\ R \qquad (13)$$

Un valor de D igual a cero representa una distribución de partículas compuesta de una sola clase. Valores de D mayores que 3 reflejan una distribución compuesta por partículas de varios tamaños, dominado por partículas pequeñas. Valores de D entre 0 y 3 corresponden a distribuciones con predominancia numérica de partículas de tamaños mayores.

2.3 APLICACIONES EN QUÍMICA DE SUELOS A LAS SUSTANCIAS HÚMICAS

Las sustancias húmicas son polielectrolitos orgánicos formados por las alteraciones de la materia orgánica, como la degradación de restos de plantas y animales (Stevenson, 1994). Son mezclas físico – químicamente heterogéneas, sin repetición estructural y falta de orden a nivel molecular. (Hayes., al,1989). Estudios espectro microscópicos de sustancias húmicas revelan su dependencia entre su composición estructural, tipo material, tanto como de su origen (Mynemi, et al., 1999).

Las partículas húmicas presentan una variedad de formas y tamaños, lo que implica porosidad y compactación variable en su estructura, tanto en estado sólido como coloidal (Swift, 1989). Esa variedad en su estructura macromolecular, que va de la forma esferoidal a la filamentosa, depende de las condiciones del medio como concentración de la muestra, pH y fuerza iónica del medio (Ghosh y Shnitzer, 1980).

El grado de irregularidad y rugosidad de la superficie de las macromoléculas húmicas tienen importancia en los procesos biogeoquímicos. (Stevenson, 1994).

Los sistemas formados por partículas húmicas son caracterizados por una naturaleza compleja e irregular, en lo que concierne a su organización molecular, morfología, porosidad, superficie y fenómenos de agregación y dispersión (Rice y Lin, 1994). La geometría fractal es la herramienta que puede describirlos.

En general, los sistemas formados por partículas húmicas no son considerados estructuras porosas, pues el tamaño de esos poros es muy pequeño comparado con la escala de la superficie de esas partículas. Con lo anterior, las partículas húmicas se presentan, solamente, como dimensión fractal de masa (Dm). En ese caso, la masa es proporcional al área superficial o como dimensión fractal superficial (Ds) y consta de dos regiones no fractales separadas por una superficie fractal (Senesi, 1994). En la generación de un modelo fractal, la autosimilitud, es investigada por medio de una ley de potencia de la forma $\rho \propto V^r$, donde ρ= propiedad v = variable, y r = exponente, que puede ser relacionado a la dimensión fractal. Esa expresión garantiza que sobre una franja de valores de escala de la variable independiente v, de por lo menos un orden de magnitud, r, puede ser calculado directamente de los datos experimentales a partir de la pendiente de la porción lineal del gráfico log ρ vs log v (Senesi, 1994).

Medidas como la turbidimetria (Senesi et al, 1996), espaciamiento de neutrones (Osterberg y mortensen, 1994), espaciamiento de rayos – x (Rice y Lin. 1993), dentro de otros, ya fueron aplicados en el estudio de fractales mirando intervenir sobre la conformación y fenómenos de agregación de sustancias húmicas.

El valor D, por medidas indirectas, es considerado eficiente para intervenir sobre su conformación. Sin embargo, algunas premisas son importantes para la confiabilidad del uso de un modelo fractal y para la comparación de resultados como:

a. Que las suspensiones contengan partículas monodispersas.
b. Determinar las condiciones del medio y el tipo de muestras (origen, contenido de cenizas, composición elemental, espectros de infrarrojos, razón E_4 / E_6, dentro de otros).

2.4 APLICACIÓN EN LA DINÁMICA DE POBLACIONES

El crecimiento de una población es un tema que interesa a los biólogos y ecólogos, entre otros. Pero tam-

bién a los matemáticos, pues al usar modelos simples como estimadores del comportamiento de la población en el tiempo, podemos encontrar uno de los ejemplos mas bellos, que nos muestra la relación entre el orden y el caos, para finalmente desembocar en el concepto fractal (Rubiano, 2002), como población entendemos un grupo de organismos pertenecientes a la misma especie que comparten un espacio determinado.

Una población comparte un depósito genético común, ya que los miembros de una población se reproducen entre sí, tiene una cierta densidad, índices de natalidad y mortalidad, una relación de edades y un potencial reproductor (Rubiano, 2002).

Los organismos presentan diferentes formas de crecimiento poblacional. En algunos casos, por ejemplo imaginemos que vamos a estudiar el comportamiento de una población de microorganismos en un espacio determinado, para ello desarrollamos el siguiente modelo (Davies, 1987) y adaptado de Talanquer (1996). La evolución de la población de microorganismos depende del ritmo de nacimientos y muertes que se presentan en su comunidad. Si suponemos que estos animales tienen un periodo de reproducción semanal y la población en la semana i era N_i, es de esperar que la población a la semana siguiente $N_i + 1$ sea proporcional a la que había la semana anterior.

Esto es: $N_i + 1 = a\, N_i$, (14)

Donde a es una constante de proporcionalidad que mide la capacidad reproductiva de los microorganismos.

En la anterior relación no hemos tenido en cuenta el efecto de la muerte de los microorganismos. Como una primera aproximación podríamos decir que el mayor numero de decesos se da por competencia entre individuos: Compiten por alimentos, por territorio, etcétera; digamos que muy pocos mueren de viejos. Entre más microorganismos haya, más difícil será que sobreviva cada uno, de ahí que no sea descabellado pensar que la probabilidad de que muera un individuo es proporcional a la población total de esa semana: N_i. Como esto se vale para cada uno de ellos, el ritmo de decesos para toda la población será proporcional a

$$N_i \times N_i = N^2_i, \text{ ó:} \quad (15)$$

$$N_i + 1 = b\, N^2_i \quad (16)$$

Si combinamos ambos efectos (nacimientos menos muertes) resulta la ley de crecimiento poblacional que esperamos:

$$N_i + 1 = a\, N_i - b\, N_i^2 = N_i\,(a - b\, N_i) \quad (17)$$

Si damos valores a las constantes **a y b** y elegimos una población inicial N_o, con ello se calcula la población de la semana siguiente N_1. Con el resultado se genera N_2, que a su vez nos lleva a obtener N_3 y así sucesivamente. Este proceso es una iteración que permite analizar la evolución de la población semana por semana. El modelo de crecimiento poblacional es sencillo pero en él está presente un elemento que puede conducirnos a resultados inesperados. La iteración contiene un término en el que la variable N_i está elevada al cuadrado y esto indica que tratamos con un sistema no lineal (la gráfica de la relación $(a\,N - b\,N^2)$ como función de N no es una línea recta).

Es conveniente suponer que las constantes **a y b** son iguales y que la población N_i esta medida con respecto a una población máxima de referencia, por lo que su valor esta siempre entre 0 y 1. Esto no altera las conclusiones finales pero si facilita los cálculos que, pueden hacerse directamente en el computador. Cuando se analiza el valor de la población como función del tiempo que predice la iteración simplificada:

$$N_i + 1 = a\, N_i\,(1 - N_i) \quad (18)$$

para diferentes valores del parámetro de crecimiento a, es posible distinguir varios casos:

a. Valores de **a** < 1 la tasa de nacimientos es tan baja que la población decrece y termina por extinguirse (Figura 2 (a)). Esto sucede sin importar cual sea la población inicial.

b. El intervalo de a entre 1 y 3, la población se estabiliza en un valor constante diferente a cero y no depende de N_o (Figura 2 (b)).

c. A partir de **a** > 3, las cosas se complican. El parámetro de crecimiento es un poco mayor que tres, la población comienza a oscilar entre dos valores diferentes (Figura 2 ©) y se dice que la solución se bifurca, se generan dos posibilidades, que visitan alternadamente en el transcurso

de las semanas. Esto se mantiene hasta **a** ≈ 3.4495, donde cada rama se bifurca de nuevo y la población oscila entre cuatro valores diferentes (Figura 2 (d)). Si continuamos aumentando el valor de a, el mismo esquema de duplicación se reproduce en cada rama y el periodo de oscilación aumenta a 8, 16, 32 (Figura 2 (e)), hasta que en a **a** ≈ 3.5699 el ciclo tiene una duración infinita. A partir de aquí, poco o nada es predecible; el comportamiento se torna caótico (Figura 2 (f)) y la evolución temporal es muy susceptible a la población inicial elegida, ejemplo **a** = 4, una diferencia 0.000001 entre dos datos iniciales hace que los resultados sean completamente distintos después de 50 iteraciones.

La transición hacia el caos se ve cuando se representa en una gráfica el valor o valores que alcanza la población a tiempos muy largos como función del parámetro de crecimiento **a**. La gráfica que se genera se conoce como **diagrama de bifurcaciones** y se presenta en la figura 3 (a). El diagrama muestra con claridad los valores de población que se visitan para cada valor de **a**: cuando es pequeño tiene una sola rama (población constante), después dos (oscilación entre dos valores) y así seguimos hasta alcanzar la región caótica que tiene una estructura muy compleja.

En la zona del caos hay muchos valores para los que la población evoluciona sin seguir un orden determinado, también tiene muchas secciones en las que se recupera el comportamiento periódico. Éstas aparecen como franjas más blancas y cuando hacemos una ampliación para analizarlas, encontramos que dentro de ellas se repite el mismo esquema de bifurcaciones y así *ad infinitud*, el caos y el orden se entremezclan siguiendo las reglas de la geometría fractal. (Figura 3) (Rubiano, 2002).

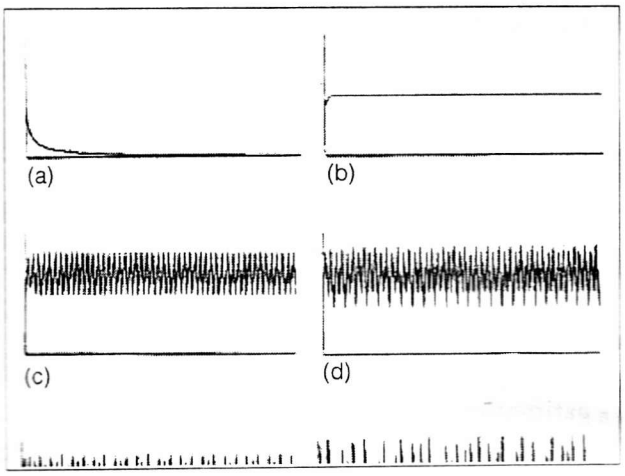


Figura 2. *Evolución de la población de microorganismos para varios valores del parámetro a. (a) a = 1.00; (b) a = 2.00; (c) a = 3.30; (d) a = 3.50; (e) a = 3.569; (f) a = 4.00. (Talanquer, 1996)*

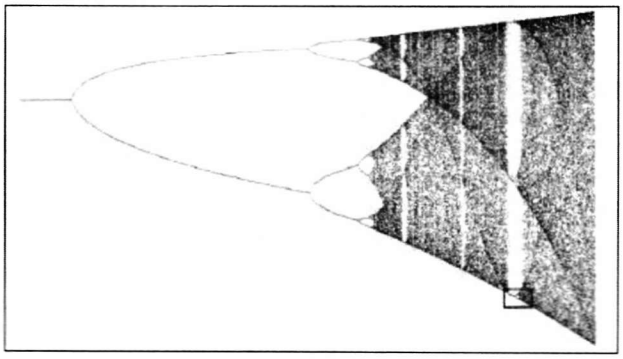


Figura 3. *Diagrama de bifurcaciones para la dinámica poblacional y el Zoom en un rincón del diagrama (Rubiano, 2002).*

CONCLUSIONES

- La aplicación de la geometría fractal permite comprender el comportamiento de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos como es la distribucción de las partículas y agregados, espacio poroso y la estructura de las diferentes sustancias húmicas.

- La dinámica de las poblaciones de los diferentes organismos que comparten un espacio en el suelo y donde nos muestra una relación entre el orden y el caos, para terminar en el concepto fractal.

BIBLIOGRAFÍA

ARYA, L.M.; J.F. PARIS. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, v.45, p. 1023-1030.

BACCHI, O.O.S., REICHARDT, K.1993. Geometría Fractal Em Física Do Solo. Sci. Agric., Piracicaba, 50 (2): 321 – 325, Jun./ Set.

C.D. ANTONINO; RUIZ, C.F. ; DE SOUZA, E. S; NETTO, A. M.; ANGULO-JARAMILLO, R. 2004. Distribuição probabilística do fator de escala de dois solos do Estado da Paraíba. Rev. bras. eng. agríc. ambient. v.8 n.2-3 Campina Grande maio/dez.

CARVALHO, J. R. P.; DECHEN, S. C. F. & DUFRANC, G. 2004. Seção I – Física do solo. Variabilidades espacial da agregação do solo avaliada pela geometria fractal e geoestatística. Ver. Brás. Ci. Solo, 28: 1 – 9.

COSTA DA SILVA, A, DE AS MENDONCA, E., 2001. Modelo fractal de substancias húmicas. Ver. Ciência Rural, Santa Maria, v. 31, n. 5, p. 903 – 908.

FUENTES, C; CELSO DANTAS, A; MACIEL NETTO, A; BRAYNER DE OLIVEIRA LIRA, C; DA SILVA PEREIRA CABRAL, J. 2005. Desenvolvimento de um modelo fractal para a estimativa da condutividade hidráulica de solos não saturados. Rev. Bras. Ciênc. Solo v.29 n.1: 51 -60. Viçosa jan./fev.

GHOSH, K., SCHNITZER, M. 1980. Macromolecular structures of humic substances. Soil Sci., v.129, p. 266 – 276.

HAYES, M.H.B., MaCARTHY, P., MALCOLM, R.L., *et al.* 1989. Structures of humic substances: the emergence of forms (3-31). In: HAYES, M.H.B., MaCARTHY, P., MALCOLM, R.L., *et al.* Humic Substance II: In search of structure: setting the scene. New York: John Wiley & Sons, 764p.

MANDELBROT, B.B. 1983. The fractal geometry of nature. W.H.Freeman, San Francisco.

MYNEMI, S.C., BROWN, J.T., MARTINEZ, G.A, *et al.* 1999. Imaging of humic substances macromolecular structures in water and soils. Science.v. 386, n.5443, p.1335-1337.

ÖSTERBERG, R., MORTENSEN, K. 1994. Fractal geometry of humic acids, temperature-dependent restructuring studied by small-angle neutron scattering. (127-132). In: SENESI, N., MIANO, T.M. Humic substances in the global environment and implications on human health. Amsterdam: Elsevier Science. 1368p.

PERFECT, E. AND B. D. KAY. 1995. Applications of fractals in soil and tillage research: A review. Soil & Tillage Research 36: 1- 20.

RICE, J.A., LIN, J.S. 1994. Fractal dimensions of humic materials (115-120). In: SENESI, N. e MIANO, T.M. Humic substances in the global environment and implications on human health. Amsterdam: Elsevier Science. 1368p

RICE, J.A., LIN, J.S. 1993.Fractal nature of humic materials. Enviro. Sci Tecnhol, v.27, p.13-414.

RUBIANO., GUSTAVO N. 2002.Fractales para profanos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Matemáticas y Estadística. 134 p.

SENESI, N. 1994. The fractal approach to the study of humic substances (3-41). In: SENESI, N., MIANO, T.M. Humic substances in the global environment and implications on human health. Amsterdam: Elsevier Science. 1368p.

SENESI, N., RIZZI, F.R., DELLINO, P., *et al.* 1996. Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH e time. Soil Sci Soc Am J, v.60, p.1773-1780.

STEVENSON, J.F. 1994. Humus chemistry – Genesis, composition, reactions. 2. ed. New York: John Wiley & Sons. 496p.

SWIFT, R.S. 1989. Molecular weight, size, shape, and charge characteristics of humic substances: some basic considerations (449-465). In: HAYES, M.H.B. Humic Substance II: In search of structure. New York: John Wiley & Sons. 764p.

TALANQUER, V. 1996. Fractus Fracta Fractal. Fractales de laberintos y espejos. La Ciencia desde mexico, num 147, sep, Fcl, CONACYT, mexico.

TURCOTTE, D.L. 1986. Fractals and fragmentation. Journal of Geophysic Research, p. 91, n.b2, p.1921-1926.

TYLER, W.S.; S.W. WHEATCRAFT. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Science Society of América Journal, v.3, p. 987-996.

VALDEZ-CEPEDA, R. D Y OLIVARES-SÁENZ, E. 1998. Geometría Fractal En La Ciencia Del Suelo. Fractal Geometry in Soil Science. Terra, v. 16, n 3, p. 277-285.

COMISIÓN IV - BIOLOGÍA Y BIOQUÍMICA

COMPORTAMIENTO DE GRUPOS FUNCIONALES (CICLO DEL C, N, P) Y ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ÁCIDA EN UN PROCESO DE COMPOSTAJE

BEHAVIOR OF FUNCTIONAL GROUPS (CYCLE OF THE C, N, P) AND ACTIVITY OF THE ACID PHOSPHATASE IN A PROCESS OF COMPOSTING

*Smith Johanna Rojas-Avila y Luz Marina Lizarazo Forero**

RESUMEN

Las relaciones entre grupos funcionales de microorganismos de los diferentes ciclos (C, N, P), poblaciones de hongos y actinomicetos y además la actividad de la fosfatasa ácida se evaluaron a través de un proceso controlado de compostaje. Se empleó el método de Tabatabai y Bremner (1969), utilizando como sustrato artificial p-nitrofenilfosfato para la actividad de la fosfatasa ácida, igualmente para el análisis microbiológico se realizó el procedimiento de diluciones seriadas y la inoculación en los respectivos medios selectivos.

La actividad microbiana fue mayor durante la fase termófila, mientras que grupos como hongos y celulolíticos junto con la actividad enzimática disminuyeron en esta fase.

Palabras claves: celulolíticos, amilolíticas, bacterias libres fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de P, fosfatasa ácida, compostaje.

ABSTRACT

The relationships among functional groups of microorganisms of the different cycles (C, N, P), the populations of fungi and actinomycetes and the activity of the acid phosphatase was evaluated through a controlled process of composting. The method of Tabatabai and Bremner (1969), was using with p-nitrophenylphosphate as artificial substrate for the evaluation of the activity of the acid phosphatase. The procedure of serially-diluted and the inoculation in the respective selective media was carried out, for the microbiologic analysis. Lastly a physiochemical analysis was made to determine the maturity and quality of the compost obtained. It was found that most of the microbial activity was developed during themophile phase, while other groups as fungi and celulolitics together with the enzymatic activity diminished in this phase.

Key words: celulolitics, amilolitics, free bacteria fixing of nitrogen, solubilizing of P, acid phosphatase, composting.

INTRODUCIÓN

El compostaje es un proceso natural que llevan a cabo bacterias, actinomicetos y hongos existentes en los propios residuos, a los que únicamente hay que proporcionarles unas condiciones ambientales idóneas (principalmente humedad y temperatura) para optimizar este proceso de transformación. En

* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Biología, Tunja; Correo electrónico: Lulizarazo@tunja.uptc.edu.co , johana402@latinmail.com

la pila de residuos a compostar se va a formar un microhábitat con características muy diferentes del entorno, lo que propicia la aparición de organismos especialmente adaptados a esas condiciones (Barral et al, 2004).

Dada esta gran diversidad biótica del compost, se presentan interacciones muy complejas entre los diferentes microorganismos, aportando un mejor conocimiento de la estructura de la comunidad microbiana que además permitiría dar una idea sobre la circulación de los nutrientes, y de la dinámica durante el compostaje, aspectos necesarios para mejorar y analizar los efectos de diferentes alternativas de manejo de residuos, (Negro et al, 2001).

Teniendo en cuenta que los procesos de compostaje contribuyen de cierta forma en los ciclos biogeoquímicos, se pueden considerar a los grupos funcionales de microorganismos de vital importancia en el ciclaje de nutrientes (Andrade, 2004). Los considerados en este estudio son aquellos que poseen una gran diversidad fisiológica que les confiere una capacidad colectiva para degradar todos los compuestos orgánicos naturales que se pongan a su alcance, permitiendo así la recirculación de la materia orgánica del suelo.

También es conocido que todas las reacciones bioquímicas durante el compostaje son catalizadas por enzimas y que ocurren en el proceso de maduración y estabilización de los materiales orgánicos. Estas enzimas en dicho proceso se clasifican en intracelulares y extracelulares las cuales son intencionalmente liberadas al exterior de las células generalmente para catalizar la degradación de sustancias poliméricas demasiado grandes para atravesar la membrana celular (Tiquia et al, 2002).

El objetivo de este trabajo fue determinar la actividad de la enzima fosfatasa ácida y algunos grupos funcionales de microorganismos como celulolíticos, amilolíticos (ciclo del carbono) fijadores de nitrógeno de vida libre (ciclo del nitrógeno) solublizadores de fósforo (ciclo del fósforo) e igualmente poblaciones de hongos y actinomicetos en cada una de las fases de un proceso de compostaje, estableciendo así mismo las relaciones que cada grupo funcional presenta en las diferentes fases del proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboraron dos pilas en la granja de hortalizas de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, UPTC, las pilas se elaboraron de forma triangular y con medidas de 1 m de altura por 1.8 m de ancho en la parte de la base. Cada pila contenía restos de supermercados, plazas de mercado, aserrín proveniente de carpinterías de la ciudad y restos de actividad agrícola pertenecientes a los cultivos de la Faculta de Agronomía en una proporción de 2:2:1 (restos de actividad agrícola: restos de supermercados y plazas: restos madereros).

Muestras de aproximadamente 500 a 700 g fueron colectadas cada quince días desde tres estratos diferentes de las pilas: superficie (85 cm de la base de las pilas), medio (50 cm de la basa de las pilas) y fondo (30 cm de la base de las pilas).

Mediciones de parámetros de control del proceso

Las mediciones de los principales parámetros de control como humedad y temperatura fueron tomadas de acuerdo con los registros climatológicos suministrados por la estación meteorológica de la Universidad. La humedad se midió manualmente tomando un puñado de compost y estrujándolo en las manos con una frecuencia de 1 a 2 semanas y la temperatura se tomó cada dos días en las dos pilas después de iniciado el proceso.

Actividad de fosfatasa ácida

La evaluación de la actividad de la enzima fosfatasa ácida fue determinada utilizando el método de Tabatabai y Bremner, (1969, 1970), el sustrato artificial empleado fue p-nitrofenilfosfato. Para cada muestra se hicieron tres replicas y sus respectivos controles.

Recuento de grupos funcionales de microorganismos

La fase de laboratorio se realizó en el laboratorio de control biológico del Grupo Manejo Biológico de Cultivos (GMBC) donde a partir de los muestreos realizados se hizo una estimación cuantitativa del número de microorganismos funcionales relaciona-

dos con los ciclos biogeoquímicos del Carbono (celulolíticos y amilolíticos) Nitrógeno (bacterias que usan glucosa como fuente de carbono) y Fósforo (solubilizadores de P); también se cuantificaron poblaciones de hongos y actinomicetos.

Se empleó el método de recuento en placa realizando diluciones seriadas de 10^{-4} y siembras por duplicado para todos los grupos de microorganismos, utilizando para ello, los medios de Wood, 1980 (celulolíticos), Pontecorvo et al, 1953 (amilolíticas), medio de Burk de Wilson e Knight, 1952 (bacterias libres fijadoras de nitrógeno que utilizan la glucosa como fuente de C), Silvestre–Bradley et al, 1982, (solubilizadoras de P), Kuster and Williams, 1964 (Actinomicetos) y medio comercial PDA para hongos.

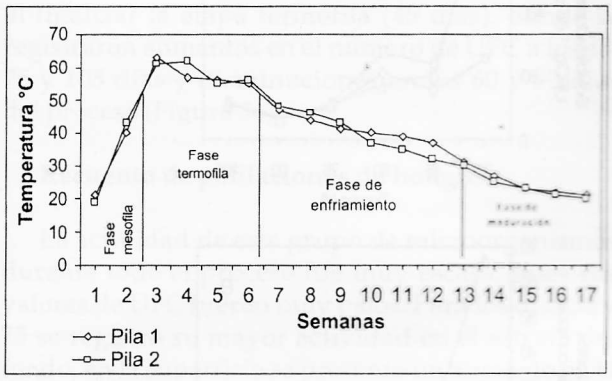


Figura 1. Variación de la temperatura durante el proceso de compostación

Las cajas se incubaron a 28 °C y las unidades formadoras de colonia UFC se contaron después de tres días para el caso de las bacterias y ocho días para los hongos. Las colonias consideradas positivas para actividad celulolítica, amilolíticas, solubilizadoras de P fueron las que presentaron un halo de degradación. En el caso de las bacterias libres fijadoras de nitrógeno se consideraron positivas todas las colonias que crecieron en el medio de cultivo.

RESULTADOS

Temperatura y Humedad

La variación de la temperatura en las pilas se muestra en la figura 1. El mayor aumento de esta variable, se registró en la tercera semana y el descenso mas notorio se evidenció a partir de la semana séptima a la quince en donde la temperatura empezó a ser constante (20 – 21°C). Con respecto a la humedad, en la mayoría del proceso, se presentaron valores entre el 40 y 60% y al finalizar el compostaje los valores estuvieron cerca del 20%.

Actividad de fosfatasa ácida

En las tres zonas (superficie, medio y fondo) no se presentaron diferencias significativas en la actividad de la fosfatasa ácida. Los valores más altos de µg de p-nitrofenol g^{-1} de compost, en las dos pilas, se reportaron en el día 90 en las tres zonas de muestreo (Figura 2. a b y c), correspondiendo a la fase de enfriamiento del proceso de compostaje.

Grupos funcionales del ciclo del Carbono

Las poblaciones de los grupos del ciclo del carbono mostraron una baja actividad durante todo el

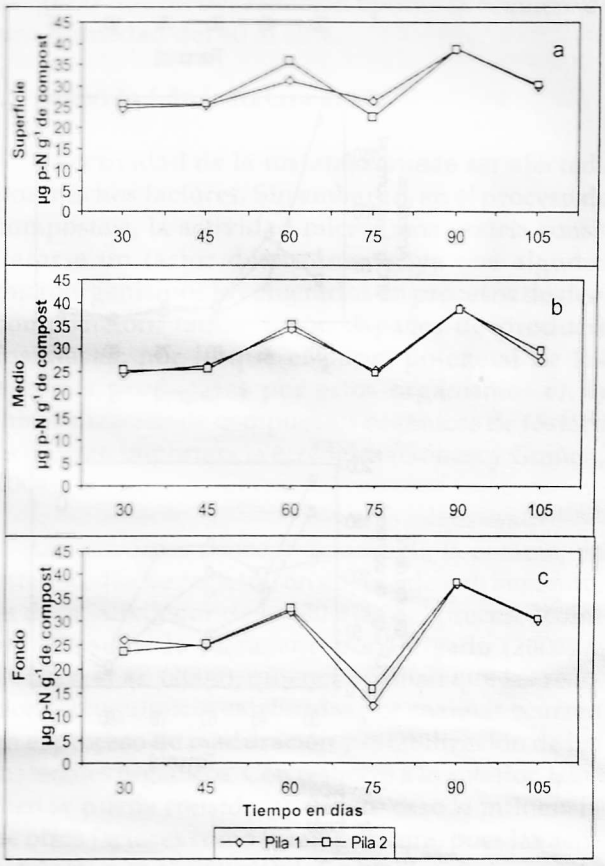


Figura 2. Actividad de la fosfatasa ácida en las tres zonas de muestreo (a) Superficie; (b) Medio; (c) Fondo.

proceso. Para el caso de los celulolíticos, en los primeros 30 días, esta población fue baja y luego incrementó gradualmente hasta alcanzar su mayor actividad en la fase de enfriamiento en los tres estratos (día 60). Para el día 90 sus números disminuyeron y luego aumentaron cuando el proceso se encontraba en fase de maduración (Figura 3a).

Con respecto a las poblaciones de amilolíticos su mayor número de UFC se observó a los 30 y 45 días en los diferentes estratos, correspondiendo a la fase termofila del proceso; a partir de la fase de enfriamiento y hasta el final del proceso este grupo funcional no superó las 15 UFC (Figura 3b).

Grupo funcional del ciclo del Nitrógeno

A lo largo del proceso de compostación, este grupo funcional presentó una mayor actividad en los tres estratos a diferencia de los grupos del ciclo del carbono. En el día 30 del proceso, este grupo registró los mayores valores de UFC en los tres estratos cuando la temperatura se encontraba alrededor de los 59°C (Figura 3c).

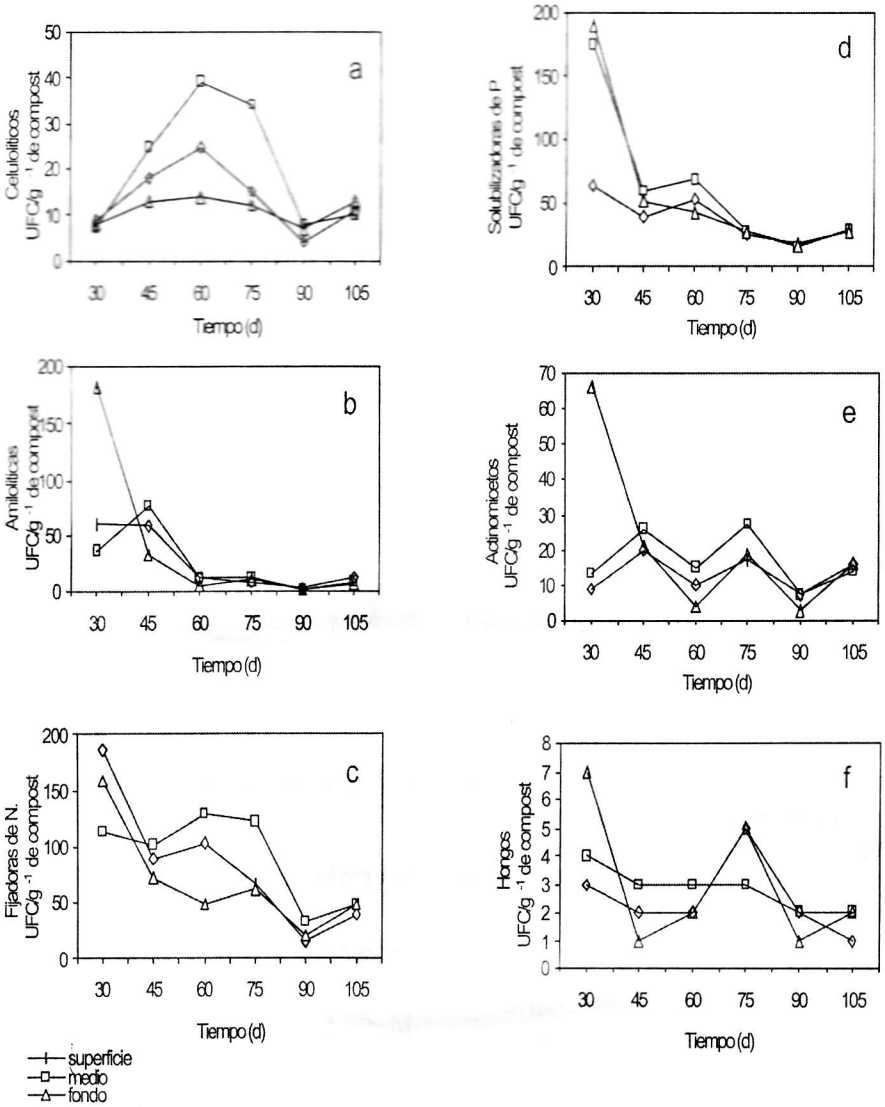


Figura 3. *Evolución de números totales de varios grupos funcionales durante el proceso de compostaje. (a) Celulolíticos; (b) Amilolíticos; (c) Fijadores de nitrógeno de vida libre; (d) Solubilizadores de fósforo; (e) Actinomicetos; (f) Hongos.*

Grupo funcional del ciclo del fósforo

La población de solubilizadores de fósforo en los tres estratos alcanzó sus máximos valores cuando el compost se encontraba en fase termofila (día 30), seguido por una disminución hasta alcanzar sus mínimos valores alrededor de los 90 días del proceso (Figura 3d). Los valores para este grupo durante el experimento fluctuaron entre 15 y 190 X 10^4 UFC/ g^{-1} de compost.

Recuento de poblaciones de actinomicetos

Para esta población, se observó en el estrato del fondo una mayor actividad al comienzo del proceso a diferencia de los otros estratos. Sin embargo, los tres estratos mostraron un comportamiento similar al finalizar la etapa termofila (45 días), donde se registraron aumentos en el número de UFC a los 45, 75 y 105 días y disminuciones en los 60 y 90 días del proceso (Figura 3e).

Recuento de poblaciones de hongos

La actividad de este grupo de microorganismos durante todo el proceso fue muy escasa, pues sus valores de UFC fueron muy bajos. Para los días 30 y 75 se registró su mayor actividad en el estrato del fondo, en la superficie se presentó un aumento en el número de UFC en la fase de enfriamiento del proceso (día 75) y para el estrato del medio los valores fueron constantes durante todo el proceso de compostaje (Figura 3f).

DISCUSIÓN

Temperatura y humedad

Con relación a la temperatura, esta variable esta efectivamente relacionada con la secuencia de etapas por las que debe pasar este tipo de procesos (etapa mesofilica, termofilica, de enfriamiento y maduración), planteadas por autores como Cegarra (1994), Lugo (1998), Negro et al. (2001), Bueno (2003) y Sztern y Pravia (2004).

En la fase mesofilica las moléculas de azúcares, almidones y proteínas de rápido uso energético, sirven de sustrato a los microorganismos mesófilos cuya actividad y multiplicación van calentando el compost; en el presente estudio, esta etapa inició con el aumento de la temperatura hasta alcanzar los 40°C y duró seis días. En la fase termofila se alcanzaron las máximas temperaturas las cuales se mantuvieron por espacio de un mes (semana 3 hasta la 6); por esto se puede decir que hubo una higienización suficiente y una descomposición muy activa del material. En la fase de enfriamiento que duró aproximadamente dos meses (semana 7 a hasta la 13), la temperatura comienza a presentar un leve descenso en las dos pilas, quizás esta disminución no afectó la continuidad en la labor de descomposición de los materiales. En la etapa de maduración la temperatura fue disminuyendo hasta alcanzar un valor estable de 20 °C en las dos pilas, en razón a que, como lo expresa Gómez (citado por Forero, 2003), se reduce la actividad microbiana.

Los porcentajes de humedad reportados en el presente estudio, coinciden con lo referenciado por autores como Röben (2002), quien indica que para asegurar una biodegradación óptima se requiere de una humedad del 40 al 60%.

Actividad de fosfatasa ácida

La actividad de la fosfatasa puede ser afectada por muchos factores. Sin embargo, en el proceso de compostaje, la actividad microbiana podría considerarse un factor determinante, ya que algunos microorganismos involucrados en procesos de descomposición, también son capaces de producir fosfatasas; por lo que el papel potencial de las enzimas producidas por estos organismos en la mineralización de compuestos orgánicos de fósforo es de gran importancia ecológica (Gómez y Guiñan, 2004).

Las máximas concentraciones de la enzima, en este estudio, se registraron en fase de enfriamiento, es decir, alrededor de los 90 días del proceso, coincidiendo con lo planteado por Delgado (2000) y Defrieri et al. (2005), quienes afirman que las reacciones bioquímicas catalizadas por enzimas ocurren en el proceso de maduración y estabilización de los materiales orgánicos. Con respecto a lo anterior, también se puede considerar en este caso la influencia de otros factores como la temperatura, pues las actividades enzimáticas disminuyen repentinamente durante la etapa termofilica, probablemente debido a la inactivación por calor, es así, que las enzimas

responsables de la degradación a altas temperaturas se desnaturalizan y se convierten en no funcionales provocando que los microorganismos no puedan nutrirse de manera adecuada (Graves, 2000 en Avendaño, 2003). El periodo en el que se registró la mayor actividad de la enzima en este estudio corresponde a una temperatura en las pilas cerca de los 37°C, encontrándose en el rango óptimo del funcionamiento de la enzima.

Otro factor importante en este proceso resulta ser la macrofauna como lombrices de tierra y otros animales del suelo que además de aparecer en las etapas de maduración del proceso, cuando las temperaturas descienden y se transforma el material orgánico en compost (Emison, 1998), también influyen de una manera significativa en la producción de esta clase de enzimas (Hyseck y Sarapatka, 1998), estos macroorganismos como gusanos y escarabajos observados en la mayoría del proceso, pudieron aumentar su número al final del compostaje y probablemente incrementaron la producción de fosfatasa en este periodo.

Grupos funcionales del ciclo del carbono

Las bacterias del ciclo del carbono tuvieron una variación significativa de acuerdo con la temperatura y con la naturaleza de los sustratos utilizados como fuentes de energía. Es así como las poblaciones de amilolíticas fueron mayores en la fase termofila, donde la actividad bacteriana es alta y donde se lleva a cabo la descomposición de los sustratos fácilmente atacables como azúcares y almidones, además, al final del proceso de compostaje, debido a la degradación de amilasa en las fases tempranas, el número de bacterias amilolíticas disminuye (Ryckeboer et al, 2003). Por el contrario, las bacterias celulolíticas presentaron una mayor actividad en la etapa de enfriamiento; según algunos autores como Sztern y Pravia (2004) afirman que después del agotamiento de los nutrientes y la desaparición de los termofilos, se desarrollan nuevamente los microorganismos que utilizan materiales más resistentes a la degradación como la celulosa. Además algunos estudios como los realizados por Levanon y Pudla (2002) corroboran los resultados obtenidos para la población de celulolíticos, pues también reportan una alta actividad de estos microorganismos al final del proceso de compostaje.

Grupo funcional del ciclo del nitrógeno

Al igual que otros grupos bacterianos, el grupo funcional del ciclo del nitrógeno presentó su mayor actividad en etapa termofila donde se presenta también la mayor disponibilidad de compuestos carbonados. Algunos autores como Andrade (2004) consideran que el proceso de fijación requiere grandes cantidades de energía por la naturaleza de la nitrogenasa, enzima responsable de esta actividad y por esto posiblemente la población de fijadores de nitrógeno decrece con el transcurso del proceso de descomposición al irse agotando estas fuentes de energía. La actividad de las bacterias fijadoras de nitrógeno está también relacionada o influenciada por la disponibilidad de nitrógeno, esta relación suele ser inversa, pues estas bacterias se proliferan en la medida que el nitrógeno disponible decrece (Carriquiriborde, 2000). De acuerdo con lo anterior se podría decir que posiblemente la alta disponibilidad de sustratos incrementa la actividad microbiana, lo que puede disminuir la disponibilidad de nitrógeno orgánico estimulando así la fijación de nitrógeno molecular.

Grupo funcional del ciclo del fósforo

El fósforo orgánico por lo general se encuentra combinado en los restos vegetales y en la materia orgánica. El comportamiento que mostró este grupo en las fases tempranas del proceso se debe posiblemente a las fuentes de carbono fácilmente mineralizables y disponibles que se encuentran en el compost justamente al comienzo del proceso, las cuales pueden intensificar la solubilización del fósforo por parte de este grupo (Sylvia et al, 1999). Además la fase termofila, a diferencia de las fases mesófilas, en los procesos de descomposición, favorecen más la mineralización del fósforo orgánico (Alexander, 1977).

Recuento de poblaciones de actinomicetos

Para el caso de los actinomicetos los resultados muestran aumentos en sus números en etapas termofila, de enfriamiento y maduración, lo anterior es consecuente con lo planteado por Labrador (2001) quien afirma que algunas especies de actinomicetos aparecen en etapas termofila y otras son más importantes durante las últimas etapas del proceso.

La mayor actividad de este grupo se presento en el fondo del compost en etapa termofila, siendo similar con lo hallado por Klamer y Bath (citados por Hogland, 2003), al compostar residuos sólidos municipales, donde la presencia de actinomicetos fue más alta en fase termofilica y lo que al parecer es característico de estos microorganismos que solo aparecen raras veces en las capas superficiales del compost (Waksman y Gordon, 1995 en Burgos, 1997). Respecto a esto, el rango óptimo de temperatura para este grupo de microorganismos está entre 25 y 37°C pero existen géneros termofilicos que crecen a temperaturas de 55 a 65°C, como es el caso de la familia *thermoactinomicetaceae* que son muy reconocidos por su aporte en la biodegradación de materia orgánica en las pilas de compost, (Ibekwe et al, 2001 en Velikonja, 2003); además las especies termófilas son componentes importantes de la microflora de los compost (Lacey, 1997). Otros trabajos así mismo reportan, que este grupo de microorganismos participa activamente en la formación de humus particularmente a temperaturas elevadas, liberando carbono, nitrógeno de nitrato y amonio, creando así nutrientes disponibles para las plantas (Emison 1998).

Recuento de poblaciones de hongos

Los hongos poseen un rol limitado en el compostaje y son menores en número que las bacterias y los actinomicetos pero con mayor masa, esto podría explicar su baja actividad en el proceso. La presencia de estos microorganismos se hizo evidente en fase termofila en fase de enfriamiento en los diferentes estratos, en razón a que como lo expresa Mathur (1991 en Avendaño, 2003), algunas especies aparecen durante la etapa termofila y otros son más importantes durante la etapa de enfriamiento y maduración cuando las temperaturas son moderadas y los sustratos predominantes son celulosa y lignina.

En cuanto a los géneros de hongos aislados, la diversidad de este grupo fue baja en las etapas tempranas del proceso, es decir, durante la etapa termofila y al comienzo de la etapa de enfriamiento pocos hongos aparecieron; por el contrario, a los 75 días, se aisló el mayor número de géneros de hongos, siendo *Aspergillus* el género predominante durante todo el proceso de compostaje. Este hongo se caracteriza por ser termófilo, pero puede continuar con su crecimiento en fases mesófilas. Su mayor presencia se reportó en fases de enfriamiento y maduración, la cual puede ser debida a su actividad celulolítica (López, 2003), asimismo, se ha dicho que tiene la capacidad de sintetizar sustancias que se asemejan a los constituyentes de la fracción orgánica del suelo y que uno de sus hábitats mas comunes es precisamente el compost (López, 2003). Según lo reportado por Anastasi et al. (2004) *Aspergillus* es uno de los hongos predominantes en el proceso de compostaje.

CONCLUSIONES

Las correlaciones encontradas entre los grupos funcionales de microorganismos en las etapas tempranas del proceso de compostaje podrían estar definidas por la disponibilidad de los compuestos. Los primeros grupos de bacterias que actúan sobre la materia orgánica son las amilolíticas, que pueden hacer disponible el carbono para otros grupos bacterianos como fijadores de nitrógeno, hongos y actinomicetos con los que presentan correlaciones positivas. Al contrario fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo, hongos y actinomicetos presentan correlaciones negativas entre sí en la mayoría del proceso; igualmente, los hongos y las bacterias celulolíticas en las fases finales también presentan este tipo de correlaciones, probablemente por competencia por los mismos recursos, ya que estas poblaciones aparecen en estas etapas finales actuando principalmente sobre la celulosa.

La mayoría de los parámetros físico-químicos reportados en este estudio como porcentaje de humedad, pH, porcentaje de materia orgánica, contenido de carbono orgánico total, sumatoria de NPK, y de calcio (Ca) y Magnesio (Mg), se encuentran dentro de los límites permisibles que contempla tanto la Norma Técnica Colombiana 5167 como la resolución 00150 de 2003 del ICA. Por consiguiente el compost obtenido al finalizar la investigación se podría emplear como acondicionador de suelos, al cumplir con la mayoría de los criterios sugeridos por la normatividad colombiana.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al laboratorio de control biológico de cultivos (GMBC) de la UPTC por su aporte de las instalaciones para el desarrollo de la

presente investigación, igualmente a la dirección de investigaciones de la UPTC por la financiación del presente proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDER M. 1977. *Nitrification. En: Introduction to Soil Microbiology*. Segunda edición. John Wiley. New York, Estados Unidos.

ANASTASI A.; VARESE G.; VOYRON S.; SCANNERINI S.; FILLIPELO V. 2004. Characterization of fungal biodiversity in compost and vermicompost. *Proceedings of the Compost Science and Utilization*, 12(2): 185-191.

ANDRADE G. 2004. Role of functional groups of microorganisms on the rhizosphere microcosm dynamics. *Proceedings of the Ajit Varma; Lynette Abbott; Dietrich Werner; Rudiger Hampp. Plant surface microbiology*:51-69.

AVENDAÑO R. 2003. El proceso de compostaje. Tesis de pregrado. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Departamento de Fruticultura y Enología. Pontificia universidad católica de Chile, Santiago de Chile.

BARRAL, M.T.:, DOMÍNGUEZ M.; FIERROS F. 2004. *Uso del compost y papel de la materia orgánica del suelo. La situación Gallega*. Departamento de edafología y química agrícola. Facultad de farmacia. Universidad de Santiago de Compostela. Madrid, España,

BELTRAN I. 2003. Obtención de biocompost a partir de los residuos sólidos de tres variedades de yuca (armenia, chile y amarga) usando el proceso oxigénico. Tesis de pregrado. Facultad de ciencias. Escuela de química. Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia.

BUENO M. 2003. *Cómo hacer un buen compost. Manual para horticultores ecológicos*. Ediciones La fertilidad de la tierra. Navarra, España.

BURGOS A. 1997. Aprovechamiento racional de basuras urbanas. Tesis de pregrado. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

CARRIQUIRIBORDE L. 2000. *Hacia un consumo responsable. Comunicado 25*. Septiembre. <http://www.arpet.org/archivos/boletines/25-99.htm> Fecha de consulta: 15 de junio de 2005.

CEGARRA J. 1994. *Compostaje de desechos orgánicos y criterios de calidad del compost*. En: Programa universitario de ciencia y tecnología agropecuaria (PUI) (Ed.), Memorias curso taller master Internacional de residuos orgánicos. Universidad Nacional de Colombia – sede Palmira, 14-17, pp. 1-8.

DEFRIERI R.; JIMÉNEZ; EFFRON D.; PALMA M. 2005. Utilización de parámetros químicos y microbiológicos como criterios de madurez durante el proceso de compostaje. En: *Revista Agriscientia*. 22(1): 25-31.

DELGADO J. 2000. Contribuciones del compost al mejoramiento de la fertilidad del suelo. En: *Revista Luna Azul* No 09, Manizales: Universidad de Caldas, 2000. 8 pgs. <http:// www.ucaldas.edu.co/lunaazul/numero_09_10/articulo_088.asp> Fecha de consulta: 23 de agosto de 2005

EMISON. 1998. *Condicionantes del compostaje*. Barcelona, España. <www.emison.com /5144.htm> fecha de consulta: 16 de agosto de 2005.

FORERO N. 2003. Evaluación de dos activadores biológicos sobre el compostaje de residuos de clavel (*Dianthus caryophillus*) en el municipio de Toca – Boyacá. Tesis de pregrado Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja, Colombia.

GALÁN C. 2002. Evaluación de dos activadores biológicos para el compostaje de la elodea (*Egeria densa planch*) procedente del lago de tota. Tesis de pregrado Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

GÓMEZ E.; ALFONSO H. 2003. Programa de saneamiento básico con proyección social en el casco urbano en el municipio de campohermoso a través del manejo y aprovechamiento de residuos sólidos. Tesis de pregrado. Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

GOMEZ I. ; GUIÑAN M. 2004. Actividad de las fosfatasas ácidas y alcalinas (extracelulares e intracelulares) en hongos de la rizosfera de *Arachis hypogea* (papilonaceae). Estado de Anzoátegui, Venezuela: Universidad de Oriente, <http:rbt.ots.ac.cr/revistas/F52-1 %20% 5B2004 %5D.pdf/33-GOMEZ-287-296.pdf> Fecha de consulta: 25 de octubre de 2005.

HYSECK J. ; SARAPATKA B. 1998 Relationship between phosphatase active bacteria and phosphatase activities in forest soils. *Proceedings of the Soil Biology and Fertility.* (26): 112-115.

HOGLAND W.; BRAMRYD T.; MARQUES M. ; NIMMERMARK S. 2003. Physical, chemical and biological processes for optimizing decentralized composting. *Proceedings of the Compost Science and Utilization.* 4(11): 330.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. ICONTEC. 2003. Norma Técnica Colombiana NTC 5167: productos para la industria agrícola. Materiales orgánicos usados como fertilizantes y acondicionadores de suelo. Bogotá: Icontec, 28 de mayo.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. 2003. RESOLUCIÓN 00150: Reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia. Santafé de Bogotá: ICA.

LABRADOR J. 2001. *La materia orgánica en los agrosistemas.* Segunda edición. Ediciones mundi prensa. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid, España.

LACEY J. 1997. Actinomycetes in compost. *Proceedings of the Ann Agric Environ Med.* (4):113-121.

LEVANON D. ; PUDLA D. 2002. Chemical physical and biological criteria for maturity in composts for organic farming. *Proceedings of the Compost Science and Utilization.* 4(10): 339-346.

LÓPEZ A. 2003. Evaluación de los efectos de dos activadores biológicos sobre el compostaje de gallinaza en la cuenca del lago de Tota. Tesis de pregrado. Facultad de de ciencias agropecuarias. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

LUGO S. 1998. *Evaluación de los productos de compostaje en el Ecuador.* Fundación Natura-Repamar – Cepis. (Quito, Ecuador), <http://www.cepis.org.pe/eswww/repamar/gtzproye/compost/ compost. html > Fecha de consulta: 16 de Agosto de 2005

LUQUE M. 1997. *Alternativas económicas para el manejo de residuos orgánicos en centros de reciclaje.* Fundación para la investigación agrícola, (Ed), X Jornada de conservación ambiental, Valencia, Venezuela, 18 – 20 de julio. 10 pp.

MATSUMOTO L.; MARTINESA A.; AVANZIA M.; ALBINOA; BRASILA C, SARADAKISA; RAMPAZOA L.; ZANGAROB W.; ANDRADE G. 2004. Interactions among functional groups in the cycling of carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosfere of three successional species of tropical woody trees. *Proceedings of the Journal Applied Soil Ecology.* 1016(10): 9 pgs.

MUÑOZ J. 2005. Compostaje en pescador, Cauca: tecnología apropiada para el manejo de residuos orgánicos y su contribución a los problemas medioambientales. Tesis de pregrado. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad Nacional sede Palmira. Palmira, Valle.

NEGRO M, Toledo D, Dalurzo H. Vazquez S. 2001. *Producción y gestión del compost* (España). <http://www.agrilogica.com/tecnicas/compost_ antiguo. htm> Fecha de consulta: 16 de Agosto de 2005.

RYCKEBOER J, MERGAERT J, COOSEMANS J, DEPRINS K. SWINGS J. 2003. Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin. *Proceedings of the Journal of Applied Microbiology.* (94): 127-137.

RÖBEN E. 2002. *Manual de compostaje para municipios.* Loja, Ecuador. <http://www.ded. org.ec/text3002es.pdf> Fecha de consulta: 23 de Junio de 2005.

SAVAGE J, CHASE T. MACMILLAN J. 1993. Population changes in enteric bacteria and other microorganism during aerobic thermophilic windrow composting. *Proceedings of the Journal of Applied Microbiology.* 6(26): 969-974.

STA COMPOST PRODUCERS. 2002. *Evaluating compost quality*. Us composting Council. United States. <htpp://www.compostingcouncil.org/section.cfm?id=39> Fecha de consulta: 15 de Abril de 2006.

SYLVIA D.; FUHRMANN J.; HARTEL P.; ZUBERER D. 1999. *Principles and applications of soil microbiology*. Segunda edicion. Ediciones Pretince Hall. New Jersey.

SZTERN D. Y PRAVIA M. 2004. *Manual para la elaboración de compost, bases conceptuales y procedimientos*. Organización mundial de la salud. Oficina de planeamiento y presupuesto unidad de desarrollo municipal. Montevideo, Uruguay.

TABATABAI MA..; BREMNER J.M. 1969. Use of p-Nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Proceedings of the Journal Soil Biology and Biochemistry* (1): 301-307.

TAIWO L.; OSO A. 2004. Influence of composting techniques on microbial succession, temperature and pH in a composting municipal solid waste. *Proceedings of the African Journal of Biotechnology*. 4(3): 239-243.

TIQUIA S.; WAN J.; TAM N. 2002. Microbial population dynamics and enzyme activities during composting. *Proceedings of the Compost Science and Utilization*. 2(10): 150 -161.

URIBE J.; ESTRADA M,.; CÓRDOBA S.; HERNÁNDEZ L.; BEDOYA D. 2001. Evaluación de los microorganismos eficaces (EM) en producción de abono orgánico a partir de estiércol de aves de jaula. En: *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 2(14) Medellín: Universidad de Antioquia.

VELIKONJA S.; MIHELIC; LOBNIK F.; LESTAN D. 2003. Microbial community structure during composting with and without mass inocula. *Proceedings of the Compost Science and Utilization*. 11(1): 6-15.

WU, L, ; MA,. L.; MARTINEZ, G. 2000. Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost. *Proceedings of the Journal of Environmental Quality*. 29(2) Mar-April. Madison, USA.

EVALUACIÓN *IN VITRO* DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE NITRÓGENO Y SOLUBILIZACIÓN DE FOSFATOS POR MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS CULTIVABLES DE PLÁNTULAS DE MANGLAR

IN VITRO EVALUATION OF BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION AND PHOSPHATE SOLUBILIZATION OF RHIZOSPHERIC CULTIVABLE MICROORGANISMS ASSOCIATED MANGROVE SEEDLINGS

Javier Vanegas[1], J.Sánchez[1], T. Galindo[1], J. Polanía[2], H. Valencia[1], N. Moreno[1], L. Melgarejo[1]

RESUMEN

La búsqueda de microorganismos promotores de crecimiento vegetal en plántulas de manglar se perfila como una alternativa para la restauración de ecosistemas deteriorados y para el desarrollo de cultivos comerciales en suelos con alta salinidad y baja disponibilidad de nutrientes. Este trabajo evaluó la actividad de bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN) y microorganismos solubilizadores de fosfato (MSF) de la rizósfera de plántulas de manglar (*Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans*). Los aislamientos se realizaron mediante siembra directa de raicillas en medios selectivos semisólidos: HGB para BFN y SRS para MSF. La actividad fijadora de nitrógeno se determinó mediante la prueba de reducción de acetileno y la actividad solubilizadora de fosfato en medio de cultivo líquido a través del método de molibdovanadato por espectrofotometría. En la prueba de reducción de acetileno se evaluaron 16 morfotipos de los cuales, la cepa de *Azotobacter* sp. G10 fue la más eficiente (56,61 nmol de etileno/cultivo/hora). Para las pruebas de solubilización de fosfato, la mayor tasa de solubilización fue alcanzada por *Aquaspirillum* sp. (318 mg/l de fosfato solubilizado). Se desarrollaron pruebas de eficiencia mediante las dos metodologías mencionadas evaluando la combinación de los aislamientos de mayor actividad, encontrando un incremento no significativo para la actividad fijadora de la cepa de *Azotobacter* sp. G10. En SRS líquido, se encontró un aumento significativo de fosfato solubilizado con la mezcla de levadura *Debariomyces* cf. *hansenii* y *Azotobacter* sp. G10.

Palabras claves: manglares, fijación de nitrógeno, microorganismos solubilizadores de fosfato.

ABSTRACT

The search for plant growth-promoting microorganisms from mangrove seedlings is an alternative for deteriorated ecosystems restoration and the development of commercial cultivations in high salinity and low nutritional soils. In this work the activity of both, fixing nitrogen bacterias (FNB) and phosphate solubilizers microorganisms (PSM) from the rhizosphere of mangrove seedlings, *Rhizophora mangrove* and *Avicennia germinans*, was evaluated. The isolations were obtained by placing the rootlets segments directly on semisolid HGB for FNB and SRS for PSM. Nitrogenase activity was evaluated by acetylene reduction assay and phosphate solubilization capacity in liquid culture, through the spectrophotometric molibdovanadato method. Nitrogenase activity was evaluated in 16 morphotypes. *Azotobacter* sp. G10 showed the highest response with 56,61 nmol ethilene/culture/hour. The phosphate

1 Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá
2 Universidad Nacional de Colombia sede Medellín
Correo electrónico: jvanegasg@unal.edu.co

solubilization assay, for which the highest rate was reached by *Aquaspirillum* sp. (318 mg/l of solubilized phosphate). Assays of efficiency were developed by the two mentioned methodologies for the highest activity microorganisms in a mixture of the two functional groups, resulting in a non significant increment for the fixation activity of *Azotobacter sp* G10. There were a significant increase of phosphate solubilized, for the mixture in liquid SRS, with the yeast *Debariomyces* cf. *hansenii* and *Azotobacter* sp G10.

Key words: mangroves, nitrogen-fixing, phosphate solubilizer microorganisms.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de microorganismos rizosféricos de manglar con actividad biofertilizante y promotora del crecimiento de plántulas que pueda favorecer su establecimiento y tolerancia frente a condiciones de tensión ambiental, se perfila como una alternativa de manejo para planes de reforestación y conservación (Bashan y Holguín, 2002). Dichos microorganismos pueden ser utilizados en la producción de biofertilizantes para ser aplicados no solo en plántulas de manglar, sino también para efectuar ensayos sobre cultivos de interés comercial o en suelos y ambientes en donde otros microorganismos no se establecen fácilmente. La cobertura de los ecosistemas de manglar se está reduciendo en muchas partes del mundo como resultado de diversos factores (Lacerda et al. 2001), lo que motiva a desarrollar diferentes estrategias que contribuyan a la conservación de manglares. Es así como el objetivo del presente trabajo fue aislar, caracterizar y determinar la actividad nitrogenasa de BFN y la eficiencia de MSF, asociados a la rizósfera de plántulas de *R. mangle* y *A. germinans* provenientes del manglar de Bahía Hooker en la Isla de San Andrés y de Bahía Neguange en el Parque Natural Nacional Tayrona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamientos. Se tomó la bola de raíces de plántulas de mangle provenientes de los manglares de Bahía Hooker en San Andrés Isla y Bahía Neguange en Santa Marta (Colombia), de los cuales se seleccionaron trozos de raicillas de nutrición de 1 cm procedentes de *R. mangle* y *A. germinans*, lavadas con agua de mar estéril. Las raíces se sembraron directamente en medios selectivos a 30°C por 7 días para cada grupo funcional (Holguin et al. 1992; Vázquez et al. 2000). Los detalles de la zona y metodología de muestreo se describen en Vanegas (2004) y Galindo (2005).

Evaluación de la actividad específica. Para el aislamiento y evaluación de la actividad de las BFN (prueba de reducción de acetileno) se siguió la metodología propuesta por Holguin (et al. 1992) en el medio de crecimiento (HGB). En este trabajo se evaluó el cambio de ácido málico y NaOH por glucosa (5g/l) (HGBg) como fuente de carbono. Se usó como referencia una cepa de *Azospirillum brasilense* (cepario laboratorio de microbiología del suelo, departamento de biología, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá) sembrada en medio libre de nitrógeno (NFB) y HGB. Para la actividad solubilizadora de MSF se empleó el método propuesto por Vázquez et al. (2000), previa selección en medio sólido SRS (Sundara-Rao y Sinha, 1963) suplementado con NaCl al 2%. La lectura se realizó por el método espectrofotométrico del molibdovanadato (Kit Spectroquant Phosfate–test MERCK®), estandarizado por Cepeda y Gamboa (2001).

Evaluación de mezclas microbianas. La BFN más eficiente (*Azotobacter* sp. G10), fue evaluada mediante la prueba de reducción de acetileno nuevamente, pero con mezclas de cada uno de los MSF con mayor actividad (*Aquaspirillum* sp, *D.* cf. *hansenni* y *Penicillium* sp). Así mismo, se evaluó la actividad solubilizadora de fosfato con la mezcla de *Azotobacter* sp. G10 y *D.* cf. *hansenni*. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para el análisis estadístico del efecto de los tratamientos en la reducción del acetileno. Las diferencias significativas entre cepas para la variable fosfato solubilizado se determinó mediante la prueba de Tukey (P[0.05).

RESULTADOS

De los 16 morfotipos evaluados, solo 4 tuvieron actividad nitrogenasa por encima de 10 nmol etileno/frasco/hora (Tabla 1). Al realizar la prueba de reducción del acetileno para la cepa *Azotobacter* sp G10

Tabla 1. *Resultados de la prueba de reducción de acetileno para 8 de los 16 microorganismos aislados de la rizósfera de plántulas de mangle.*

Aislamiento	Morfotipos	Actividad nitrogenasa (moles etileno / hora/ frasco)
1	*Azotobacter* sp. G10	56,61 (b)
2	*Chromobacterium* sp. M17	17,17 (c)
3	*Klebsiella* sp.	11,43 (c)
4	*Flavobacterium* sp. M9.8	10,24 (c)
5	*Azospirillum* sp.	0,76 (d)
Mezcla (BFN-BSF)	*Azotobacter* sp. G10+ BSF2	59,25 (b)
Mezcla (BFN-LSF)	*Azotobacter* sp. G10 + *Debaryomyces* cf. *hansenni*	54,41 (b)
Mezcla (BFN-HSF)	*Azotobacter* sp. G10 + *Penicillium* sp.	32,78 (c)
Referencia	*Azospirillum brasilense*	245,55 (a)
Referencia	*A. brasilense* en medio HGB (NaCl 2‰)	0,16 (c)

*Convenciones: BFN: Bacteria fijadora de nitrógeno, LSF: Levadura solubilizadora de Fosfato, HSF: Hongo solubilizador de fosfato, BSF: Bacteria solubilizadora de fosfato. Letras distintas son diferencias significativas a P<0.05 por pruebas de Tukey.

mezclada con los tres MSF independientemente, no se observaron diferencias significativas (P£0.05) con respecto a la actividad individual.

Los resultados de la prueba de solubilización de fosfatos en medio líquido se reportan en la Tabla 2. Solo el aislamiento BSF2 (*Aquaspirillum* sp.) presentó diferencias significativas respecto de los demás aislamientos, llegando a solubilizar 318.3 mg/l a las 48 h de incubación. A pesar que HSF2 (*D.* cf. *hansenni*) mostró una actividad de las mas bajas en las pruebas de solubilización de fosfato, al mezclarse con *Azotobacter* sp. G10, aumento significativamente su actividad hasta 191.5 mg/l a las 48 h de incubación. La especie *D.* cf. *hansenni* se encuentra frecuentemente en ecosistemas marinos (Hagler y Ahearn, 1987). Sin embargo, la capacidad solubilizadora de fosfatos de esta especie parece no haber sido reportada anteriormente. Igualmente, el potencial biofertilizante de levaduras solubilizadoras de fosfatos es una campo aún por explorar (Vassilev et al. 2001).

Tabla 2. *Resultados de la prueba de solubilización de fosfatos a las 24 y 48 horas de incubación.*

Aislamiento	Fosfato soluble (mg/l)	
	24 horas	48 horas
BSF 1 (*Aeromicrobium* sp.)	44,6 b	41,0 b
BSF 2 (*Aquaspirillum* sp.)	56,2 b	318,3 a
BSF 3	48,3 b	45,8 b
BSF 4	34,5 b	104,0 b
HSF 1 (*Debaryomyces* cf. *hansenni*)	52,3 b	29,0 b
HSF 2 (*Debaryomyces* cf. *hansenni*)	61,0 b	32,0 b
HSF 3	35,0 b	20,0 b
HSF 4	38,2 b	81,0 b
HSF 5	37,5 b	46,4 b

**Convenciones: HSF: Hongo solubilizador de fosfato, BSF: Bacteria solubilizadora de fosfato. Letras distintas son diferencias significativas a P<0.05 por pruebas de Tukey.

DISCUSIÓN

Pruebas de reducción acetileno. Se ha reportado sinergismo en la fijación de nitrógeno y solubilización de fosfatos al mezclar cepas aisladas de la rizósfera de diferentes especies de manglar (Holguin et al. 1992; Rojas et al. 2001), lo que ha

sugerido un posible efecto de cepas productoras de moléculas señal tipo acilhomoserinlactona (Holguín, 2005)*, las cuales son inductoras de múltiples procesos como lo registran Dunny y Winans (1999), entre otros autores. *Holguín, G. 2005. Comunicación personal. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 20 de septiembre de 2005.

La participación de estas moléculas en mecanismos bacterianos de promoción de crecimiento vegetal tales como la fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, síntesis de fitohormonas entre otras, aún es desconocida.

En las pruebas de reducción de acetileno, la cepa de *A. brasilense* presentó la mayor actividad nitrogenasa (245 nmoles etileno/cultivo/h). Sin embargo, al ser sembrada en el medio HGB presentó baja actividad (0,16 nmoles etileno/cultivo/h). Esta disminución de la actividad nitrogenasa esta relacionada con la inactivación de la dinitrogenasa reductasa bajo estrés salino (Tripathi, 2002).

Solubilización de fosfato. Vázquez et al. (2000) encontraron que *Bacillus amyloliquefaciens* solubilizó un promedio de 400 mg/l de suspensión bacteriana, si se observa la tabla 2, el mayor valor alcanzado para la prueba de solubilización en el presente trabajo es comparable (318.3 mg/l). Teóricamente, esta cantidad sería suficiente para proveer los requerimientos diarios de fosfato de una pequeña planta terrestre (Vázquez et al. 2000); por lo tanto, es posible que en el ecosistema de manglar la microbiota solubilizadora de fosfatos aporte al menos parcialmente el fosfato requerido por las plantas de mangle.

El aumento del fosfato solubilizado al mezclar la levadura HSF2 con la cepa *Azotobacter* G10, indica el sinergismo de microorganismos para potencializar y aumentar la actividad de las cepas aisladas. Igualmente, Rojas et al. (2001) encontraron un aumento en la solubilización de fosfato al comparar la actividad individual de *B. licheniformis* (BSF) con la mezcla entre éste y el diazótrofo *Phyllobacterium* sp. Adicionalmente, se determinó que la coinoculación de plántulas de mangle con estas dos bacterias incrementó la incorporación de N en las hojas de 1,700 a 3,200 d N^{15}.

CONCLUSIONES

En las plántulas de manglar se encuentran poblaciones de microorganismos con alta actividad específica que probablemente contribuyen a su nutrición y crecimiento. Así mismo, se recalca el papel que cumplen los microorganismos para desarrollar sinérgicamente su actividad específica. Se determinó que la BFN con mayor actividad, *Azotobacter* sp G10, estimuló de manera significativa la actividad del hongo *Penicillum* sp solubilizador y de la levadura HSF2 *D.* cf. *hansenni*. Esta última a su vez constituye el primer registro como levadura solubilizadora de fosfatos en ecosistemas de manglar en territorio Colombiano y probablemente en el trópico centro y sur Americano. La suma de los valores de fosfato solubilizado de todos los aislamientos es suficiente para proveer de fosfatos a plantas pequeñas en desarrollo, lo que sugiere que la presencia de MSF en manglares es una estrategia del ecosistema para suplir deficiencias edáficas de fósforo soluble.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de Trabajos Académicos en la Universidad Nacional de Colombia, Sede San Andrés y en el marco del proyecto "Caracterización y determinación de la actividad biológica de microorganismos del manglar", financiado por la Dirección de Investigación (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

BIBLIOGRAFÍA

BASHAN, Y.; HOLGUÍN, G. 2002. Plant growth-promoting bacteria: a potential tool for aride mangrove reforestation. Tree 16: 159-166

CEPEDA, M.; GAMBOA, A. 2001. Hongos solubilizadores de fosfatos aislados de rizósfera de *Espeletia grandiflora* Humb. y Bonpl. (Páramo el Granizo-Monserrate) y su efecto sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo. Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Biólogo. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 20-21 p.

DUNNY, G.; WINANS, S. 1999. Cell-cell signaling in bacteria. ASM Press, Washington, D.C.

GALINDO, T. 2005. Capacidad solubilizadora de fosfatos de microorganismos rizosféricos en dos manglares del Caribe Colombiano. Trabajo de Grado como requisito parcial para optar al título de Bióloga. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología. Bogotá. 28p.

HAGLER, A.; AHEARN, D.1987. Ecology of aquatic yeast. In: Rose, A. Harrison, J.S. (eds.). The yeasts. Vol. I. Academic Press Inc. Londres.

HOLGUÍN, G.; GUZMAN, M.; BASHAN, Y. 1992. Two new nitrogen-fixing bacteria from the rhizosphere of mangrove trees: Their isolation, identification and *in vitro* interaction with rhizosphere *Staphylococcus* sp. FEMS Microbiol. Ecol. 101:207-216.

KONEMAN, E. 1987. Diagnóstico Microbiológico. Ed Panamericana, 630 p.

KRIEG, N.; HOLT, J. 1994. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology. 9 ed. Williams and Wilkins, Baltimore, MD. 787p.

LACERDA, L.; CONDE, J.; KJERFE, B.; ÁLVAREZ-LEÓN, R.; ALARCÓN, C.; POLANÍA, J. 2001. American Mangroves. p. 1-62. *In*: Lacerda, L. (ed.) Mangrove Ecosystems. Function and management. Springer Verlag, 292 p.

ROJAS A.; HOLGUÍN G.; BASHAN Y. 2001. Synergism between *Phyllobacterium* sp. (N_2-fixer) and *Bacillus licheniformis* (P-solubilizer), both from a semiarid mangrove rhizosphere. FEMS Microbiol. Ecol. 35:181-187.

SUNDARA, R.; SINHA, M. 1963. Organisms phosphate solubilizers in soil. IN: Indian Journal of Agriculture Science 33: 272-278.

TRIPATHI, A.; NAGARAJAN, T.; CHANDRA, S.; RUDULIER, D. 2002. Inhibition of biosynthesis and activity of nitrogenase in *Azospirillum brasilense* Sp7 under salinity stress. Current microbiology. 44: 363-367.

VANEGAS, J. 2004. Determinación de la actividad fijadora de nitrógeno de diazótrofos asociados a plántulas de *Rhizophora mangle* y *Avicennia germinans* en manglares del Caribe colombiano. Trabajo de grado como requisito para optar por el título de Biólogo. Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. 72 p.

VASSILEV, N.; VASSILEVA, M.; AZCON, R.; MEDINA, A. 2001. Application of free and Ca-aliginate-entrapped *Glomus deserticola* and *Yarowia lipolitica* in a soil-plant system. Journal of Biotechnology 31: 237-242.

VÁZQUEZ, P.; HOLGUÍN G.; PUENTE, M.; LOPÉZ-CORTES, A.; BASHAN, Y. 2000. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon. Biol. Fertil. Soils 33: 265-278.

COMISION V - SUELO, AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD

C SEQUESTRATION IN PASTURE AND SILVO-PASTORAL SYSTEMS IN ECOSYSTEMS OF TROPICAL AMERICA

SECUESTRO DE C EN PASTOS Y SISTEMAS SILVOPASTORILES EN ECOSISTEMAS DE AMÉRICA TROPICAL

*María Cristina Amézquita**, *Muhammad Ibrahim, Bertha L. Ramírez, Hernán Giraldo y María E. Gómez*

ABSTRACT

This research aims at identifying pasture and silvo-pastoral systems that provide economically attractive solutions to farmers and offer environmental services, particularly the recovery of degraded areas and C sequestration, in four tropical ecosystems of Tropical America vulnerable to climate change. Soil C stocks, C contents in biomass, and socio-economic indicators were evaluated. Results of 4 years of research show that improved and well-managed pasture and silvo-pastoral systems can contribute to the recovery of degraded areas as C-improved systems.

Key words: soil C stocks, C contents in biomass, socio-economic indicators, silvo-pastoril systems.

RESUMEN

La investigación desarrollada, contribuye a la identificación de sistemas silvo pastoriles y de pastos que resulten en soluciones atractivas económicamente para los agricultores y a la vez contribuyan a la recuperación de áreas degradadas y al secuestro de C en cuatro ecosistemas tropicales de América, vulnerables a los cambios climáticos. Los indicadores evaluados fueron el C almacenado en el suelo, el contenido de C de la biomasa e indicadores socioeconómicos. Los resultados de cuatro años de investigación mostraron que las pasturas mejoradas y bien manejadas y los sistemas silvopastoriles contribuyen tanto a la recuperación de áreas degradadas como al incremento del C.

Palabras claves: C almacenado en el suelo, C en la biomasa, praderas, sistemas silvopastoriles, indicadores económicos.

INTRODUCTION

The deforestation of native forests and the final conversion of these areas in pastures represent the most important change in land use in Tropical America (TA) in the last 50 years (Kaimowitz, 1996). Close to 77% of agricultural lands in TA are currently under pastures (FAO, 2002) and, due to poor management, more than 60% of these lands are severely degraded (CIAT, 1999-2005). Improved, well-managed pasture and silvo-pastoral systems represent an important alternative to the recovery of

* Scientific Director, Carbon Sequestration Project, The Netherlands Cooperation CO-010402. Mailing Address: CIAT's Science Park, AA 67-13, Cali, Colombia. Correo electrónico: m.amezquita@cgiar.org

degraded areas and are a viable business activity for the producer (Toledo, 1985). Recent literature also suggests they have high potential for C sequestration (Veldkamp, 1994). The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC COP3, 1997) and subsequent agreements of the United Nations (UNFCCC COPs 4-11, 1998-2005) suggest that the reforestation of areas currently under degraded pastures could have a negative impact on the economic production and social welfare of producers in TA, especially intermediate and small producers. Therefore it is necessary to find sustainable alternatives that combine mitigation of poverty with economic production and supply of environmental services, especially C sequestration. This article presents the findings of 4 years of research that evaluated C accumulation in soils and plant biomass in a range of tropical pasture and silvo-pastoral systems and, compared these results with those for native forest (positive check) and degraded pasture (negative check) in four ecosystems of TA that are susceptible to the adverse effects of climate change: eroded hillsides of the Colombian Andes; tropical rainforests in Colombia's Amazon region; subhumid tropical forests along Costa Rica's Pacific coast; and tropical rainforests along Costa Rica's Atlantic coast.

OBJECTIVE

This study aims to identify the pasture and silvopastoral systems in each ecosystem that represent an alternative for farmers that is not only economically viable, but also environmentally beneficial, hence contributing to the recovery of degraded areas and to C sequestration. Previous works (Amézquita, 2003; Amézquita *et al.*, 2004; Buurman *et al.*, 2004; Llanderal & Ibrahim, 2004; Amézquita *et al.*, 2005 a, b, c) report partial results that complement those of the present article.

METHODOLOGY

Experimental sites

Field research was conducted on producer farms at sites representative of each target ecosystem. Sites selected in the eroded hillside ecosystem of the Colombian Andes were Dovio (1900 m.a.s.l, 1043 mm annual precipitation, 18.5 °C annual mean temperature, slopes between 45%-65%, moderately acid poor soils with pH 5.2-6.2) and Dagua (1350 m.a.s.l. 1100 mm annual precicipation, 21.5 °C annual mean temperature, slopes between 25%-45%, poor acid soils with pH 5.0-5.8). In humid tropical rainforest ecosystem of Colombia's Amazon region, evaluations were carried out at two sites with differing topography: 'La Guajira' farm (flat topography, 400 m.a.s.l., 4500 mm annual precipitation, 32 °C mean temperature, and poor, very acid soils with pH 4.0-4.6) and the 'Beijing' farm (rolling topography, with <10% slope, 258 m.a.s.l., 4500 mm annual precipitation, 32 °C annual mean temperature, and poor, very acid soils with pH 4.0-4.6). In Costa Rica's tropical rainforest ecosystem, evaluations were carried out in Esparza (200 m.a.s.l., 3500 mm annual precipitation, 29 °C annual mean temperature, poor soils less acid than those of Amazon region, with pH 5.0-5.6). Finally, for Costa Rica's subhumid tropical rainforest, evaluations were carried out in Pocora (200 m.a.s.l., 2500 mm annual precipitation with 5-6 months of drought, 27 °C annual mean temperature, and soils similar to those of Esparza).

C assessment

The C accumulation in soil and plant biomass was assessed in pasture and silvo-pastoral systems already established (10-20 years) on commercial livestock farms. To achieve precise estimates, a sampling design that controlled the main sources of variation in C sequestration was used. Sources of variation were local site-specific conditions, such as altitude, temperature, precipitation, slope, and soil type; current land use; and history of use. Two spatial replicates/system were used with 12 sampling points/spatial replicate/system and 4 soil depths (0-10, 10-20, 20-40, and 40-100 cm). Apparent density, texture, pH, total C, oxidable C, total N, P and CIC were measured, using international analytical methods (USDA, 1996) at each sampling point/depth. Total C in fine roots, thick roots, and aerial biomass of pasture and trees was estimated using the methodology of CATIE and the University of Guelph (2000) to estimate the C in silvo-pastoral systems, multiplying the dry matter/hectare of each component by 0.35 (to estimate the C in pastures) and 0.42 (to estimate the C in roots and aerial biomass in silvo-pastoral systems). To statistically compare the soil C level among the different systems,

C contents were corrected for apparent density and adjusted to a fixed soil weight using as reference value the sampling point of minimum weight in each ecosystem (Ellert *et al.*, 2002; Buurman *et al.*, 2004).

Socio-economic evaluations with producers

The economic benefit of investing in improved pasture and silvopastoral systems was evaluated by surveys and workshops with producers. Pertinent research findings are not presented in this article.

RESULTS

Tables 1-3 present the averages of accumulation of C in the soil (adjusted to a fixed soil weight), C in pasture biomass, C in fine roots, and C in thick roots,

Table 1. *Carbon in soil and biomass in each land use system in the hillsides of the Colombian Andes.*[1]

Site 1: Dovio

Land use system	Total C in soil (t/ha per 1 meq)	%	Total C in pasture (t/ha)	%	Total C in fine roots (t/ha)	%	Total C in thick roots, trunks and leaves (t/ha)	%	Total C in system (t/ha)
Native forest	231 a[2]	61.7[3]	-	-	4.6	1.2	138.9	37.1	374.4
B. decumbens	147 b	97.2	0.9	0.6	3.3	2.2	-	-	151.2
Forage bank	131 c	95.1	-	-	4.3	3.1	2.5	1.8	137.8
Degraded pasture	136 c	96.5	0.5	0.4	3.9	2.8	0.6	0.3	141.0
N (sampling points/ system)	24		40		24		8		
Mean, CV (%), LSD_{10}	161, 20, 18								

Site 2: Dagua

Land use system	Total C in soil (t/ha per 1m-eq)	%	Total C in pasture (t/ha)	%	Total C in fine roots (t/ha)	%	Total C in thick roots, trunks and leaves (t/ha)	%	Total C in system (t/ha)
Forest (40 years old)	186 a[2]	61.7[3]	-	-	2.6	0.9	112.7	37.4	301.5
Forest (15 years old)	155 ab	61.7[2]	-	-	2.2	0.9	93.9	37.4	251.2
Natural regeneration of degraded pastures	142 b	97.1	0.5	0.3	3.2	2.2	0.6	0.4	146.3
B. decumbens	136 b	93.7	0.8	0.6	8.3	5.7	-	-	145.1
Forage bank	90 c	94.7	-	-	2.5	2.6	2.6	2.7	95.1
Degraded soil	97 c	98.4	-	-	1.6	1.6	-	-	98.6
N (sampling points/ system)	24		40		24		8		
Mean, CV (%), LSD_{10}	135, 25, 30								

1 Results of 2002-2005, Carbon Sequestration Project- The Netherlands Cooperative Activity CO-010402", Internal Publication No. 14. June 2005.
2 Means with different letters differ statistically, with an error probability of 0.10.
3 The % obtained in the native forest of Costa Rica's subhumid tropical rainforest ecosystem was used.

trunks and leaves, together with the percentage that the C of each component represents of the C total of the system in each land use under study. Table 1 presents the results obtained for Colombia's Andean hillsides, Table 2 those corresponding to the tropical rainforest of Colombia's Amazon region, and Table 3 those corresponding to Costa Rica's subhumid tropical rainforest. The tables present global descriptive statistics (N, mean, CV (%), LSD_{10}), and the results of the statistical comparison of soil C among the different land use systems.

Data show that the C accumulated in the soil represents the total cumulative C in the system: 61.7% in a native tropical forest, 90% in a silvo-pastoral system of *Acacia mangium* + *Arachis pintoi* (Table 3), and 95%-98% in pasture systems (Tables 1-3). The C accumulated in thick roots, trunks, and leaves in the silvo-pastoral system of *A. mangium* + *A. pintoi* accounts for 7% of the system's total (Table 3). The C accumulated in fine roots in pasture systems accounts for 3%-8% and the cumulative in pasture biomass, 0.5%-2.1% (Tables 1-3). The native forest shows the highest total cumulative C levels of the system (soil + biomass) of all ecosystems. However, differences in soil C were observed between ecosystems.

The data of the hillsides of Colombia's Andes (Table 1) suggest that at sites of higher altitude, lower temperature, steep slopes, and relatively more fertile soils, the forest shows the highest levels of C accumulated in the soil (231, 186, and 155 t/ha per 1m-eq at sites 1 and 2), these means being statistically higher than those of the improved *Brachiaria decumbens* pasture (147 and 136 t/ha per 1m-eq at sites 1 and 2), which, in turn, statistically surpassed those of a degraded pasture and a degraded soil (136 and 97 t/ha per 1m-eq at sites 1 and 2).

Table 2. *Carbon in soil and biomass of tropical rainforests in Colombia's Amazon region.*[1]

Site 1: 'La Guajira' farm (flat topography)

Land use system	Total C in soil (t/ha per 1m-eq)	%	Total C in pasture (t/ha)	%	Total C in fine roots (t/ha)	%	Total C in thick roots, trunks and leaves (t/ha)	%	Total C in system (t/ha)
B. humidicola	144 a[2]	95.5	1.9	1.3	4.9	3.2	-	-	150.8
B. humidicola + legume	138 b	94.8	2.1	1.4	5.5	3.8	-	-	145.6
Natural regeneration of degraded pasture	134 b	97.3	1.3	0.9	2.4	1.7	-	-	137.7
B. decumbens + legume	128 c	96.7	1.2	0.9	3.2	2.4	-	-	132.4
B. decumbens	124 c	97.7	1.1	0.9	1.8	1.4	-	-	126.9
Native forest	107 d	61.7[3]	-	-			66.4	38.3	173.4
N (sampling points / system)	27		45		27				
Mean, CV (%), LSD_{10}	129, 10, 5								

Site 2: 'Beijing' Farm (rolling hills topography)

Land use system	Total C in soil (t/ha per 1m-eq)	%	Total C in pasture (t/ha)	%	Total C in fine roots (t/ha)	%	Total C in thick roots, trunks and leaves (t/ha)	%	Total C in system (t/ha)
Native forest	181 a[2]	61.7[3]	-	-	-	-	112.4	38.3	293.4
B. decumbens + legume	172 b	98.1	0.9	0.5	2.4	1.4	-	-	175.3
B. humidicola	159 c	96.6	1.1	0.7	4.5	2.7	-	-	164.6
Degraded pasture	129 d	97.4	0.9	0.7	2.6	1.9	-	-	132.5
N (sampling points / system)	27		45		27				
Mean, CV (%), LSD_{10}	144, 11, 7								

Table 3. *Carbon in soil and biomass in each land use system in the subhumid tropical forests of Pocora, Costa Rica.*

Land use system	Total C in soil (t/ha per 1m-eq)	%	Total C in pasture (t/ha)	%	Total C in fine roots (t/ha)	%	Total C in thick roots, trunks and leaves (t/ha)	%	Total C in system (t/ha)
B. brizantha + *A. pintoi*	181 a [2]	98.4	1.5	0.8	1.5	0.8	-	-	184.6
I. ciliare grass	170 a	97.5	1.7	1.0	2.8	1.5	-	-	174.8
A. mangium + *A. pintoi*	165 b	90.0	1.0	0.6	4.4	2.4	12.9	7.0	183.3
B. brizantha	138 c	98.1	1.6	1.1	1.8	0.8	-	-	141.0
Native forest	134 c	61.7	-	-	-	-	83.7	38.3	218.5
Degraded pasture	95 d	95.0	1.6	1.6	3.8	3.4	-	-	100.6
N (sampling points/ system)	24		40		24				
Mean, CV (%), LSD_{10}	150. 24, 14								

1 Results of 2002-2005, Carbon Sequestration Project- The Netherlands Cooperative Activity CO-010402", Internal Publication No. 14. June 2005.
2 Means with different letters differ statistically, with an error probability of 0.10.
3 The % obtained in the native forest of Costa Rica's subhumid tropical rainforest ecosystem was used.

The data corresponding to the tropical rainforest of Colombia's Amazon region (Table 2) and to Costa Rica's subhumid tropical forest (Table 3) show a situation that differs from that of the Andean hillsides regarding levels of C accumulated in the soil. In the flat Amazon region, characterized by warm, humid lowlands with poor, extremely acid soils with a high nutrient recycling rate, the improved pasture systems of *Brachiaria humidicola* alone, *B. humidicola* + native legumes, *Brachiaria decumbens* alone and *B. decumbens* + native legumes show soil C levels (144, 138, 128, and 124 t/ha per 1m-eq) that are statistically higher than those of the native forest (107 t/ha per 1m-eq.) On the rolling slopes of the Amazon region, improved pasture systems show soil C levels (172 and 159 t/ha per 1m-eq) statistically higher than those found in a degraded pasture (129 t/ha per 1m-eq). In Costa Rica's subhumid tropical forest (Table 3), located in the warm lowlands with a 6-month rainy season and a 6-month dry season and poor acid soils, the improved pasture and silvo-pastoral systems of *Brachiaria brizantha* + *Arachis pintoi*, *Ischaemum ciliare*, *Acacia mangium* + *A. pintoi*, and *B. brizantha* alone show levels of soil C accumulation (181, 170, 165, 138 t/ha per 1m-eq) statistically higher than those of the native forest (134 t/ha per 1m-eq) and to those of a degraded pasture (95 t/ha per 1m-eq).

The data obtained in the tropical rainforest and subhumid tropical ecosystems (Tables 2-3) suggest that in the warm, humid lowlands, with poor acid soils, with high nutrient recycling rates, the improved pasture and silvo-pastoral systems, adapted to these environments and well-managed by producers, play an important role in the recovery of degraded pasture areas because of their high C sequestration potential. On the other hand, the high level of C accumulated by the native forest in its biomass of roots, trunks, and leaves make it possible to estimate the potential loss of C when a native forest in these ecosystems is felled.

CONCLUSIONS

The findings of these 4 years of research (2002-2005) on target tropical ecosystems suggest, firstly, that in terms of C accumulated in the total system (soil + plant biomass), the native forest presents the highest levels of all land uses in all ecosystems, followed by improved pasture, silvo-pastoral system, natural regeneration of degraded pastures, and finally degraded pasture or degraded soils. The C accumulated in the soil accounts for a very high percentage of the total C of the system (61.7% in native forest, 90% in a silvo-pastoral system of *Aca-*

cia mangium + *Arachis* pintoi, and between 95%-98% in pasture systems). Secondly, in terms of C accumulated in the soil, improved, well-managed pasture and silvo-pastoral systems show comparable or even higher levels than the native forest, depending on local climatic and environmental conditions. Research results indicate that improved and well-managed pasture and silvo-pastoral systems should be regarded as attractive alternatives from the economic and environmental viewpoints, especially because of their capacity to recover degraded areas and their C sequestration potential.

REFERENCES

AMÉZQUITA, M.C.; IBRAHIM, M.; BUURMAN, P.; AMÉZQUITA, E. (2005 a) Carbon sequestration in pastures, silvo-pastoral systems and forests in four regions of the Latin American tropics. Published as a Special Issue of Journal of Sustainable Forestry 21 (1).

AMÉZQUITA, M.C.; IBRAHIM, M.; BUURMAN, P.; AMÉZQUITA, E. (2005 b) Carbon sequestration in pastures, silvo-pastoral systems and forests in four regions of the Latin American tropics. In: Montagnini F (ed) Environmental Services of Agroforestry Systems. The Haworth Press, Inc., New York. In press.

AMÉZQUITA, M.C.; BUURMAN, P.; MURGUEITIO, E.; AMÉZQUITA, E. (2005 c) Carbon sequestration potential of pasture and silvo-pastoral systems in the tropical Andean hillsides. In: Lal R *et al.* (eds). Carbon Sequestration in Soils of Latin America. The Haworth Press, Inc., New York. In press.

AMÉZQUITA, M.C.; IBRAHIM, M.; BUURMAN, P. (2004) Carbon sequestration in pasture, agro-pastoral and silvo-pastoral systems in the American tropical forest ecosystem. In: Proc. 2nd Intl. Congress in Agroforestry Systems, Mérida, Mexico, February 2004, 61-72.

AMÉZQUITA, M.C. (2003) Evaluation and analysis of carbon stocks in pasture, agro-pastoral and silvo-pastoral systems in sub-ecosystems of the American tropical forest. In: Amézquita MC & Ruiz F (eds) Two-year Project Achievements. Internal Publication no. 9, Carbon Sequestration Project: The Netherlands Cooperation CO-010402, Fourth International Coordination Meeting. Cali, Colombia, December 2003.

BUURMAN, P.; IBRAHIM, M.; AMÉZQUITA, M.C. (2004) Mitigation of greenhouse gas emissions by silvopastoral systems: optimism and facts. In: Proc. 2nd Intl. Congress in Agroforestry Systems, Mérida, Mexico, February 2004.

CATIE ; GUELPH (2000) Evaluaciones de carbono en sistemas silvopastoriles. Publicación interna, Proyecto Agroforestería Tropical, CATIE, Diciembre 2000.

CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1999-2005. Tropical Forages Project Annual Reports. Cali, Colombia.

ELLERT. B.H.; JANZEN, H.H.; ENTZ, T. (2002) Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1687-1695.

FAO (2002) Food balance sheets. Rome, Italy.

KAIMOWITZ, D (1996) Livestock and deforestation in Central America in the 1980s and 1990s: a policy perspective. Center for International Forestry Research (CIFOR), Special Publication, Jakarta, 88.

LLANDERAL, T.; IBRAHIM, M (2004) Biophysical analysis: Advancement report sub-humid and humid tropical forest, Costa Rica. In: Six-months Report no. 5, Internal Document no. 11, Carbon Sequestration Project: The Netherlands Cooperation CO-010402, Cali, Colombia.

TOLEDO, J.M. (1985) Pasture development for cattle production in the major ecosystems of the tropical American lowlands. In: Proc. of the XV Intl. Grasslands Congress, Kyoto, Japan, 74-81.

UNFCCC COP11 (2005) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its eleventh session, November 28-December 2, 2005, Montreal, Canada.

UNFCCC COP10 (2004) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the

Parties at its tenth session, December 6-17, 2004, Buenos Aires, Argentina.

UNFCCC COP9 (2003) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its ninth session, December 1-12, 2003, Milan, Italy.

UNFCCC COP8 (2002) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its eighth session, October 23-November 1, 2002, New Delhi, India

.

UNFCCC COP7 (2001) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its seventh session, October 29-November 9, 2001, Marrakech, Morocco.

UNFCCC COP6 (2000) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its sixth session, November 13-24, The Hague, The Netherlands.

UNFCCC COP5 (1999) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its fifth session, October 25-November 5, 1999, Bonn, Germany.

UNFCCC COP4 (1998) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its fourth session, November 2-13, 1998, Buenos Aires, Argentina.

UNFCCC COP3 (1997) United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties at its third session, December 1-10, 1997, Kyoto, Japan.

USDA (1996) Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 3, United States Department of Agriculture, Washington D.C., U.S.A., 693 pp.

VELDKAMP, E. (1994) Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 175-180.

VERDADES Y MITOS DE LO ORGÁNICO FRENTE AL MODELO CONVENCIONAL DE LA AGRICULTURA

TRUTHS AND MYTHS ABOUT ORGANIC AGRICULTURE FACED TO CONVENTIONAL MODELS

*Hugo E. Castro F.**

RESUMEN

El artículo presenta unas pautas conceptuales, que bajo criterio del autor, contribuyen a organizar el conocimiento para enriquecer la discusión y precisar el significado e interpretación del contexto teórico y aplicado de los diferentes modelos agrícolas de producción, teniendo en cuenta los cuestionamientos al que vienen siendo sometidos los paradigmas de la agricultura convencional, debido a sus efectos e impactos negativos comprobados en el ambiente, la biodiversidad y los recursos productivos.

Palabras claves: modelos agrícolas, agricultura orgánica, agricultura ecológica, agricultura convencional.

ABSTRACT

This article presents conceptual guidelines that under criterion of the author, contribute to organize the knowledge to enrich the discussion in order to determine with precision the meaning and interpretation of the theoretical and applied context of the different models of agricultural production. The questions about the paradigms from conventional agriculture, due to its verified effects and negative impacts in the environment, atmosphere, biodiversity and resources were considered.

Key words: agriculture models, organic agriculture, ecological agriculture, conventional agriculture.

INTRODUCCIÓN

La agricultura definida como la modificación conciente del medio ecológico por el hombre con el fin de obtener alimentos para su propia subsistencia, ha estado regida a través de la historia por el predominio de diversos modelos de producción derivados del nivel cultural y de la evolución tecnológica del momento. Desde la agricultura prehistórica hasta la científica incluyendo la revolución agrícola de mediados del siglo XX, el hombre ha utilizado diferentes métodos y prácticas para abordarla. La agroecología como el concepto central de la interacción de los cultivos con el medio natural, ha adquirido como ciencia la mayor importancia para facilitar el entendimiento, significado y alcance de los sistemas alternativos de producción frente a los modelos de agricultura convencional.

Ante el cuestionamiento al que vienen siendo sometidos los paradigmas convencionales de la agricultura, debido a sus efectos e impactos negativos comprobados en el ambiente, la biodiversidad y los recursos productivos, surgen modelos de mayor percepción social y ambiental que sustentan los conocidos sistemas de producción ecológica, entre los cuales se enmarcan las propuestas natural, orgánica, biológica, biodinámica y limpia entre otras. El

* I.A., MSc., Manejo de Suelos. Profesor Asociado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, UPTC, Tunja. Correo electrónico: hcastrofranco@yahoo.com.mx
Contribución del Grupo Interinstitucional de Investigación en Suelos Sulfatados Ácidos Tropicales, GISSAT – UPTC. Correo electrónico: gissat@tunja.uptc.edu.co

contraste abrupto entre las tecnologías empleadas en la agricultura de revolución verde y la agricultura alternativa (ecológico, orgánico, entre otros), deja aún muchas incógnitas por resolver, principalmente cuando se analiza el factor de productividad de las cosechas frente a la creciente demanda de alimentos para la población mundial. De otra parte los criterios de la producción limpia enfrentando el modelo orgánico y el convencional, aún no tienen claridad científica, por cuanto es posible llegar a la contaminación y degradación de recursos, tanto con el empleo de insumos orgánicos como por el uso de productos de síntesis; en este sentido se considera pertinente que la investigación básica y aplicada sobre el tema, inicie a ofrecer explicaciones que demuestren cualitativa y cuantitativamente los verdaderos atributos y limitaciones de cada modelo.

Por el anterior análisis se considera conveniente en este artículo presentar unas pautas conceptuales, que bajo criterio del autor, contribuyen a organizar el conocimiento para enriquecer la discusión y precisar el significado e interpretación del contexto teórico y aplicado de los diferentes modelos agrícolas de producción.

1. ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE PRÁCTICAS RELACIONADAS CON LA SOSTENIBILIDAD AGRÍCOLA

Es conveniente mencionar una serie de acontecimientos y hallazgos relacionados con el desarrollo histórico de la agricultura, que interpretados en el momento, permiten esclarecer las realidades y los mitos de muchas prácticas inherentes a la implementación de los diversos paradigmas de producción agrícola. Para centrar la discusión se hará referencia a los temas de fertilidad de suelos, abonamiento y origen de plaguicidas.

Sobre la **fertilidad del suelo,** considerada hoy como un indicador de la sostenibilidad biofísica de los recursos productivos, se registran avances y aportes de carácter técnico – científico, que contribuyen al entendimiento de muchos fenómenos y prácticas agrícolas involucrados en el crecimiento vegetal. Aunque algunas de estas prácticas son calificadas hoy por agroecólogos y ambientalistas, como de gran novedad en los modelos de agricultura alternativa, es posible comprobar que corresponden más a descubrimientos y realizaciones del pasado que a grandes contribuciones del presente. Para enriquecer la discusión es preciso citar algunos casos:

- El valor y significado de los estiércoles, abonos verdes e incorporación de leguminosas al suelo para restaurar su fertilidad, un tema que asume la agricultura alternativa como propio, fue reconocido desde antes de la era cristiana por Teofrasto, 372 – 287 a.C (Tisdale and Nelson 1956).

- En contradicción a la defensa del no volteo del suelo promulgado por los modelos de producción alternativos, Jethrotull desde 1731, ya explicaba el rendimiento de los cultivos de acuerdo con el incremento de la superficie específica del suelo proporcionada por la labranza.

- La conveniencia en la restitución y equilibrio de la fertilidad del suelo a partir de la rotación de cultivos y el carácter friable del suelo atribuible a los abonos orgánicos, igualmente fueron introducidos por Jethrotull a finales del siglo XVIII (Rockefeller Fundation, 1972.)

- La fotosíntesis, la teoría del humus y la ley del mínimo expuestas desde inicios y mediados del siglo XIX por Saussare, Thaer y Liebig respectivamente, constituyen grandes contribuciones para entender los fenómenos del crecimiento y la nutrición vegetal, que infortunadamente vienen ignorando quienes se radicalizan por la opción de agricultura orgánica sin criterio integracionista (Millar, C. E. 1955)

En cuanto al **abonado**, su utilización se remonta muy probablemente al inicio de la agricultura, hace más de 5000 años. En el cultivo primitivo, totalmente manual, el hombre utilizaba la fertilidad natural de los suelos. Los primeros abonos para restaurar la fertilidad de los suelos agotados fueron de carácter orgánico y natural de origen mineral, entre los cuales se destacaban: estiércol y compost, residuos vegetales y animales, residuos fecales humanos y de animales domésticos, estiércol de aves (guano), lodos de ríos y lagunas, pajas y materiales de los suelos de bosques, algas y residuos de fauna marina, abonos verdes, tierras con contenidos de sales, cenizas (de paja, madera, huesos, restos del suelo),

margas, calizas y yeso. Con este abonado empírico apoyado en la base teórica del humus propuesta desde Aristóteles (350 a. C), se cultivó la tierra hasta inicios el siglo XIX (Finck, A. 1989). Posterior a la primera guerra mundial, se puso a disposición de la agricultura un completo surtido de abonos N, P y K, entre los cuales figuraron: urea (carbamida) del amoniaco, escorias Thomas y nitrofosca como el primer abono NPK complejo. Alemania e Inglaterra fueron los países líderes en la generación tecnológica de los fertilizantes minerales de síntesis (Marschenner, 1986).

Según puede comprobarse a partir de los escasos datos que existen, la introducción del abonado mineral de síntesis y de fuentes de origen natural e industrial supuso una revolución en la producción agrícola; de una situación de continua escasez de alimentos presentada en Europa Central, se pasó a otra de abundancia, no solamente aumentaron las cosechas, sino también la calidad de los productos. En las décadas posteriores a la primera guerra mundial, se produjo la primera revolución verde donde como ahora fue patético el rechazo radical de ciertos sectores al uso de los abonos minerales, declarados en el momento como antinaturales, aspecto que estaba totalmente fuera de lugar al no reconocer ninguno de los efectos positivos de la teoría de la nutrición mineral.

Para entender que a través del tiempo la fertilidad del suelo se agota y que es necesario restituirla a través de la fertilización mineral, es conveniente anotar que hacia 1900 la carencia de fósforo limitó fuertemente la productividad de los suelos, lo que llevó a la aparición del superfosfato como primer abono comercial. Hacia 1930, creció el interés por la potasa, por aparecer una carencia generalizada en los suelos y desde 1950 se incrementa la utilización de los abonos nitrogenados. Los anteriores referentes demuestran que en el recorrido del tiempo se producen cambios en el potencial y aptitud de los recursos productivos y que en consecuencia la fertilidad del suelo es susceptible de variación, dependiendo de la historia genética del recurso y de la actividad antrópica. La anterior interpretación a la luz de los actuales sistemas agrícolas de producción, hace ver la necesidad de diagnosticar estados actuales de la fertilidad del suelo para proyectar manejos razonables con el aprovechamiento de las tecnologías disponibles.

Sobre el concepto y **prohibición de los plaguicidas** en los modelos de producción orgánica, es importante señalar que técnicamente los ingredientes activos que conforman las moléculas de los plaguicidas pueden ser de origen orgánico (conformado principalmente por cadenas de carbono), inorgánico (donde actúan elementos como Cl, S y As), naturales (procedentes principalmente de compuestos botánicos de plantas) y sintéticos (cuando las sustancias de carácter orgánico, inorgánico o natural son sintetizadas industrialmente para conformar moléculas activas para el control de plagas y enfermedades). La composición de los ingredientes activos en los plaguicidas incluye compuestos como carbamatos, organofosforados, organoclorados, piretroides y sulfoorgánicos, entre otros. Con sorpresa se encuentra que la estructura molecular de la mayoría de estos plaguicidas utilizados como insumos sintéticos en la agricultura, está conformada por sustancias de origen orgánico que al ser procesadas industrialmente generan productos de baja, moderada y alta toxicidad. Como ejemplo, los compuestos carbamatos son sales orgánicas del ácido carbámico, que se obtienen al sustituir un grupo OH del ácido carbónico por el radical amida. Los insecticidas organofosforados son derivados orgánicos de la estructura fundamental del ácido fosfórico, con una acción tóxica mas o menos selectiva, estructura en la cual al ser reemplazados sus hidrógenos por esteres o amidas, conforman moléculas de ortofosfatos y pirofosfatos con acción insecticida. De otra parte los piretroides son sustancias orgánicas de origen natural y sintético, relacionadas estructuralmente con los insecticidas extraídos de las flores del pyrethrum, donde se encuentran varias especies de Crisantemo, la más importante *Crysanthemun cinerariefolium*, de la familia *Compositae* (Alfaro, A. 1974.; Valenzuela, G. 1999; Nacional Academy of Sciences. 1989).

2. FUNDAMENTOS PARA COMPRENDER HOLÍSTICAMENTE LA REALIDAD DE LOS MODELOS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Alrededor de los sistemas de producción agrícola convencionales y alternativos, especialmente para estos últimos, existe en el medio académico y en la sociedad en general, una diversidad amplia de criterios y conceptos imprecisos, ambiguos y a veces sesgados, que desvirtúan la realidad y el alcance de la aplicación de muchas tecnologías relacionadas

con la producción agrícola. Se torna difícil el acercamiento que en conceptos de biología aplicada tienen los ecólogos, ambientalistas, ingenieros agrónomos, biólogos y otros profesionales afines, cuando se desea definir los límites y contrastes entre modelos agrícolas de producción. Algunas de estas profesiones al tratar el tema radicalizan sus posiciones en defensa de principios filosóficos que marginan toda posibilidad de análisis científico, otros mezclan desordenadamente sus criterios y buscan ganar espacios confundiendo a los productores y otra mayoría que aún teniendo formación agronómica, se han olvidado de los principios considerados universalmente fundamentales en el crecimiento vegetal: fotosíntesis e intercambio de iones en la solución del suelo (Castro, 2006).

También enfrentan la discusión quienes defienden a ultranza la tecnología de revolución verde, sin detenerse a evaluar sus impactos. ¿Quién tiene la razón? Al parecer lo que ocurre es que para cada modelo existen fanáticos y contradictores, cuyo éxito en sus argumentos dependerá del escenario donde se debatan sus posiciones. La agricultura ecológica, orgánica, biodinámica, agrobiológica, y otros modelos asociados, presentan su mayor percepción en productores y consumidores ambientalistas que aducen que el mundo en su totalidad esta contaminado y que por lo tanto todo producto del campo obtenido con tecnologías de síntesis es un veneno. En contraste la agricultura convencional de revolución verde, maneja escenarios de agricultura comercial con uso intensivo de insumo técnico (genética, biotecnología, maquinaria, riego, productos de protección fitosanitaria, entre otros). Ocurre con frecuencia que quienes más polémicos y radicales son en la crítica de los modelos que defienden, bien el alternativo o el convencional, generalmente no han experimentado la vivencia de ser agricultores y mucho menos han asumido el riesgo del negocio agrícola. Desde otra mirada, es conveniente mencionar también, el juego de intereses económicos que se mueve sin control estatal, principalmente en la comercialización de insumos biológicos, a los cuales se les confiere efectos milagrosos sin haber sido evaluados previamente por su costo y eficiencia agronómica (Castro, 2006).

Para contribuir a la discusión y ofrecer algún grado de claridad en el tema, a continuación se analizan algunos conceptos básicos que muy seguramente ayudan al entendimiento de los procesos naturales y antropogénicos involucrados en la producción agrícola.

Los conceptos de ECOSISTEMA y AGROECOSISTEMA, son a criterio del autor, fundamentales para crear el límite de lo natural y lo antropogénico. El ecosistema, defiende su condición de ambiente natural por la relación armónica existente entre el límite externo (medio ambiente) y el interior (circulación interna de biomasa y nutrientes). Un buen ejemplo de este estado, son los bosques naturales densos ubicados en suelos tropicales o en paisajes alto - andino, cuyas interacciones se expresan según la siguiente función:

EL ECOSISTEMA NATURAL EN FUNCION:

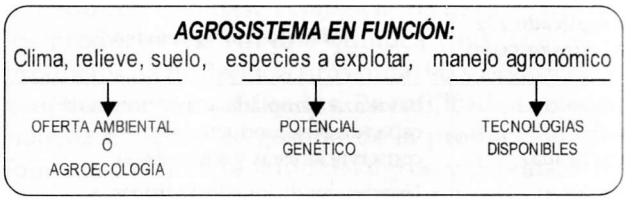
(Clima, relieve, suelo, vegetación, animales, cuerpos de agua)

"EQUILIBRIO ARMÓNICO"

Cabe entonces preguntarse ¿Qué mecanismo o atributo permite a un ecosistema de bosque natural, mantenerse sostenible en el tiempo?, académica y científicamente la explicación parte de la teoría de sistemas, donde las entradas (radiación, precipitación, CO_2, agua y nutrientes), generan unos productos o salidas (carbohidratos) obtenidos a partir de la síntesis de sustancias orgánicas (proceso de fotosíntesis). De otra parte, la nutrición mineral del ecosistema es otro proceso de gran importancia, por ser un producto de síntesis de sustancias orgánicas contenidas en la biomasa decidua proporcionada por la fronda del bosque. Atendiendo este análisis, según Escobar (2001), un bosque de la Amazonia Colombiana produce anualmente en el orden de 80 t ha^{-1} de materia seca, la cual proporciona por proceso de síntesis de la materia orgánica en kg·ha^{-1} (165 N: 12 P_2O_5: 58 K_2O: 62 Ca: 27 Mg), con lo que se nutre el bosque para poder subsistir.

La connotación de los ecosistemas modificados o intervenidos que tienen como fin el aprovechamiento de los factores que conforman el ecosistema natural en beneficio del "hombre" con fines de producción y productividad, se enmarca dentro de la denominación de AGROSISTEMAS o mal llamados AGROECOSISTEMAS (Castro, 2006). En este senti-

do un agrosistema se expresa en sus interacciones por la siguiente función:



Cuando se habla de AGROSISTEMAS, la *oferta ambiental o agroecológica* y en algunos casos, el *componente genético*, se les puede considerar como un atributo o cualidad natural (Tabla 1). Según los conceptos de *evaluación de tierras* para agricultura de la FAO (1972, 2003), los atributos o cualidades naturales definen los grados de aptitud de la tierra para usos específicos, esto es, que dependiendo del grado en que las condiciones del medio ambiente (agroecológicas) cumplan o se acerquen a los requerimientos de las especies de interés, se tienen tres tipos de aptitud, que gradúan la calidad de las tierras para agricultura:

La *aptitud alta*, aplicable a ambientes favorables con bajas restricciones climáticas, edáficas o de infraestructura tecnológica, donde es posible maximizar rendimientos con manejo agronómico centrado en tecnología de bajos insumos.

La *aptitud media*, aplicable a ambientes que presentan moderadas restricciones climáticas, edáficas o de infraestructura tecnológica, que podrían reducir el potencial productivo de la especie considerada y en consecuencia requiere de un moderado suministro de insumos.

La *aptitud baja*, aplicable a ambientes con severas restricciones climáticas, edáficas o de infraestructura tecnológica, que constituyen un riesgo alto para invertir en el establecimiento de la especie considerada.

El *manejo agronómico* a través del AGROSISTEMA, constituye el epicentro de toda la discusión asociada con los sistemas de producción, por reunir este componente al conjunto de técnicas de origen natural, biológico, orgánico, químico, mecánico, biotecnológico, biodinámico, entre otros, susceptibles de ser aplicadas a la producción de especies agrícolas, según la propia concepción y percepción social de los modelos agrícolas imperantes (Castro, 2006). La disponibilidad de técnicas o tecnologías esta regida por la oferta de insumos técnicos que para cada modelo, convencional o alternativo existe para el manejo de la labranza, sistemas de siembra, uso de semillas, selección de genotipos, suministro de riego y fertilización, control fitosanitario y labores conservacionistas, entre otras.

La apreciación del impacto generado en el tiempo por efecto de las prácticas de manejo agronómico sobre la sostenibilidad de los recursos naturales, el hombre y el medio ambiente, es asunto de máximo interés, que ante todo debe ser abordado con resultados de investigación y no con subjetividad, intersubjetividad y especulaciones, así se trate de evidencias reales.

3. MARCO CONCEPTUAL PARA FACILITAR EL ENTENDIMIENTO Y ALCANCES DE LOS MODELOS AGRÍCOLAS

Las definiciones que se presentan a continuación, tomadas de referentes teóricos y de la normativa existente, pretenden precisar en algunos casos y en otros abrir espacios de discusión y reflexión, sobre los criterios actualmente utilizados por los movimientos alternativos de agricultura, que enfrentan amplia controversia con el modelo convencional.

Agricultura convencional. Acción orientada a cultivar la tierra para la obtención de productos agrícolas primarios, en la cual se utilizan tecnologías que alteran el equilibrio de los recursos naturales e insumos químicos de síntesis (Resolución 544, 21/12/1995, Minagricultura).

Agricultura ecológica. Acción orientada a cultivar la tierra para la obtención de productos agrícolas primarios, sin la utilización de productos químicos de síntesis (Resolución 544, 21/12/1995, Minagricultura). Este tipo de agricultura reúne los modelos alternativos natural, orgánico, biológico, biodinámica y sus interacciones.

Agricultura natural. Se concibe como la producción agrícola donde generalmente se deja actuar a la naturaleza a fin de restablecer el equilibrio natural perdido. El hombre generalmente no debe inter-

Tabla 1. *Inventario de atributos de origen natural, orgánico y de manejo antropogénico inherentes a los sistemas de producción agrícola.*

Origen Natural (Oferta de favorabilidad ambiental)	Origen Orgánico (aplicado a la fertilidad y control fitosanitario)	Manejo Antropogénico
- *Atributos naturales del clima* - Adecuada distribución de lluvias - Alta radiación en períodos de maduración - Baja nubosidad - Ausencia de heladas - Regímenes de humedad húmedo – subhúmedo [pp(mm) ?EVTP] Alto fotoperíodo	- Uso de materia orgánica en todas sus formas (no humificada y humificada) - Uso de abonos verdes y coberturas - Rotación de cultivos - Biofertilización (Rhizobium – micorrizas y otras bacterias) - Uso de microbiota - Control Biológico: Biocontrol - Compostación de residuos biodegradables - Insumos biológicos (finca y comerciales) - Biopreparados (extractos, purines, caldos fermentados)	- Labranza apropiada (construcción de capas arables productivas conservacionistas y sostenibles) - Uso de acondicionadores físicos - Aprovechamiento Fertilidad Natural - Control de acidez (fuentes minerales de origen natural e industrial) - Uso de semilla certificada - Planes Integrales de Nutrición (disponibilidad natural de nutrientes Vs. requerimientos nutricionales de la especie Vs. suplemento de necesidades nutricionales) - Aprovechamiento del efecto residual de la fertilización - Peletización de semillas - Prevención y control integral de erosión: · Prácticas mecánicas · Prácticas culturales · Prácticas ingenieriles · Revegetalización - Manejo integral de plagas y enfermedades (MIP) - Adecuado manejo de aguas - Implementación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA)
Atributos naturales del suelo - Adecuada estructuración - Grupos texturales francos, (F, FL) y francos moderadamente finos (FArL, FArA, FAr) - Densidad aparente (1 – 1,3 $g\,cc^{-1}$) - Ausencia de limitaciones físicas en profundidad - pH ligeramente ácido a neutro - Alta materia orgánica con alta tasa de mineralización - Ausencia de erosión (coberturas) - Abundancia de raíces y macroorganismos		
Atributos naturales de la especie (genéticos) - Genotipos con bajos requerimientos nutricionales - Genotipos tolerantes a condiciones adversas (extrema acidez, alcalinidad, sequía, limitaciones de drenaje, etc) - Genotipos con alto potencial genético productivo - Genotipos resistentes a plagas y enfermedades		

Fuente: Castro, H., 2006.

venir o si lo hace sus acciones deben ser muy pocas (Masanobu Fukoaka, 1975., citado por Corporación Colombia Internacional, 1999). La agricultura natural vista por otros autores, está basada en procesos naturales y utiliza insumos tales como materia orgánica, hierbas espontáneas o adventicias, abonos minerales naturales de roca, sucesiones, rotaciones y competencia, sinergismo y alelopatía entre plantas (Jean Marie Roger, 1970., citado por Corporación Colombia Internacional, 1999). Según Deffune (1999), sus métodos sustituyen todo tipo de labranza o cultivo del suelo por rozadas (corte de la parte aérea) de la vegetación o cobertura verde (trébol) y muerta (paja), combinadas con siembras asociadas de cereales y leguminosas o mezclas de hortalizas y hierbas aromáticas.

Agricultura orgánica. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, la agricultura orgánica, es un sistema de producción agrícola formulado con una base ecológica, rechaza el uso de los productos de síntesis química (fertilizantes y productos de protección fitosanitaria) y organismos genéticamente modificados. Es calificada como un sistema holístico de gestión de la producción que fomenta y mejora la salud del agroecosistema, y en particular la biodiversidad de los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo. (*http://www.ifoam.org/whoisifoam/spanish.html*; *http://www.fao.org/organicag/frame1-s.htm*).

Agricultura biodinámica. La agricultura biodinámica debe contemplarse en el contexto de las creencias antroposóficas. Explica que el crecimiento vegetal esta influenciado directamente por fuerzas cósmicas (procedentes de los astros), espirituales, vitales o etéreas, que imponen ritmos y fuerzas sobre la naturaleza (Rudolf Steiner, 1924, citado por Corporación Colombia Internacional, 1999). El laboreo de la tierra crea un caos, la siembra de cultivos debe efectuarse cuando la luna pase por los signos adecuados del zodiaco (libra, acuario y géminis), y se emplean preparados dinamizados a la manera de una homeopatía agrícola en cantidades pequeñas para estimular las plantas, ayudar al suelo y remediar las fuerzas externas.

Agricultura integrada. Es un término utilizado frecuentemente, para los métodos agrícolas que ponen un acento especial en la búsqueda de prácticas agrícolas adecuadas y sostenibles. La agricultura integrada abarca varias clases de sistemas de producción agrícola que acentúan una moderación de la cantidad de aportaciones de insumos sintéticos, especialmente fertilizantes y funguicidas. En los E.E.U.U. estos sistemas agrícolas se denominan "Low Input Sustainable Agriculture" (Agricultura Sostenible de Baja Aportación), conocida por las siglas LISA (Instituto de Potasio y Fósforo, 1989). Como sistema sostenible debe tener cuatro características principales: validez económica, solidez ambiental, conservación de los recursos naturales y aceptabilidad política y social.

La agricultura integrada es compatible con los modelos agrícolas expuestos en el lenguaje moderno de la sostenibilidad, por cuanto pueden abordar el protocolo establecido por la EUREPGAP sobre buenas prácticas agrícolas (BPA), con el fin de mejorar productividad, calidad sanitaria, proteger el ambiente y favorecer el bienestar y la salud de los trabajadores (Colombian Exports Company, 2003). Como marco orientador, la Tabla 2 presenta un inventario general de las prácticas agrícolas de mayor uso y frecuencia susceptibles de ser aplicadas en diferentes sistemas de producción.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

La revisión realizada al tema de los modelos agrícolas deja en su contexto general algunas reflexiones y consideraciones que con seguridad, seguirán enfrentando a quienes defienden los sistemas alternativos de producción agrícola, en contraposición a las tecnologías convencionales, cuestionadas principalmente por el uso indiscriminado de insumos de síntesis y el empleo de organismos genéticamente modificados.

Las reflexiones de mayor controversia en la discusión y que deben ser analizadas en el marco de ciencia y tecnología, tienen que ver con los siguientes aspectos:

- Es imperativo precisar el significado, alcance y repercusión de los modelos agrícolas que defienden la tecnología de producción orgánica, teniendo en cuenta que estos sin argumento científico, desaprueban el empleo racional de los insumos de síntesis, considerados esenciales para la obtención de altos niveles de productividad en la agricultura.

- Sin lugar a dudas al interpretar la teoría de los sistemas de producción alternativos, es frecuente encontrar superposición en el significado de lo que se concibe como orgánico, biológico y natural. Igualmente el término de síntesis no debe aplicarse solamente a la tecnología de carácter químico, sino que a la vez la síntesis está involucrada en procesos de origen natural (fotosíntesis) y orgánico (mineralización de la materia orgánica).

- Los términos de sostenibilidad biofísica y de producción limpia (buenas prácticas agrícolas), generalmente son manipulados indiscriminadamente en los diferentes modelos agrícolas; su interpretación teórica y abstracta crea confusión cuando se considera que solo lo orgánico es limpio y sostenible. ¿Será posible descartar la

Tabla 2. *Prácticas de carácter agronómico ofertados para diferentes modelos agrícolas de producción*

PRÁCTICA MODELO	CONVENCIONAL			ALTERNATIVO "Énfasis en Insumos Biológicos"			AGRICULTURA INTEGRADA (Sostenible de baja aportación)
	Economía campesina	Mediano Productor	Productor Industrial	Natural	Orgánica	Biodinámica	
Empleo de semillas							
Selección Natural	X	X	X	X	X	X	
Certificada			X				X
Trasgénica			X				X
Sistemas de Labranza							
Convencional							
Tracción animal	X	X			X		X
Mecanización		X	X				X
Alternativo							
Consevacionista (S. Directa+ L. mínima)	X	X		X	X	X	X
Labranza Profunda			X				X
Nutrición (Fertilización)							
Fertilidad Natural	X			X		X	
Fuentes Orgánicas							
Elaboración en Finca	X	X	X		X		X
Fertilizantes biológicos comerciales					X		X
Biofertilización (Rhizobium - Micorrizas)			X	X	X		X
Fuentes Naturales de origen mineral		X	X		X		X
Fertilizantes de síntesis		X	X				X
Conservación recursos productivos							
Siembra de abonos verdes		X	X				X
Uso de coberturas y/o acolchados en superficie		X	X		X		X
Incorporación de residuos de cosecha		X	X				X
Rotación de cultivos	X	X	X		X		X
Siembra de cultivos asociados, mixtos e intercalado	X	X		X	X		X
Protección y control fitosanitario							
Biopreparados (extractos, pudines e hidrolatos con acción insecticida y funguicida)	X	X		X	X	X	X
Controladores Biológicos comerciales de insectos plagas		X	X	X	X		X
Hongos entomopatogenos		X	X		X		X
Bioinsecticidas y biofunguicidas comerciales de síntesis		X			X		X
Productos de protección fitosanitaria de síntesis química	X	X	X				X
Prácticas alelopáticas	X			X	X	X	
Creencias antroposóficas							
Fuerzas cósmicas (astrales, espirituales)	X					X	
Siembra a través del zodiaco y fases de la luna	X	X		X		X	
Preparados biodinámicos (enterrar cuernos de vaca + bofiga durante el invierno)						X	
Georeferenciación para eficiencia en la aplicación de insumos (labranza, fertilización, riego y control sanitario)		X	X				X

Fuente: Castro, H., y Hernández, D., 2006

sostenibilidad y la producción no contaminante en los modelos convencionales o de agricultura integrada con baja aportación de insumos? ¿Qué estudios sustentan esta controversia? La sostenibilidad y las buenas prácticas agrícolas asociadas a producción limpia deben asumirse como ejes transversales en todos los modelos agrícolas de producción.

- Todas las formas de agricultura modifican el medio ambiente, el reto radica en hallar el equilibrio adecuado entre los costos y beneficios que representan sus desarrollos para la sociedad y la naturaleza.

Las consideraciones sobre el tema están asociadas a los mitos que sobre lo orgánico plantean muchos autores, que solicitan a los ecólogos y ambientalistas explicaciones científicas y no deducciones empíricas que promulgan en contraposición a los modelos de agricultura convencional. Algunos de estos mitos se sintetizan a continuación:

- Existe la creencia extendida de que los sistemas agrícolas con bajo y muy bajo uso de insumos son frecuentemente más amigables con el ambiente y más sostenibles que los sistemas convencionales de alta producción (Scialabba., N. 1999).

- ¿Los alimentos orgánicos son vistos frecuentemente como más saludables y benéficos? Sobre el particular se encuentra muy poca información y discusión referida a los alimentos orgánicos, lo que hace necesario y esencial una valoración en el tema. (Scialabba., N. 1999).

- Los cultivos orgánicos "no tienen ningún aspecto positivo frente a los aspectos ambientales y menos en la sostenibilidad" cuando son comparados con cultivos convencionales eficientes manejados con buenas prácticas agrícolas (Addiscott., TM. 1995).

- Las agricultura orgánica es una ideología y no una ciencia (Kirchmann., H and Thovaldsson, 2000)

- Se afirma que los fertilizantes orgánicos producen cultivos de mayor calidad que los obtenidos con fertilizantes minerales. El estiércol es el fertilizante permitido en la agricultura orgánica, pero no se ha observado que los minerales del estiércol descompuesto produzcan cosechas más abundantes y de calidad superior (Evers., A. 1988; Hansen., H. 1981; Conklin., N. and Thompson., G. 1993). Además, la prueba en niños sobre el valor nutritivo de los alimentos ha sido mayor para los cultivos que se desarrollaron con fertilizantes minerales que con estiércol. (Schupan., W. 1974).

- Contrariamente a las expectativas del modelo orgánico, se reporta que en muchos casos no hay relación entre el contenido de materia orgánica del suelo y el nitrógeno disponible (Cassmann., KG, 2000), aspecto que es fácilmente comprobable en Andisoles del Trópico (Castro, 2006).

- La acumulación de elementos traza es mayor en suelos orgánicos, particularmente de cadmio, conocido como carcinógeno (Kirchmann, H. and Thovaldsson, 2000; *http://www.enn.com/news/enn-stories/1999/02/0211/farming.asp*). En la actualidad los fertilizantes inorgánicos fosforados eliminan por procesos industriales el cadmio, mientras que el uso de la roca fosfórica cruda contiene cantidades variables de cadmio (Witter., E. 1996). ¿Por qué la agricultura orgánica ocasiona la acumulación de materiales pesados aprobando el uso de rocas fosfóricas crudas?

- En Holanda, Alemania y la Unión Soviética, la incorporación excesiva de estiércoles ha llevado a los fenómenos de contaminación más cuestionados como son la "eutroficación" de lagos y ríos, la liberación de altas tasas de amónico volátil que afecta vegetación y atmósfera, y la acumulación de nitratos en suelos, agua y tejidos. Esto demuestra que las fuentes orgánicas también contaminan (Smil., V. 2000).

BIBLIOGRAFÍA

ADDISCOTT., TM. 1995. Entropy and sustainability. Eur J Soil Sci 46: 161 – 168.

ALFARO. A, 1974. Química Agrícola. Plaguicidas y su Aplicación. Imprenta Aguirre. Madrid – España.

CASSMANN, KG, 2000. Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality and precision agriculture. Proc Nat Acad Sci USA 96. 5952-5959.

CASTRO, H., 2006. Una aproximación al análisis y entendimiento de los modelos agrícolas. Programa de Ingeniería Agronómica, UPTC, Tunja.

COGHLAN., A. 1999. Out of Egypt. New Scientist, 9 th Octuber, p 14.

COLOMBIAN EXPORTS COMPANY. 2003 Manual de buenas prácticas agrícolas. Eurepgap, Version 2.0.

CONKLIN, N.; THOMPSON., G. 1993. Product quality in organic and conventional produce: is there a difference? Agribusiness 9:3;295 – 307.

CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL, 1999. Agricultura Ecológica, una opción promisoria para el campo. Editorial. Panamericana formas e impresos S.A. Primera Edición, Bogotá, 1999.

DEFFUNE, G., 1999. Memorias curso teórico prácticos "Agroecología, Agricultura Orgánica y Sostenibilidad". Universidad Nacional de Colombia.

ESCOBAR, C. 2001. Aspecto de los suelos del Departamento de Caquetá con relación al uso y manejo. CORPOICA – COLCIENCIAS

EVERS, A. 1988. Effect of different fertilization practices on the growth, dry yield and dry matter content of carrot. J Agric Sci Finland 60: 135 – 152.

FAO, 1972. Evaluación de Tierras para fines rurales. Consulta de expertos. Wageningen, 6 – 12 de Octubre.

————, 2003. Evaluación de Tierras con metodologías FAO. Documento de Trabajo Proyecto Regional "Ordenamiento Territorial Rural Sostenible". Santiago de Chile.

FINCK, A. 1989. Fertilizantes y fertilización. Fundamentos y métodos para la fertilización de cultivos. Editorial Reverté, S.A., Barcelona España. 420 p.

HANSEN, H. 1981. Comparison of chemical composition and taste of biodynamically and convertationally grow vegetable. Qual Plant Pant Foods Human Nutri 30: 203 – 211.

KIRCHMANN, H; THOVALDSSON, 2000. Challenging targets for future agriculture.

MARSCHNNER,. H. 1986. Mineral Nutrition of higher plant. Academic Press. London.

MILLAR, C. E. 1955 The development of agriculture. En: Soil Fertility, New York, John Willey & Sons, Inc. 436 p

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Decreto 00544 de 1995. Producción, elaboración, empaque, importación y comercialización de productos ecológicos. Bogotá. P 20.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1989. Manejo y control de plagas de Insectos. Control de Plagas de plantas y animales Volumen III. Editorial Limusa. S.A. Impreso en México. Pág 552.

ROCKEFELLER FUNDATION. SPECIAL REPORTS. 1972 Colombia, Cambios en la agricultura, el hombre y los métodos. pp. 102.

SCHUPAN., W. 1974. Nutritional value of crops as influences by organic and inorganic fertilizer treatments. Qual Plant Pant Foods Human Nutri 23, 333 – 358.

SCIALABBA., N. 1999. Opportunities and constraints of organic agriculture, a socio – ecological analysis. http//www.fao.organicag.doc. SOCRATES1999. htm. Mayo 3 de 2006.

SMIL., V. 2000. Feeding the World. MIT Press, Cambridge, Mass.

TISDALE, S.L.;W.L. NELSON, 1996. Soil Fertility – past and present Macmillan CO. 430 p.

VALENZUELA., G. 1999. Primer curso avanzado sobre control de plagas. Principios de control de plagas. Asociación colombiana de ingenieros agrónomos.

WITTER, E. 1996. Towards zero accumulation of heavy metals in soil. Fertilizer Research 43: 225 – 233.

http://www.ifoam.org/whoisifoam/spanish.html. Mayo 3 de 2006.

http://www.fao.org/organicag/frame1-s.htm Mayo 3 de 2006.

http://www.enn.com/news/enn-stories/1999/02/0211/farming.asp.Heavy metal input by farming. Environmental News Network. Hyperlink. Mayo 3 de 2006.

http://pmep.cce.cornell.edu/profiles/extoxnet/carbaryl-dicrotophos/copper-sulphate-xt.html. Copper sulfhate. Extensión toxicology network. Hyperlink.Mayo 3 de 2006