SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956 ISSN 0562-5351 Volumen 42 No. 2 Año 2012

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS)



Asistentes a la XI Escuela Latinoamericana de Física de Suelos (ELAFIS), realizado en Medellín.

Afiliada a:
Unión Internacional de la Ciencia del Suelo
Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo

SLCS

SUELOS ECUATORIALES 42 (2), 2012
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

SUELOS ECUATORIALES

Fundada en 1956

ISSN 0562-5351

Volumen 42 No. 2 Año 2012

Revista de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS)

Editores:

Juan Carlos Loaiza, Ph. D
Profesor Asociado
Escuela Biociencias
Universidad Nacional de Colombia

Walter Osorio, Ph. D.
Profesor Asociado
Escuela Biociencias
Universidad Nacional de Colombia

Evaluadores en este número:

Gunay Erpul Ph.D., Ankara University, Turquia; Franco Obando., Universidad de CaldasColombia; Amanda Varela., Universidad Javeriana, Colombia; Alvaro Lema., Universidad Nacional de Colombia; Adilson Luís Bamberg Ph.D., Embrapa, Brasil; Jose Domingo Fabris Ph.D., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil; Ivvone Valenzuela Ph.D., Prevención de Riesgos en Adecco Chile; Washington Padilla G Ph.D., AGROBIOLAB Cía. Ltda, Colombia; Guilherme Krüger Bartels Ph.D., Universidade Federal de Pelotas, Brasil; Dario Castañeda Ph.D., Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid; Armando torrente Ph.D., Universidad Surcolombiana, Colombia; Alvaro Tamayo Ph.D. candidato, CORPOICA; Edgar Madero Ph.D., Universidad de Palmira, Colombia; Alfredo Alvarado Ph.D., Universidad de Costa Rica; Adriana Quinchia Ph.D., Escuela de Ingenieros, Colombia; Jorge Navia Estrada Ph.D., Universidad de Nariño, Colombia; Martha Ligia Castellanos Ph.D., Universidad de la Guajira, Colombia; Edwin Garcia Ph.D., Universidad de Antioquia, Colombia

SUELOS ECUATORIALES está indexada en PUBLINDEX de COLCIENCIAS y LATINDEX.

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO

1955-2012

Fundada en 1955 por Manuel del Llano Buenaventura en la ciudad de Medellín, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia. Licencia No. 00316 de Marzo 8 de 1972 del Ministerio de Gobierno. La SCCS está afiliada a la Unión Internacional de Ciencia del Suelo y la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo.

JUNTA DIRECTIVA NACIONAL
2011-2012

Jaime Humberto Bernal Riobo, *Presidente* Martha Ligia Castellanos M., *Vicepresidente*

Vocales principales: Jaime Humberto Bernal Riobo, Martha Ligia Castellanos Martínez, Walter Osorio Vega, Ramón Gualdrón Acosta, Ricardo Alexander Peña Venegas.

Vocales suplentes: Yolanda Rubiano Sanabria, Jorge Fernando Navia Estrada, Siavosh Sadeghian, Hugo Eduardo Castro Franco, Manuel Iván Gómez Sánchez.

Hernán Buitrago Camargo, *Revisor Fiscal*
Leila Amparo Rojas Escobar, *Secretaria Ejecutiva y Tesorera*
Amanda Varela Ramírez, *Secretaria de Actas*
Francisco Silva Mojica, *Asesor de Presidencia*
Luz Marina Otálora López, *Secretaria Administrativa*

DIRECTORES DE LOS COMITÉS REGIONALES:

Antioquia: Juan Carlos Loaiza Úsuga
Eje Cafetero: Jorge Enrique Cuervo Alzate
Cauca: Isabel Bravo Realpe
Córdoba y Sucre: Enrique Combatt Caballero
Cundinamarca y Boyacá: Amanda Lozano de Yunda
Huila: Armando Torrente Trujillo
Llanos Orientales: Samuel Caicedo Guerrero
Magdalena, Guajira, Cesar: Martha Ligia Castellanos
Nariño: Hernán Burbano Orjuela
Norte de Santander: Ibonne Valenzuela Balcázar
Santander: Ernesto Olave Ariza
Tolima: Armando Castilla Lozano
Valle del Cauca: Álvaro García Ocampo

SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO
Sede Permanente: Carrera 11 No. 66-34, Oficina 202, Bogotá, Colombia
Telefax: (57-1) 2113383-2113185. E-mail: scsuelo@cable.net.co, Página Web: www.sccsuelo.org

SUELOS ECUATORIALES 42 (2), 2012
Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo

POLITICA EDITORIAL

Suelos Ecuatoriales es una revista científica cuyo contenido es revisado por evaluadores científicos (peer-review) nacionales e internacionales. Se publica semestralmente y dos números constituyen un volumen. La revista es editada por la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), la cual está afiliada a la Unión Internacional de la Ciencia del Suelo y a la Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo. La revista está dirigida a investigadores, profesionales y estudiantes de ciencias agropecuarias, forestales, ambientales, química y de ciencias naturales, ciencias de la tierra afines con las ciencias del suelo. Los artículos publicados son resultados originales de investigación científica y tecnológica, de reflexión, de revisión, artículos cortos, reporte de casos, revisión de tema y traducciones. Se pretende con la revista permitir el intercambio de opiniones entre la comunidad nacional e internacional de la Ciencia del Suelo. Se reciben manuscritos en español, inglés, francés o portugués, con énfasis, pero no exclusivo, sobre suelos del área tropical que sigan las indicaciones establecidas en las "Instrucciones a los autores". Si cumplen con estas normas los manuscritos serán sometidos a evaluación por pares académicos anónimos escogidos por el comité editorial de la revista de acuerdo a su especialidad. Los manuscritos pueden ser rechazados para su publicación o pueden ser aceptados para ser publicados con o sin modificaciones, las cuales deben ser realizadas por los autores en un período de tiempo establecido por el editor. El comité editorial se reserva el derecho de aceptar o no las colaboraciones. La revista se publica con fondos propios de la SCCS, la cual es una entidad sin ánimo de lucro con personería jurídica ante la Cámara de Comercio de Bogotá. Esta revista puede ser adquirida en la oficina de la SCCS; los miembros activos de la SCCS reciben por suscripción automáticamente esta publicación. También puede ser consultada en las bibliotecas y hemerotecas especializadas del país donde es enviada.
Los autores interesados en publicar en la revista deben remitir sus manuscritos en papel o formato electrónico a:

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo
Carrera 11 No. 66-34, Oficina 202, Bogotá, Colombia
Telefax: 2113383-2113185
Página Web: www.sccsuelo.org
E-mail: suelos.ecuatoriales@gmail.com

Los conceptos emitidos por los autores son de su estricta responsabilidad y su publicación no implica respaldo de la revista o de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo a sus opiniones.

COMITÉ EDITORIAL

Editores-en-Jefe:

Profesor Juan Carlos Loaiza, Ph.D.
Universidad Nacional de Colombia
jc.loaiza@ctfc.es

Profesor Walter Osorio, Ph.D.
Universidad Nacional de Colombia
nwosorio@unal.edu.co

Miembros:

Idelfonso Pla Sentis, Ph.D.
Universidad de Lleida
Lleida, España

Camilo Ramírez, Ph.D.
Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia

Gernot Bodner, Ph.D.
Universidad de Boku
Viena, Austria

Juan José Ibañez, Ph.D.
Universidad Complutense de
Madrid, Madrid, España

Mabel Vásquez, Ph.D.
Universidad Nacional de La Plata
La Plata, Argentina

Valentijn R.N Pauwels, Ph.D.
Universidad de Gante
Gante, Bélgica

Editores Asistentes

Claudia Alvarez
M. Sc. Ciencia del Suelo

Laura Osorno
M.Sc. Ciencias del Suelo

Herbert Ramírez
Leo Digital, Medellín

CONSULTORES CIENTÍFICOS

José A. Espinosa Ph.D., IPNI, Quito, Ecuador; Jorge Etchevers Ph.D., Laboratory of Natural Resources Institute, México; Donald Gabriels Ph.D., Ghent University, Bélgica; Fernando García Ph.D., IPNI, Buenos Aires, Argentina; Olegario Muñiz Ph.D., Instituto de Suelos, La Habana, Cuba; Floria Bertsch M.Sc., Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica; Laura Bertha Reyes Ph.D., Universidad Nacional Autónoma de México; Ildefonso Pla i Sentis Ph.D., Universidad de Lleida, España; Marco A. Rendón Ph.D., IDRC, Canadá; Sergey Sedov, Ph.D., Universidad Nacional Autónoma de México; Rosa Poch i Claret Ph.D. Universitat de Lleida, España; Héctor Morras Ph.D., INTA- Casterllares Buenos Aires, Argentina; Fernando García Ph.D., IPNI, Buenos Aires, Argentina.

INSTRUCCIÓN A LOS AUTORES

1. Los trabajos a publicar deben ser investigaciones originales en cualquiera de los campos de las Ciencias del Suelo y eventualmente se aceptarán revisiones. No se aceptan los que promocionen marcas comerciales o que establezcan antagonismos con otras marcas. El remitente del artículo será el autor para futura correspondencia para lo cual debe suministrar la dirección completa incluyendo correo electrónico, fax y teléfono. La remisión de un trabajo implica que el mismo no ha sido enviado a otra revista. Es necesario enviar una carta en la cual el autor de correspondencia especifique que todos los autores están de acuerdo con someter el manuscrito a revisión para posible publicación en la revista. Se deben adjuntar las hojas de vida de cada autor.
2. Una copia del trabajo completo se debe enviar vía e-mail o a través de un CD al editor, quien la remitirá a evaluadores científicos para su revisión y estos recomendaran la publicación o no del trabajo. Los evaluadores podrán condicionar la publicación del trabajo a la elaboración de correcciones o ampliación de algún punto del trabajo.
3. Los originales deberán estar escritos a doble espacio, tamaño carta, con márgenes de 2.5 cm en todos los lados. Tipo de letra Times New Roman, tamaño 10, una sola columna. No deberán exceder de 10 páginas, incluyendo tablas y figuras. Para aquellos con fotografías a color, los autores deberán consultar previamente por el costo a su cargo. El texto debe estar en el programa Word y las gráficas en Excel (en blanco y negro).
4. Se debe utilizar el sistema internacional de unidades (SI) y sus símbolos. Además, se debe emplear el sistema de clasificación de suelos del "U.S. Soil Taxonomy". Se aceptarán otros sistemas de clasificación si se indica la respectiva equivalencia.
5. Los trabajos se organizarán de acuerdo con el siguiente esquema general en orden sucesivo: título en español, nombre del autor(es). Resumen y palabras claves; titulo en inglés, Abstract y Keywords; Introducción; Materiales y Métodos; Resultados y Discusión; Agradecimientos; Referencias.

a) Título: debe ser breve (máximo 20 palabras), conciso y reflejar aspectos específicos del trabajo. Se recomienda No emplear abreviaturas, nombres taxonómicos de organismos, fórmulas químicas ni la clasificación detallada del suelo.

b) Autor (es): se incluirán nombre (s) y primer apellido y la dirección de la Institución a la que pertenece. Indicar el autor de correspondencia.

c) Resumen: es una condensación de las ideas esenciales de los resultados del trabajo. El resumen deberá relacionar claramente el objetivo, método principal, resultados y conclusiones. No se repetirá información dada en el título, ni hará relación a las referencias. Su extensión no excederá 250 palabras. Después del resumen se incluirán cinco palabras clave distintas a aquellas usadas en el título.

d) Abstract: es el resumen anterior en inglés, precedido de la traducción del título y al final las *Keywords*. Se recomienda a aquellos autores que no manejan el idioma inglés asesorase adecuadamente para hacer una buena traducción del resumen.

e) Introducción: se debe describir brevemente el problema, la justificación y al final el objetivo del trabajo. El texto deberá ser de un estilo conciso y fácilmente entendible. Los nombres científicos deberán escribirse en cursiva. Para citar trabajos en el texto, se indicará el apellido del autor(es) en minúscula y año de publicación entre paréntesis (Johnson & Smith 2009). Si se refiere a trabajos realizados por más de dos autores, debe colocarse el apellido del primero, seguido por las abreviaturas "et al." (Anderson *et al.* 2008). Las fórmulas deben escribirse en forma clara, preste atención a las letras griegas o cualquier otro símbolo no latino. Tener cuidado en diferenciar el cero (0) de la letra o y entre uno (1) y la letra "ele".

f) Materiales y Métodos: se deben describir los métodos utilizados con suficiente detalle para permitir a otro investigador repetir el trabajo; sin embargo, las descripciones técnicas de los métodos sólo se detallarán cuando éstos representen una modificación o novedad. Es necesario dar el significado de todos los símbolos inmediatamente debajo de la ecuación en la cual se utilizaron por primera vez. Sólo aquellas ecuaciones que están explícitamente indicadas en el texto deben numerarse en serie, colocándose un número entre paréntesis al lado derecho. Las notas a pie de página deben usarse sólo en casos necesarios y numerarse indicándolas por números escritos un poco más arriba en el texto, tratando de que sean tan breves como sea posible. Si en las mismas se efectúan referencias, los datos completos figurarán en la lista de referencias.

g) Resultados y discusión: se deben describir los resultados obtenidos y la discusión de los mismos con relación a otros trabajos. Presente los resultados de los análisis estadísticos para soportar los hallazgos, incluya el nivel de significancia (*P*). Tablas: las tablas no deben exceder el área impresa de una página tamaño carta. Si los datos son numerosos es conveniente distribuirlos en dos o más tablas. No haga uso excesivo de las tablas cuando la información puede darse en pocas líneas en el texto. No repetir en el texto el contenido de las tablas. Deben numerarse de acuerdo con su posición en el texto, en el que deben incluirse referencias de las mismas. El título de cada tabla será corto y lo suficientemente explicativo. El encabezamiento de las columnas será conciso y claro. Figuras: incluye gráficos, esquemas, mapas, fotos, etc.; todas las figuras se presentarán dentro del texto, acompañadas de un título y explicación breve. Deberán numerarse de acuerdo con su ubicación en el texto. Las fotografías en blanco y negro deben estar en formato JPG. Fotos a color se aceptarán si poseen buen contraste e intensidad y el autor acepte el sobrecosto de la publicación. No debe repetirse la misma información en tablas y figuras. h) Agradecimiento: se pueden incluir los reconocimientos a las entidades y personas que colaboraron en la investigación.

i) Referencias: todas las referencias bibliográficas de obras consultadas se presentaran en una lista al final del manuscrito, tanto trabajos publicados como en prensa. Para artículos no publicados, se mencionará el autor en el texto, con una llamada en pie de página, indicando si es un manuscrito no publicado o comunicación personal. La lista bibliográfica deberá presentarse en orden alfabético de los apellidos de los autores y cronológicamente por autor diferenciando con letras minúsculas, después del año, aquellos que correspondan a un mismo año. Utilice abreviaciones para el título de las revistas, para ello utilice la siguiente página web:
(http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISIabbr/A_abrvjt.html). Considere los siguientes ejemplos:

- Para publicaciones periódicas:
CASTRO J, RESTREPO JC, BEUTH J (2005) Efecto de la adición de urea sobre el pH del suelo. Suelos Ecuat 37: 50-51.
- Para libros:
LÓPEZ L, ÁLVAREZ A (2003) Química de suelos sulfato ácidos. Editorial Suramérica, Bogotá, 250 p.
- Para simposios, congresos, capítulos de libro de varios autores:
RESTREPO L, ÁLVAREZ D, OSORIO S (2004) Remediación de suelos salinos en la alta Guajira, 34-45 pp. *En*: ZAPATA R, CABRERA K (ed) Estrategias de remediación de suelos degradados. Soc Col Ci Suelo, Bogotá.

SCOPE OF THE JOURNAL

Suelos Ecuatoriales is the journal of the Soil Science Society of Colombia (ISSN 0562-5351). This publication was founded in 1956 and publishes two issues yearly, in Spanish, English or Portuguese, based on full length original research papers containing new and significant information bearing on broad aspects of soil sciences at both regional and international level. Review articles are accepted if solicited by the Editorial Board. In all cases, manuscripts submitted for publication will be subject to the same review process required of regular submissions.

Manuscripts must be based on original research and contain novel findings of significance, especially up-to-date achievements and advances in the entire field of soil science studies dealing with environmental science, ecology, agriculture, bioscience, geoscience, forestry, etc. Suelos Ecuatoriales also publishes reviews, mini reviews, short communications and special issues; and its areas of particular interest include soil physics, soil chemistry, soil biology and biochemistry, biogeochemical fluxes; geoecology; geoarcheology; taphonomy; carbon fluxes and fixation, soil fertility and plant nutrition, soil resources and use, soil mineralogy, soil environment and ecology, soil and water conservation, wetland soils, soil salinity and management, soil and plant analysis and technology, soil gases and global change.

Authors are responsible for submitting well-written manuscripts, in simple declarative sentences and must conform to accepted standards, style and usage of the language. Contributors who are not native English speakers are strongly advised, prior to submission, to ensure that a colleague fluent in the english language, if none of the authors is so, has reviewed their manuscript. Concise english without jargon should be used. Repetitive use of long sentences and passive tense should be avoided. It is strongly recommended that the text be run through computer spelling and grammar programs. Spelling should be British or American english and should be consistent throughout. Manuscripts may be rejected without paper review by the editor-in-chief if they do not comply with the instructions to authors, or are beyond the scope of the journal.

Indexing/abstracting: Suelos Ecuatoriales is indexed/abstracted in PUBLINDEX of COLCIENCIAS and LATINDEX.
Ethical issues: authors are responsible for obtaining permission to reproduce copyrighted material from other sources. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the authors. The use of someone else's ideas or words in their original form or after changing slightly without a proper citation is considered plagiarism. Even cited properly, if words taken directly from another author's work are not indicated with quotation marks (" "), the author is still guilty of plagiarism.

Cover letter: authors are requested to submit a cover letter to the Editor-in-Chief with their manuscript, outlining their reasons for submitting their manuscript to Suelos Ecuatoriales and three recommended reviewers' information: first name, middle name, last name, education, title and position, institution, full postal address, country, telephone, e-mail, research fields and specialties (best as key words). Any other information for the Editor-in-Chief should also be included in this letter.

Submission: All manuscripts must be submitted electronically via the internet to the Suelos Ecuatoriales:

Editorial Office of Suelos Ecuatoriales
Soil Science Society of Colombia
Carrera 11 No. 66-34, Of. 202, Bogotá, Colombia
Telefax: (57-1) 2113383-2113185
webpage: www.sccsuelo.org
E-mail: suelos.ecuatoriales@gmail.com

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Submission of a manuscript to Suelos Ecuatoriales implies that:
1) The work described has not been published before (publication of a poster abstract or an oral presentation is not considered previous publication of the research).
2) It is not under consideration for publication anywhere else.
3) The published in Suelos Ecuatoriales had been approved by all co-authors or the responsible authorities (tacitly or explicitly) at the institute where the work has been carried out.
4) If accepted, it will not be published elsewhere in the same form in any other language without the written consent of the publisher. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation.
Preparation of manuscripts: the manuscript has to be submitted at double space, having margins of 2.5 cm in all sides. The specified font is Times New Roman size 11, being one column article. The length of the paper doesn't have a limit of pages for the submitted paper. If the authors would like to include colour figures on their paper, they have to ask previously the cost that would entail, being charged to their accounts. The paper text has to be submitted on Word format and the graphics on Excel (black and white).
The international system units (SI) has to be used, as well as the symbols associated. "U.S. Soil Taxonomy" has to be used, and it would be accepted other classification Systems if there is indicated the equivalence to "U.S. Soil Taxonomy".
5) The written documents will be organized according to the following general index, consecutively: Spanish title, Author name(s), Abstract and Key words in Spanish, English title, Abstract and Key words in English, Introduction, Materials and Methods; Results and Discussion; Acknowledgments; References.
a) Title: it has to be brief (maximum 20 words), concise and has to reflect specific aspects of the research. It is recommended not to use abbreviations, taxonomical names of organisms, chemical formulas nor soil detailed classification.
b) Author (s): the manuscript must include author(s) name (s) and the postal address of the Institution that belongs to. It is necessary to indicate the correspondence author address.
c) Abstract in spanish: it has to be a summary of the essential ideas of the work results. This abstract has to relate clearly the main aim of the research, methodology used as well as results and conclusions obtained. It is not allowed to repeat information given on the title or to use references on the abstract. The maximum length is 250 words. After the Spanish abstract, it will be included five key words different from which has been used on the title.
d) Abstract in english: It is the translated spanish version, with a previous title in english and the keywords. It is recommended to the authors that don't have a good command on english to consult somebody to realize a good abstract translation.
e) Introduction: Must to describe briefly the problem, the justification of the research and at the end the main aim of the work. The text has to be written in a concise stile and easy to understand. The scientific names have to be on italics. To quote works on the text has to indicate the first name of the author(s) on lower case letter with the publication year, between brackets (Johnson & Smith, 2009). If it is referred to works realized by more than two authors, it has to be written the name of the first author followed by "et al." (Anderson et al., 2008). The formulas must to be written clearly; especially the Greek letters or other symbols not Latin. It is necessary to put special attention differing zero (0) from o letter, and number one (1) from L lowercase letter.
f) Materials and methods: On this part of the paper it is important to describe the methodologies used sufficiently detailed to allow another researcher to repeat the work, however, the technical descriptions only will be detailed when these would represent an innovation or modification of a normal procedure. It is necessary to give the meaning of all the symbols immediately under the equation when they are used for the first time. Only these equations that are indicated explicitly on the text have to be numbered, writing a number between brackets on the right-hand site. The footnotes have to be used only if is necessary and have to be numbered on superscript being as brief as possible. If in the footnotes it would be necessary to refer some study, the complete information will be on the references list.
g) Results and discussion: It is necessary to describe the obtained results as well as the discussion of these, relative to other works. The results have to be submitted, by means of statistical analysis to support the finds, including the significance level (*P*). Tables: It is important not to surpass the impression area. If the data are numerous it would be necessary to distribute it in two or more tables. It is better not to use excessively tables, most of all when the given information could be included on the text. Not to repeat the text information on the tables. The tables have to be numbered according to their position on the text, where it has to appear a reference of them. The table title has to be short and explanatory enough. The table columns headings will be concise and clear. Figures: It could include graphs, sketch, maps, photographs, etc. All the figures that will appear on the text have to be followed by a title and a brief explanation. The figures has to be numbered according to their position on the text, and have to be on white and black in JPG format. Colour photos will be accepted if the intensity and contrast are good and if the author accepts the over cost to publish it. The given information could not be repeated on the tables and figures.
h) Acknowledgments: On this section it can be included the recognition of the organizations and persons that collaborated with the research done.
i) References: All the bibliographic references have to be exposed in a list at the end of the manuscript, being published works or press papers. The unpublished works will be mentioned as author on the text, with a footmark indicating if it is an unpublished document or a personal communication. The bibliographic list has to follow author name alphabetic order, and if an author appears more than once, it will be ordered chronologically, differed by means of a lowercase letter after the publication year. It is recommended to use the abbreviations for the journals title, as it appears on the following webpage: (http://www.efm.leeds.ac.uk/~mark/ISIabbr/A_abrvjt.html), as on the following examples:

Periodical publications:
CASTRO J, RESTREPO JC, BEUTH J (2005) Efecto de la adición de urea sobre el pH del suelo. Suelos Ecuat 37: 50-51.
Books:
LÓPEZ L, ÁLVAREZ A (2003) Química de suelos sulfato ácidos. Editorial Suramérica, Bogotá, 250 p.
Symposiums, congress, book chapters of several authors:
RESTREPO L, ÁLVAREZ D, OSORIO S (2004) Remediación de suelos salinos en la alta Guajira, 34-45 pp. En: ZAPATA R, CABRERA K (eds) Estrategias de remediación de suelos degradados. Soc Col Ci Suelo,Bogotá.

SUELOS ECUATORIALES
Fundada en 1956
ISSN 0562-5351
Volumen 42 No. 2, Diciembre 2012

Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo
1955-2012

Editorial: *Juan Carlos Loaiza – Walter Osorio* 94-95

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM UMA UNIDADE DE MAPEAMENTO DE GLEISSOLO 96-107
Spatial variability of soil attributes in one map unit of endoaquall
Dioni Glei Bonini Bitencourt, Luís Carlos Timm, Luiz Fernando Spinelli Pinto

ANALISIS GEOESTADISTICO DE PROPIEDADES DEL SUELO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE FRIJOL (*Vigna unguiculata* L) BAJO MANEJO CONSERVACIONISTA 108-120
Geostatistical analysis of soil properties and cowpea yield (*vigna unguiculata* l) under conservation management
Bravo C, J Cabrera, M Carvallo, Z Lozano y F Ovalles

RIESGO DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRA EN ROCAS METAVOLCÁNICAS EN MONTAÑAS DEL CENTRO-NORTE DE VENEZUELA 121-128
Risk of landslides in metavolcanic rocks in mountains of North-Central Venezuela
María Corina Pineda, Francisco Javier Fonseca, Ildefonso Pla, Jesús Viloria

NÚMERO DE MUESTRAS SIMPLES PARA EL ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO 129-137
Number of single samples for analysis of soil properties
Luz Adriana Lince Salazar, Siavosh Sadeghian Khalajabadi

EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO: PÁRAMO DE QUIMSACOCHA AL SUR DEL ECUADOR 138-153
Effects about the physical and chemical soil properties by the vegetal coverage and land use change: Páramo of Quimsacocha at the Southern Ecuador
Pablo Quichimbo, Gustavo Tenorio, Pablo Borja, Irene Cárdenas, Patricio Crespo, Rolando Célleri

PROPIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DE SUELOS VOLCÁNICOS AFECTADOS POR INCENDIOS RECIENTES EN PATAGONIA, ARGENTINA 154-161
Physical and hydrological properties of volcanic soils affected by recent wildfires in Patagonia
Morales D., La Manna L. y Rostagno M.

DENSIDADE, POROSIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO ASSOCIADO A TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO DIFERENCIADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR 162-165

Bulk density, porosty and penetration resistance of an oxisol associated with different times of implantation of sugarcane

Roberta Jeske Kunde, Cláudia Liane Rodrigues de Lima, Renata Pinto Albert Alves, Clenio Nailto Pillon, Sérgio Delmar dos Anjos e Silva

IMPACTOS DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS DA COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DOS HORIZONTES BA E Bt DE UM ARGISSOLO AMARELO 166-172

Impacts of the mechanized forest harvest operations on the structure of the Ba and Bt horizons of a yellow Argisol

Maria Luiza de Carvalho Andrade, Moacir de Souza Dias Junior y Ricardo Previdente Martins

ABONAMIENTO ORGANICO Y RIEGO SUPLEMENTARIO EN EL CULTIVO DE QUINUA 173-180

Organic fertilization and deficit irrigation in the cultivation of quinoa

Roberto Miranda, Henry Mendoza, Edwin Yucra

RESPUESTA DEL CAFÉ A LA FERTILIZACIÓN CON AZUFRE 181-185

Response of coffee to sulphur fertilization

Siavosh Sadeghian Khalajabadi, Hernán González Osorio

MONITOREO DEL pH Y FÓSFORO SOLUBLE EN LA RIZOSFERA DE ARBOLES DE AGUACATE EN EL NORTE Y ORIENTE ANTIOQUEÑO 186-190

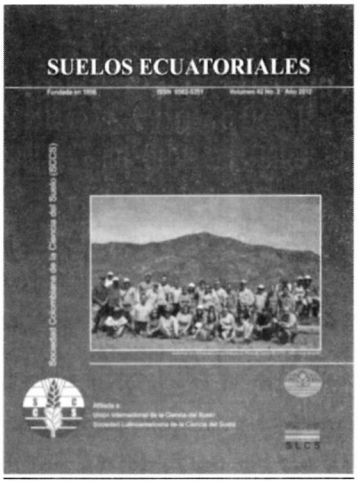
Monitoring soil pH and soluble P in the rhizosphere of avocado trees at the Northern and Eastern Antioquia

Sandra Serna, Beatriz Montoya y Walter Osorio

Caratula:

Asistentes a la XI Escuela Latinoamericana de Física de Suelos (ELAFIS), realizado en Medellín, durante una de las salidas de campo en el Occidente Antioqueño.

Foto: Cortesía de Luciana Montebello de Oliveira (Brasil)



Asistente editorial: Laura Osorno
Diagramación, Corrección de estilo y revisión de textos: Claudia Álvarez
Corrección de estilo e impresión: Herbert Ramírez

EDITORIAL

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo



Juan Carlos Loaiza Usuga
Walter Osorio Vega
Editores Suelos Ecuatoriales
Universidad Nacional de Colombia

En este número de la revista Suelos Ecuatoriales se presentan las contribuciones de los asistentes a la XI Escuela Latino Americana de Física de Suelos (ELAFIS) realizada por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (Postgrado de Geomorfología y Suelos) y la Sociedad Colombiana de Ciencias del Suelo (SCCS) del 9 al 20 de Julio de 2012. Este evento contó con el patrocinio del Centro Internacional de Física Teórica (ICTP), el Gobierno de Flandes, fondos UNESCO y el Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC). Se contó con la colaboración de destacados profesores provenientes de Universidades y Centros de Investigación en Bélgica, Venezuela, Brasil, España, Colombia y Estados Unidos. La ELAFIS en esta oportunidad contó con la participación de más de 50 estudiantes de Ecuador, Venezuela, Brasil, Argentina, Bolivia, Honduras, Perú, Chile y Colombia, haciendo posible que profesionales y estudiantes de la región se formen y se actualicen en tópicos relacionados con la física de suelos, manejo del agua y disciplinas afines, además de facilitar que profesores, especialistas e investigadores de diferentes partes del mundo intercambien ideas sobre física de suelos y temas relacionados.

Las mejores ponencias por parte de los asistentes a este evento fueron revisadas por el comité editorial de la revista conjuntamente con los profesores de la ELAFIS entre otros experimentados físicos de suelos latinoamericanos, los cuales han realizado la labor de revisores del material sometido para su publicación en la revista, garantizando la calidad de los artículos seleccionados. En primer lugar se aborda la problemática de la variabilidad espacial del suelo y la geoestadística bajo la supervisión del Dr. L. Timm (Brasil) y F. Ovalles (Venezuela) reconocidos expertos en el tema. El estudio del riesgo de la ocurrencia de deslizamientos y sus implicaciones en la Cordillera central de Venezuela fue realizado bajo la supervisión del Dr. I. Pla (Venezuela-España). Los efectos de la mecanización agrícola en áreas forestales fue una contribución por parte del grupo del Dr. M. de Souza (Brasil). Posteriormente se tratan temas clásicos en física de suelos relacionados con cambios en las propiedades físicas de èste; y su relacion con cambios en el uso del mismo por P. Quichimbo (Ecuador), labores culturales R. Jeske (Brasil), propiedades hidrológicas de los suelos D. Morales (Argentina). Sin dejar de lado las contribuciones relacionadas con la temática de fertilización, fertilidad y abonamiento orgánico por parte de los investigadores R. Miranda, S. Sadeghian y S. Serna pertenecientes a grupos de investigación consolidados en Argentina y Colombia, respectivamente. Este número presenta a través de sus páginas una breve reseña del panorama actual de las temáticas de investigación en física de suelos y áreas afines en América Latina, por parte de nuevos investigadores en el ámbito latinoamericano respaldados por la experiencia de reconocidos expertos que trabajan en institutos de investigación y universidades en los diferentes países mencionados.

Después de cinco y tres años de trabajo como editores de esta revista, el Dr. W. Osorio y Dr. J.C. Loaiza, respectivamente, presentamos la renuncia formal a dichos cargos, esperando que el nuevo comité de la SCCS nombre el nuevo staff editorial. El trabajo de estos últimos años ha dejado como resultado la participación de destacados científicos nacionales e internacionales

como autores y parte del comité editorial de la revista. La indexación de ésta en PUBLINDEX, la realización del trabajo de actualización de las bases de datos de la revista, estructuración de un proceso de revisión y edición de acuerdo a estándares internacionales, el comienzo del proceso de indexación en bases de datos internacionales y la puesta en marcha de algunos números de la revista en formato PDF los cuales pueden ser consultados vía internet.

Queremos agradecer al equipo editorial de la revista que han hecho que sea posible el editar cada nuevo número, especialmente a C. Álvarez, L. Osorno, H. Ramírez y M. Casamitjana. Por último en nombre del comité editorial de la revista y los editores agradecer a la junta directiva saliente de la SCCS su apoyo a la labor realizada, deseando lo mejor en esta nueva etapa de la revista al nuevo comité editorial y editores.

J.C. Loaiza
N.W. Osorio
Editores





Juan C Loaiza

Nelson W. Osorio

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS DO SOLO EM UMA UNIDADE DE MAPEAMENTO DE GLEISSOLO

Dioni Glei Bonini Bitencourt[1] ✉, Luís Carlos Timm[2], Luiz Fernando Spinelli Pinto[1]

[1]Departamento de solos, FAEM, UFPel, Pelotas(RS), Brasil
[2]Departamento de Engenharia Rural, FAEM, UFPel, Pelotas(RS), Brasil

✉: dioniglei@gmail.com

Palavras-chave:

Dependência espacial
Geoestatistica
Solos de várzea
Levantamento de solos
Distribuição espacial dos solos

RESUMO

Os solos de várzea, através da orizicultura são muito importantes na produção de grãos do Estado do Rio Grande do Sul. No entanto, muito ainda pode ser feito em relação ao manejo destes solos no intuito de diversificar o uso e aumentar a eficiência do cultivo do arroz irrigado, sendo fundamental o conhecimento mais aprofundado desses solos e de sua variabilidade. O presente trabalho teve por objetivo caracterizar a variabilidade espacial da camada superficial de um Gleissolo cultivado com arroz irrigado na Granja Bretanhas, município de Jaguarão/RS. Em uma área de 403 ha, onde se reconheceu três unidades de mapeamento por levantamento pedológico, foi realizada uma amostragem sistemática de 403 amostras da camada superficial. Foram caracterizados os perfis modais e realizadas análises químicas e do teor de argila da camada superficial. A análise estatística e geoestatística dos dados mostraram que a área total apresentou semivariogramas com dependência espacial, porém sem patamar, enquanto que as unidades de mapeamento apresentaram semivariogramas com dependência espacial e com patamar, além disso, os parâmetros de ajuste dos semivariogramas sugerem uma amostragem com espaçamento maior do que 100m com vistas à agricultura de precisão.

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES IN ONE MAP UNIT OF ENDOAQUALL

Keywords:

Spatial dependence
Geostatistic
Low land soils
Soil survey
Spatial distribution of soil

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 96-107

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

Lowland soils, through irrigated rice, are very important in grain production in the State of Rio Grande do Sul - Brazil. However, a lot can still be done in relation to the management of these soils in order to increase the efficiency of the rice crop system, being of fundamental importance a deeper knowledge of these soils, including their variability. The present study aimed to characterize the spatial variability of the surface layer of an Endoaquoll cultivated with irrigated rice in Jaguarão, Rio Grande do Sul state, Brazil. In a 403 ha area, where three soil mapping units were recognized by pedological survey, a systematic surface soil sampling was performed in 403 locations. The modal profiles and the soil surface layer clay content and chemical analyses were characterized. The statistical and geostatistical analysis showed that the whole area presented semivariograms with spatial dependence but no sill while the mapping units presented semivariograms with spatial dependence and sill, furthermore, the parameters adjustment of semivariogram suggest a sampling distance larger than 100 m for precision agriculture.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUÇÃO

Solos de várzeas e terras baixas são largamente utilizados para o cultivo de arroz no estado do Rio Grande do Sul (Brasil). Dentre estes solos destacam-se os Gleissolos, que são encontrados nas partes baixas das várzeas e nas depressões das áreas dos Planossolos (Pinto *et al.* 2004). É muito importante o manejo correto desses solos, pois influenciará na produtividade e nos custos da atividade arrozeira, portanto a obtenção de um adequado levantamento pedológico é fundamental. Os levantamentos de solos constituem um inventário das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos, bem como apresentam a classificação taxonômica e interpretativa e a distribuição geográfica dos mesmos na área abrangida pelo estudo (Dalmolin *et al.* 2004). Entretanto, as informações de solos em escala adequada são escassas, sendo utilizados levantamentos exploratórios e de reconhecimento. Apesar de possuírem um grau de precisão muito baixo, mesmo em levantamentos pedológicos mais detalhados, o conjunto de solos pertencente a uma mancha de solo, considerando aquele constituído por apenas uma classe de solo, pode apresentar elevado grau de variação em um ou mais atributos.

As variações dentro das unidades de mapeamento são reconhecidas, porém são descritas apenas de forma qualitativa e em termos vagos (Lin *et al.* 2005). Essa variabilidade é consequência de complexas interações dos fatores e processos de formação do solo (Corá 1997), de modo que até mesmo as práticas de manejo do solo e da cultura são causas adicionais da variabilidade (Blevins *et al.* 1983, Seta *et al.* 1993, Corá 1997). Desta forma, os solos dentro de cada delineamento, apesar de pertencentes a uma mesma unidade de mapeamento, podem requerer manejos diferenciados.

Estudos voltados para a compreensão da variabilidade de atributos do solo podem melhorar a qualidade das informações fornecidas pelo levantamento de solos. Desta forma o objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial da camada superficial de um Gleissolo cultivado com arroz irrigado na Granja Bretanhas, município de Jaguarão/RS.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma área com 403 ha pertencente ao grupo Extremo Sul, na cidade de Jaguarão, que se localiza a 140 km de Pelotas, tendo seu acesso feito pela BR 116 (Figura 1). Situa-se na parte meridional do Estado, na Planície Costeira do Rio Grande do Sul (Brasil). A coordenada geográfica média dos locais amostrados é 32° 32' 46,6'' de latitude Sul e 53° 05' 43,9'' de longitude Oeste e a altitude varia entre 4 a 7 m acima do nível do mar, com relevo predominantemente plano. Em uma primeira etapa foi feita a fotointerpretação da área por meio de fotografias aéreas na escala 1:20.000. Em seguida foram abertas três trincheiras para coleta de amostras dos horizontes e descrição morfológica dos perfis modais de acordo com as normas descritas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (Lemos *et al.* 1996), utilizando as notações estabelecidas pela Embrapa/SNCLS (1995).

Realizou-se ainda uma amostragem sistematizada obtendo-se uma amostra por hectare, onde cada amostra foi constituída com 10 subamostras coletadas em um raio de 5 metros a partir do ponto principal, totalizando 403 amostras. As amostras foram coletadas na camada de 0-20 cm e foram georreferenciadas com um GPS (Figura 2). As amostras foram enviadas ao laboratório do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas onde foram realizadas determinações físicas e químicas. Os perfis modais foram analisados segundo o Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (1997) e as amostras da camada superficial conforme Tedesco (1995). Nos perfis modais foram avaliados: granulometria, pH em água e em KCl, Ca, Mg, Al, Na, K e P e para as amostras da camada superficial foram: pH em água, Ca, Mg, Al, Na, K, P, H+Al, carbono orgânico e teor de argila.

Foi realizada uma análise exploratória dos atributos físicos e químicos determinando-se a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos, amplitude interquartílica, assimetria, curtose e teste de Kolmogorov Smirnov. Foram selecionadas as variáveis que apresentaram distribuição normal. O estudo da variabilidade espacial foi feito com o auxílio do programa "Geoestatistic for the Enviromental Sciences – GS$^+$", versão 7.0, utilizado para o cálculo dos semivariogramas experimentais e teóricos. Este software permite também verificar a qualidade do ajuste do semivariograma teórico por meio da técnica de validação cruzada. O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado pela expressão IDE = $(C/C+C_0)$ x100, onde C= contribuição e $C+C_0$= patamar. O grau de dependência espacial de cada variável foi classificado como: dependência espacial fraca para valores de IDE $\leq$ 25%; moderada para 25% < IDE $\leq$ 75%; e dependência forte para IDE > 75% (Zimback 2001). O grau de dispersão dos valores de cada variável em torno da média (CV, coeficiente de variação) foi classificado conforme os seguintes intervalos: CV $\leq$ 12% baixa variabilidade, 12% < CV $\leq$ 60% média variabilidade e CV > 60% alta variabilidade dos dados (Warrick & Nielsen 1980).

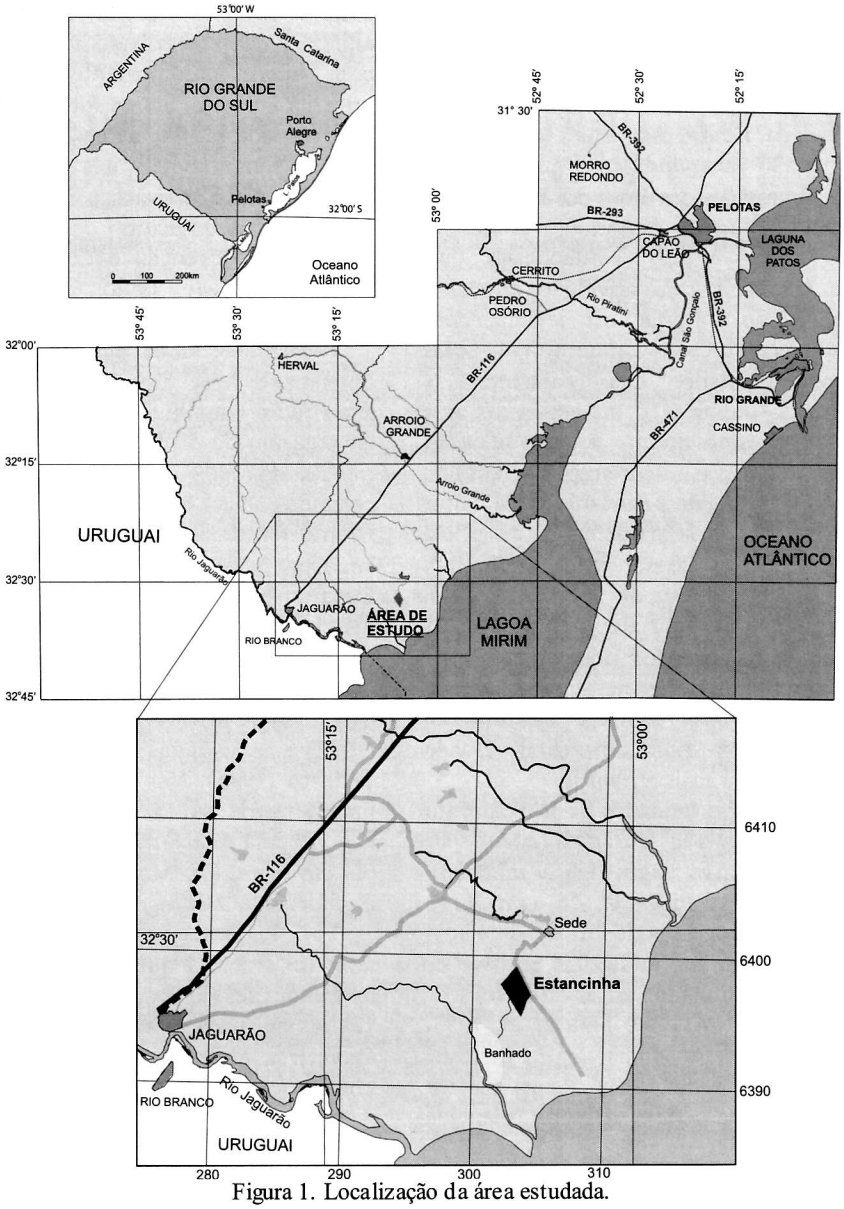


Figura 1. Localização da área estudada.

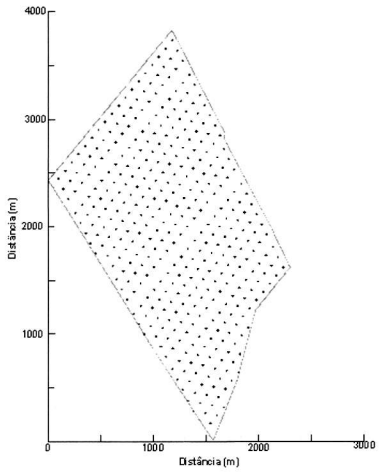


Figura 2. Distribuição espacial dos pontos amostrados

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3 encontram-se as unidades de mapeamento discriminadas no levantamento de campo, sua distribuição na área em estudo e a localização dos perfis modais. Os solos foram classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação (Embrapa 2006) em: Gleissolo Melânico Ta Eutrófico chernossólico (GMve1), Gleissolo Melânico Ta Eutrófico luvissólico (GMve2) e Gleissolo Háplico Ta Eutrófico luvissólico (GXve). De acordo com o sistema americano de classificação de solos (U.S. Soil Taxonomy), os três perfis são classificados como Typic Endoaquall. Os resultados da análise descritiva exploratória dos atributos do solo para a área total e unidades de mapeamento são mostrados nas tabelas 1 e 2.

Os atributos químicos capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases (V) e soma de bases (S) apresentaram menor variabilidade dentro das unidades de mapeamento em relação à área total estudada, o que é indicado pelos menores valores de coeficiente de variação e amplitude interquartílica para estes atributos nas unidades de mapeamento (Tabela 2) do que na área total (Tabela 1). Esta diminuição da variabilidade ocorreu em função da separação das unidades de mapeamento em escala maior obtendo-se desta forma uma população mais homogênea, onde se observa com clareza para a unidade de mapeamento GMVe2 (Tabela 2). Porém, para as unidades de mapeamento GMve1 e GXve, sua amplitude interquartílica foi maior do que a área total em relação aos atributos carbono orgânico e potássio (Tabela 2).

A variabilidade natural da população de dados da camada superficial dessas unidades de mapeamento pode não estar bem caracterizada, isto provavelmente ocorreu em função das operações de sistematização (corte e aterro) realizadas na área. A distribuição dos dados indica a necessidade de uma subdivisão adicional nessa escala para essas unidades de mapeamento. Mesmo assim as unidades de mapeamento mostraram mais atributos do solo com distribuição normal do que em relação a área total (Tabela 2).

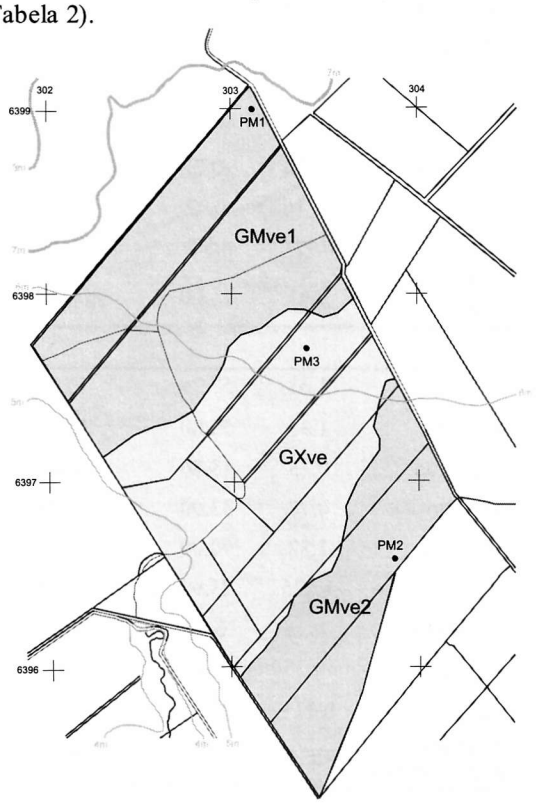


Figura 3. Unidades de mapeamento e perfis modais da área em estudo

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo para a área total

Estatísticas	Corg (%)	K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	V (%)	S ($cmol_c\ dm^{-3}$)
Média	1.38	0.16	14.88	84.10	12.65
Mediana	1.38	0.16	14.82	84.38	12.23
Desvio padrão	0.26	0.04	3.33	6.17	3.50
Mínimo	0.73	0.08	8.65	64.70	5.68
Máximo	2.15	0.26	22.86	96.03	21.75
CV (%)	18.67	23.39	22.37	7.34	27.65
Assimetria	0.14	0.14	0.27	-0.29	0.37
Curtose	-0.06	-0.76	-0.80	-0.56	-0.66
Valor p	0.20*	0.12*	0.07*	0.31*	0.06*
Amplitude interquartílica	0.32	0.06	5.22	9.19	5.62

* Normalidade segundo o teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de significância. Corg = carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases e S= soma de bases.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo para as unidades de mapeamento

	Corg (%)	K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	CTC ($cmol_c\ dm^{-3}$)	V (%)	S ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Ca/Mg	Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)
GMve1								
Média	1.48	70.32	17.60	87.29	15.42	3.90	11.67	3.06
Mediana	1.46	71.00	17.35	88.11	15.35	3.81	11.75	3.00
Desvio padrão	0.29	12.00	2.25	5.36	2.57	0.80	2.16	0.58
Mínimo	0.73	37.00	13.07	69.20	9.98	2.35	7.20	2.00
Máximo	2.15	102.00	22.86	96.03	21.75	6.00	16.80	4.80
CV (%)	19.45	17.07	12.77	6.14	16.64	20.54	18.53	18.93
Assimetria	-0.14	-0.22	0.33	-0.70	0.31	0.43	0.14	0.42
Curtose	-0.36	0.07	-0.49	0.05	-0.45	-0.01	-0.58	-0.17
Valor p	0.72*	0.58*	0.63*	0.20*	0.88*	0.79*	0.75*	0.25*
Amplitude interquartílica	0.41	15.00	3.12	7.55	3.70	1.02	3.20	0.80
Gxve								
Média	1.31	57.79	13.82	82.90	11.51	-	-	-
Mediana	1.35	55.00	13.45	83.61	11.04	-	-	-
D.padrão	0.23	13.86	2.24	5.71	2.39	-	-	-
Mínimo	0.78	33.00	10.21	68.56	7.69	-	-	-
Máximo	1.82	90.00	19.79	93.03	18.39	-	-	-
CV (%)	17.25	23.99	16.19	6.89	20.75	-	-	-
Assimetria	-0.18	0.43	0.85	-0.30	0.86	-	-	-
Curtose	-0.35	-0.67	0.42	-0.60	0.39	-	-	-
Valor p	0.11*	0.16*	0.15*	0.77*	0.17*	-	-	-
Amplitude interquartílica	0.34	21.00	2.83	8.39	3.09	-	-	-
GMVe2								
Média	1.31	51.69	11.03	79.49	8.80	2.26	5.66	2.52
Mediana	1.35	51.00	10.91	79.66	8.69	2.26	5.70	2.50
D.padrão	0.17	10.01	1.30	4.75	1.42	0.41	1.17	0.35
Mínimo	0.90	35.00	8.65	64.70	5.68	1.41	3.40	1.80
Máximo	1.64	86.00	15.10	88.74	13.40	3.14	9.20	3.70
CV (%)	13.18	19.36	11.80	5.98	16.15	17.96	20.63	13.78
Assimetria	-0.35	0.62	0.81	-0.38	0.55	-0.23	0.37	0.59
Curtose	-0.13	0.67	0.98	0.00	0.79	-0.76	0.33	0.58
Valor p	0.37*	0.81*	0.35*	0.91*	0.72*	0.43*	0.53*	0.21*
Amplitude interquartílica	0.19	13.00	1.34	6.84	1.75	0.65	1.30	0.40

* Normalidade segundo o teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de significância. Corg= carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases, S= soma de bases, Ca/Mg= relação cálcio magnésio, Ca= cálcio e Mg= magnésio.

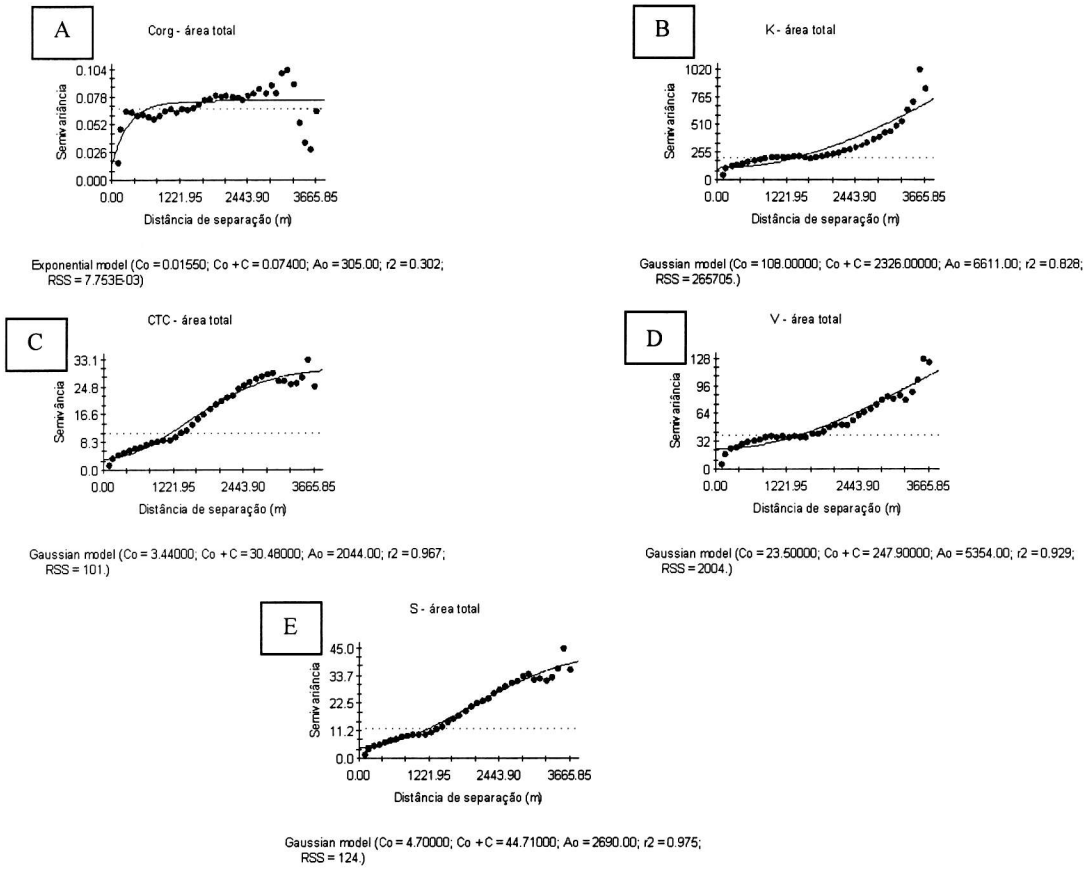


Figura 4. Semivariogramas experimentais e teóricos para a área total. Corg =Carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases, S= soma de bases.

Os semivariogramas da área total (fig.4) mostram a existência de dependência espacial para os atributos: Corg, K, CTC, V e S não exibindo distribuição espacial completamente aleatória. Apesar disso os semivariogramas do K (fig.4-B) e S (fig.4-E) não apresentaram um ajuste melhor em relação a unidade de mapeamento GMve2 para esses mesmos atributos químicos (figs. 6-B e 6-E), o mesmo ocorreu para o V (fig.4-D) em relação a GMve1 (fig. 5-D), de modo que os semivariogramas do K (fig.4-B), S (fig.4-E) e V (fig.4-D) apresentaram a tendência de subestimar os menores valores interpolados e superestimar os maiores valores interpolados em um processo de krigagem conforme mostra os valores do coeficiente (a) da tabela 3 para a área total, este mesmo comportamento é observado para os atributos Corg, CTC (figs. 4-A e 4-C).

Foi possível identificar alguns comportamentos conforme já identificado por Vieira (2000). O primeiro comportamento indica um aumento contínuo da semivariância, sem que o semivariograma atinja um patamar, como é caso de K (fig. 4-B) e V (fig. 4-D), aqui a hipótese intrínseca que é a menos restritiva não foi atendida porque não houve a estacionaridade do semivariograma o que torna inadequado o prosseguimento de estudos geoestatísticos com esse tipo de semivariograma, esta situação indica que o tamanho do campo amostrado (área total) esta inadequado para exibir corretamente a semivariância justificando a subdivisão da área para caracterizar melhor a variabilidade espacial.

Outro comportamento mostra um aumento da semivariância além do patamar seguido de um decréscimo da semivariância, apresentando flutuações abaixo do patamar, como se observa para o Corg (fig. 4-A), isto é a indicação de periodicidade nos dados e que possivelmente a presença das unidades de mapeamento estaria influenciando no semivariograma isotrópico da área total do Corg.

No último caso, um semivariograma com estrutura entrelaçada, com mais de um patamar e mais de um alcance, nesta situação têm-se diferentes escalas de variabilidade dos dados como se verifica para a CTC (fig.4-C) e S (fig.4-E) sendo necessário o ajuste de um modelo teórico de semivariograma para cada estrutura detectada o que torna a interpretação do semivariograma mais difícil (Vieira, 2000). Quando são analisadas as unidades de mapeamento, observa-se a estacionaridade dos semivariogramas, consequentemente satisfazendo a hipótese intrínseca.

Houve uma variação maior no ajuste dos semivariogramas das unidades de mapeamento em relação aos semivariogramas da área total (tab.3).

Na unidade de mapeamento GMve1 para os atributos químicos V (fig. 5-D) e Ca/Mg (fig. 5-F) houve a subestimação dos menores valores interpolados e superestimação dos maiores valores interpolados em um processo de krigagem ocorrendo o inverso com os outros semivariogramas (figs. 5-A,B,C,E,F,G e H) conforme tabela 3.

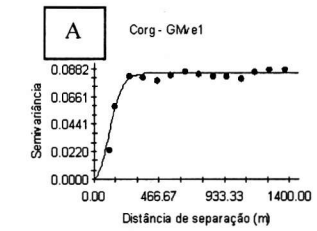
Já na unidade de mapeamento GMve2 apenas o semivariograma do Ca (fig. 6-G) apresentou comportamento semelhante a GMVe1 com os demais atributos químicos (figs. 6- A,B,C,D,F e H) exibindo comportamento inverso (tab.3). Os semivariogramas dos atributos Corg e CTC da unidade de mapeamento GXve (figs. 7- A e C) apresentaram a tendência de superestimação de valores pequenos e subestimação de valores maiores com os semivariogramas dos atributos restantes (figs. 7- B, D e E) apresentando comportamento inverso (tab. 3).

A unidade de mapeamento GMVe1 apresentou o melhor ajuste dos semivariogramas em relação as outras unidades de mapeamento e a área total (tab. 3).

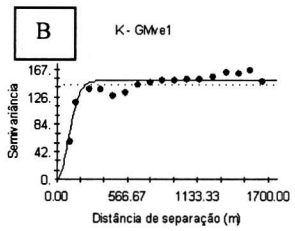
Tabela 3 – Validação cruzada para as unidades de mapeamento e para a área total.

Atributos	Local(1)	a(2)	b(3)	r2(4)
Ca	GMve1	0.58	0.95	0.55
	GMve2	-0.53	1.11	0.67
Mg	GMve1	0.29	0.91	0.46
	GMve2	0.72	0.72	0.33
K	Área total	-2.76	1.05	0.47
	GMve1	18.01	0.74	0.38
	GXve	-3.04	1.05	0.46
	GMve2	0.50	0.99	0.46
S	Área total	-0.44	1.03	0.67
	GMve1	0.88	0.94	0.46
	GXve	-0.06	1.00	0.45
	GMve2	0.04	1.00	0.59
V	Área total	-6.34	1.08	0.51
	GMve1	-3.37	1.04	0.72
	GXve	-3.10	1.04	0.47
	GMve2	4.83	0.94	0.64
CTC	Área total	-0.37	1.03	0.66
	GMve1	4.42	0.75	0.36
	GXve	2.40	0.83	0.40
	GMve2	0.45	0.96	0.47
Corg	Área total	-0.15	1.10	0.42
	GMve1	0.23	0.84	0.63
	GXve	0.18	0.86	0.31
	GMve2	0.41	0.69	0.31
Ca/Mg	GMve1	-0.14	1.04	0.87
	GMve2	0.34	0.86	0,53

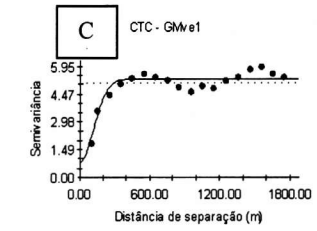
1 – Tipo de área analisada, 2 – Coeficiente linear da regressão, 3 – Coeficiente angular da regressão, 4 – Coeficiente de determinação da regressão, Ca= cálcio e Mg= magnésio, K= potássio, S= soma de bases, V= saturação por bases, CTC= capacidade de troca de cátions, Corg =Carbono orgânico, Ca/Mg= relação cálcio magnésio.



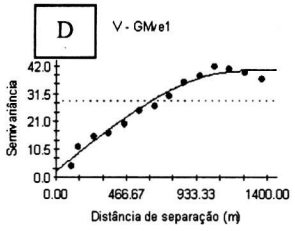
Gaussian model (Co = 0.00010; Co + C = 0.08430; Ao = 144.00; r2 = 0.954; RSS = 1.950E-04)



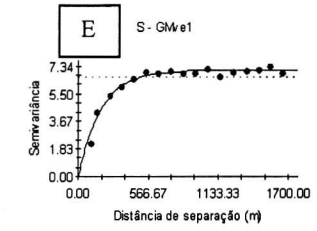
Gaussian model (Co = 0.10000; Co + C = 150.00000; Ao = 126.00; r2 = 0.805; RSS = 1974.)



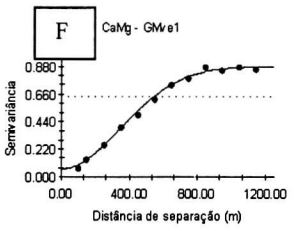
Gaussian model (Co = 0.84000; Co + C = 5.26200; Ao = 168.00; r2 = 0.845; RSS = 2.34)



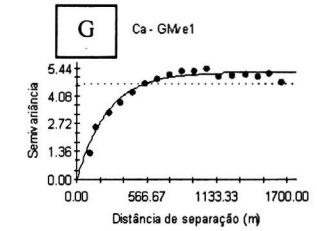
Spherical model (Co = 2.40000; Co + C = 40.11000; Ao = 1234.00; r2 = 0.974; RSS = 50.1)



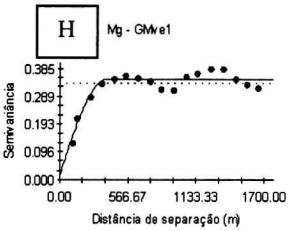
Exponential model (Co = 0.01000; Co + C = 7.05500; Ao = 181.00; r2 = 0.960; RSS = 1.16)



Gaussian model (Co = 0.06300; Co + C = 0.88200; Ao = 494.00; r2 = 0.996; RSS = 4.118E-03)

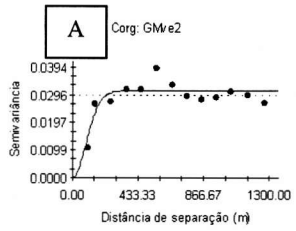


Exponential model (Co = 0.01000; Co + C = 5.23900; Ao = 248.00; r2 = 0.962; RSS = 0.833)

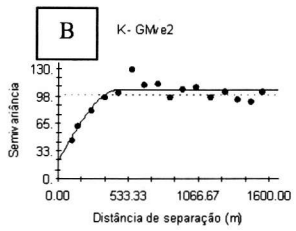


Spherical model (Co = 0.01600; Co + C = 0.34800; Ao = 384.00; r2 = 0.882; RSS = 7.790E-03)

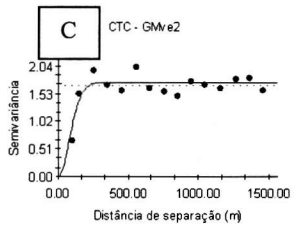
Figura 5. Semivariogramas experimentais e teóricos para a unidade de mapeamento GMVc1. Corg=Carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases, S= soma de bases, Ca/Mg= relação cálcio magnésio, Ca= cálcio e Mg= magnésio.



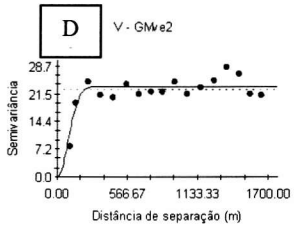
Gaussian model (Co = 0.000; Co + C = 0.031; Ao = 125.00; r2 = 0.705; RSS = 1.454E-04)



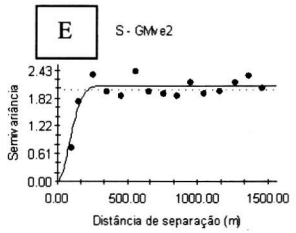
Spherical model (Co = 20.90000; Co + C = 105.30000; Ao = 459.00; r2 = 0.797; RSS = 1223.)



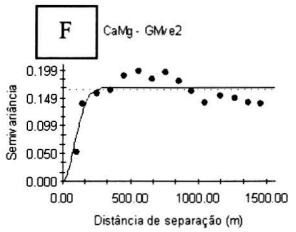
Gaussian model (Co = 0.00100; Co + C = 1.73100; Ao = 115.00; r2 = 0.714; RSS = 0.392)



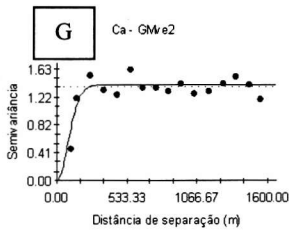
Gaussian model (Co = 0.01000; Co + C = 23.59000; Ao = 126.00; r2 = 0.717; RSS = 89.0)



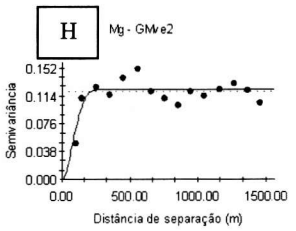
Gaussian model (Co = 0.00100; Co + C = 2.09200; Ao = 121.00; r2 = 0.747; RSS = 0.559)



Gaussian model (Co = 0.00010; Co + C = 0.16720; Ao = 127.00; r2 = 0.642; RSS = 6.308E-03)



Gaussian model (Co = 0.00100; Co + C = 1.39400; Ao = 121.00; r2 = 0.738; RSS = 0.263)



Gaussian model (Co = 0.00010; Co + C = 0.12320; Ao = 114.00; r2 = 0.636; RSS = 2.623E-03)

Figura 6. Semivariogramas experimentais e teóricos para a unidade de mapeamento GMVe2. Corg =Carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases, S= soma de bases, Ca/Mg= relação cálcio magnésio, Ca= cálcio e Mg= magnésio.

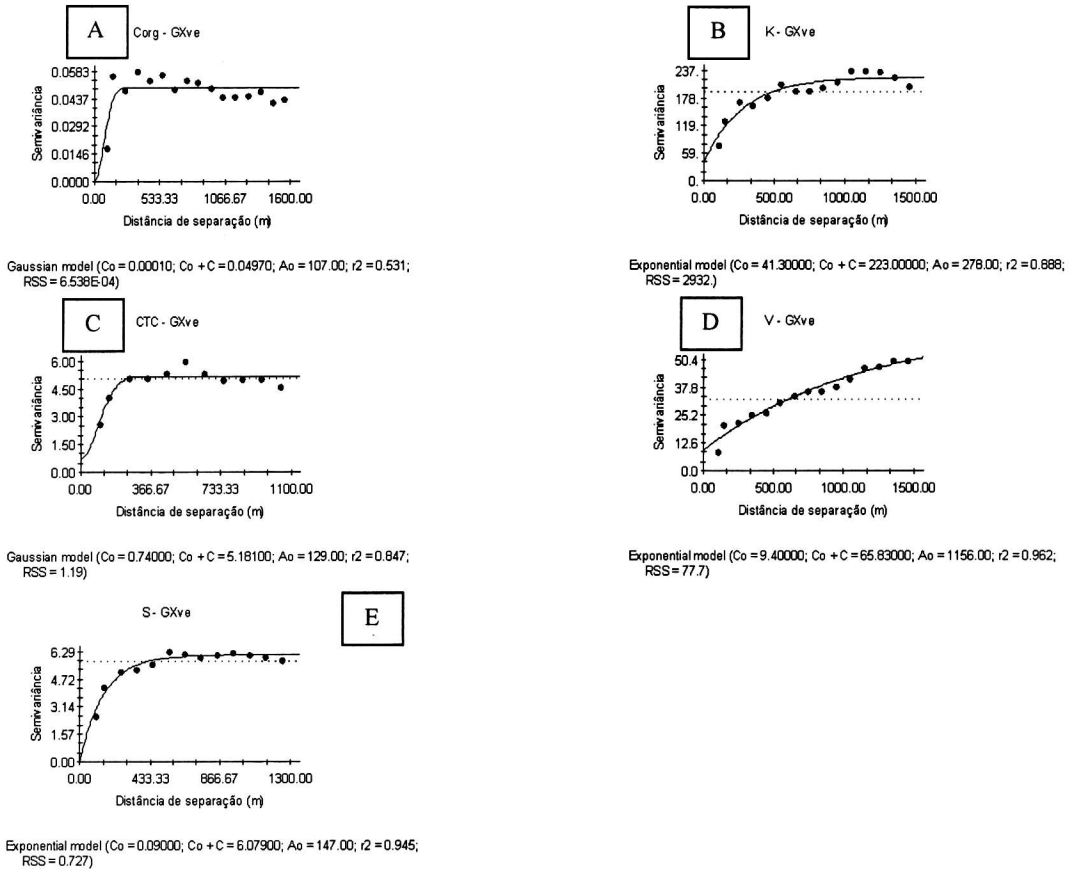


Figura 7. Semivariogramas experimentais e teóricos para a unidade de mapeamento GXVe. Corg =Carbono orgânico, K= potássio, CTC= capacidade de troca de cátions, V= saturação por bases, S= soma de bases.

Os modelos teóricos obtidos com maior frequência para as unidades de mapeamento foram o exponencial e o esférico (tab. 4) enquanto que para a área total foi o gaussiano (figs. 4- B,C,D e E). O modelo esférico tem sido o mais utilizado para descrever o comportamento dos atributos de solos (Trangmar *et al.* 1987, Cambardella *et al.* 1994). Houve grande variação do parâmetro alcance nos semivariogramas das unidades de mapeamento, na GMVe1 o alcance variou de 128 a 1234m, GMVe2 de 114 a 455m e GXVe de 107 a 1156m (tab. 4), sendo que os maiores alcances foram obtidos com ajustes relativamente fracos (grande efeito pepita). No entanto, para a relação Ca/Mg da unidade de mapeamento GMve1 o alcance parece ser mesmo superior a 490 metros, em contraste com os outros alcances obtidos para todos os atributos químicos restantes onde o efeito pepita se aproximou mais do patamar (tab.4). Sugere-se que na área estudada (área total) as futuras amostragens de solo que visam monitoramento da fertilidade do solo sejam feitas considerando as unidades de mapeamento que apresentaram dependência espacial classificada como forte de acordo com os maiores valores de IDE (tab. 4), utilizando distâncias maiores que 100m para assegurar a aleatoriadade das informações, diminuindo assim o custo com despesas em análises de laboratório para determinação dos atributos químicos.

Tabela 4. Parâmetros dos semivariogramas para as unidades de mapeamento e classificação do grau de dependência espacial.

Atributos	UM[1]	C_0[2]	$C+C_0$[3]	A_0[4]	Modelo	IDE[5]	Classificação[6]
Ca	GMve1	0.0100	5.239	248.0	Exponencial	99.81	Forte
	GMve2	0.0010	1.394	121.0	Gaussiano	100.0	Forte
Mg	GMve1	0.0160	0.348	384.0	Esférico	95.40	Forte
	GMve2	0.0001	0.123	114.0	Gaussiano	99.92	Forte
K	GMve1	0.1000	150.0	128.0	Gaussiano	99.93	Forte
	GXve	41.300	223.0	278.0	Exponencial	81.48	Forte
	GMve2	20.900	105.3	455.0	Esférico	80.15	Forte
S	GMve1	0.0100	7.055	181.0	Exponencial	99.86	Forte
	GXve	0.0900	6.079	147.0	Exponencial	98.52	Forte
	GMve2	0.0010	2.092	121.0	Gaussiano	99.95	Forte
V	GMve1	2.4000	40.11	1234	Esférico	94.02	Forte
	GXve	9.4000	65.83	1156	Exponencial	85.72	Forte
	GMve2	0.0100	23.59	126.0	Gaussiano	99.96	Forte
CTC	GMve1	0.8400	5.282	168.0	Gaussiano	84.10	Forte
	GXve	0.7400	5.181	129.0	Gaussiano	85.72	Forte
	GMve2	0.0010	1.731	115.0	Gaussiano	99.94	Forte
Corg	GMve1	0.0001	0.084	144.0	Gaussiano	99.88	Forte
	GXve	0.0001	0.050	107.0	Gaussiano	99.80	Forte
	GMve2	0.0000	0.031	125.0	Gaussiano	100.0	Forte
Ca/Mg	GMve1	0.0630	0.882	494.0	Gaussiano	99.94	Forte
	GMve2	0.0001	0.167	127.0	Gaussiano	92.86	Forte

1 - Unidade de mapeamento, 2 - Efeito pepita, 3 - Patamar, 4 – Alcance (m), 5 - Índice de dependência espacial (IDE), 6 - Classificação da dependência espacial (ZIMBACK, 2001). Ca= cálcio e Mg= magnésio, K= potássio, S= soma de bases, V= saturação por bases, CTC= capacidade de troca de cátions, Corg =Carbono orgânico, Ca/Mg= relação cálcio magnésio.

Agradecimentos. Ao CNPQ pelo apoio financeiro e aos organizadores da XI Escuela Latinoamericana de Física de Suelos pela oportunidade de participar deste evento.

REFERÊNCIAS

BLEVINS RL, SMITH MS, FRYE WW (1983) Changes in soil properties after 10 years of no-tillage and conservation tilled corn. SOIL TILL RES, 3:135-146.

CAMBARDELLA C.A, MOORMAN T.B,; NOVAK J.M, PARKIN T.B, KARLEN D.L, TURCO R.F, KONOPKA A.E. *(1994)* Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils. *SOIL SCI SOC AM J*, 58: 1501-1511.

CORÁ JE (1997) The potential for site-specific management of soil and yield variability induced by tillage. East Lansing, Michigan State University. 104p.

DALMOLIN RSD, KLAMT E, PEDRON FA, AZEVEDO AC (2004) Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. CIENC RURAL, 34: 1479-1486.

EMBRAPA. (1995) Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos. Brasília: SPI, 118p.

EMBRAPA (1997) Manual de Métodos de Análise de Solo. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 80p.

LEMOS RC (1996) Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3° ed., Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 84 p.

LIN H, WHEELER D, BELL J, WILDING L (2005) Assessment of soil spatial variability at multiple scales. ECOL MODEL, 182: 271-290.

MIRANDA LLD, VASCONCELOS ACM, VIEIRA SR, FRACASSO JV, GRECO CR (2007) Uso da geoestatística na avaliação da distribuição de Mahanarva fimbriolata em cana-de-açúcar. Brag, Campinas, 66: 449-455.

PINTO LFS, NETO LAJ, PAULETTO EA, NETO JAL (2004) Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado, 75-95 pp. *En*: GOMES AS, MAGALHÃES JRAM (eds). Arroz irrigado no sul do Brasil. Embrapa – Clima Temperado, Pelotas.

PEÑA R, RUBIANO Y, PEÑA A, CHAVES B (2009) Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia). Agron Colomb 27:111-120.

SETA AK, BLEVINS RL, FRYE WW, BARFIELD BJ (1993) Reducing soil erosion and agricultural chemical losses with conservation tillage. J Environ Qual 22: 661-665.

TEDESCO MJ, GIANELLO G, BISSANI CA (1995) Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 174p.

TRANGMAR B.B, YOST R.S, WADE M.K, UEHARA G, SUDJADI M *(1987)* Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land. *SCI SOC AM J* 51*:* 668-674.

VIEIRA SR (2000) Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo, 1-55 pp. *En:* Tópicos em Ciência do Solo. Soc Bra Ci Solo, Viçosa.

WARRICK A, NIELSEN D (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field, 319-344 pp. *En:* Hillel D (eds) Applications of soil physics. Academic Press, New York.

ZANETTE SV, SAMPAIO SC, SILVESTRE MG, BOAS MAV, OPAZO MAU, QUEIRO ZMF (2007) Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. Rev Bras enge agri e amb 11: 239-247.

ZIMBACK CRL (2001) Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP. 114p.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE PROPIEDADES DEL SUELO Y RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE FRIJOL (*Vigna unguiculata* L) BAJO MANEJO CONSERVACIONISTA.

Bravo, C[1]✉; J Cabrera[2]; M Carvallo[2]; Z Lozano[3] y F Ovalles[4]

[1]Universidad Simón Rodríguez, Instituto de estudios Científicos y Tecnológicos (IDECYT).
[2]Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía
[3]Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía
[4]Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA-Maracay).

✉: g12brmec@gmail.com

Palabras claves:

Variabilidad del suelo
Geoestadistica
Siembra directa
Cobertura
Sabana

RESUMEN

La evaluación de la variabilidad espacial de suelos en sitios experimentales es de gran importancia ya que la misma puede enmascarar el efecto de los tratamientos. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad espacial de atributos del suelo y rendimiento de frijol (Vigna unguiculata L) en parcelas experimentales manejadas con agricultura conservacionista usando geoestadística. El estudio se desarrolló en un Ultisol, clasificado como Typic Plinthustuls arenoso, localizado en la estación experimental "La Iguana" de la Universidad Simón Rodríguez, estado Guárico, Venezuela. Se realizó un muestreo sistemático en un área total de 6 ha, dividida en dos lotes, un lote en el cual se uso como cultivo de cobertura la Centrosema macrocarpum y otro con Brachiaria dictyoneura, obteniéndose 213 muestras de suelo por cultivo de cobertura, para determinar los contenidos de arena, limo y arcilla, resistencia a la penetración, pH, carbono orgánico total (COT), fósforo disponible (P) y rendimiento. La estructura de dependencia espacial de los atributos del suelo varió ligeramente entre tratamientos de coberturas, con rangos de 4.15 a 34.50 m de correlación espacial en la parcela con Centrosema macrocarpum y de 7.40 a 36.80 m en la parcela con Brachiaria dictyoneura, ajustándose en ambos casos a un modelo exponencial con un alto nivel de dependencia espacial (< 25%). Los mapas contornos presentaron ciertas similitudes entre algunas propiedades químicas (pH y COT) y el rendimiento del frijol (Vigna unguiculata) en la parcela con cobertura de Centrosema macrocarpum, mientras que en la parcela con Brachiaria dictyoneura el rendimiento del cultivo se relacionó con las propiedades físicas (resistencia a la penetración y humedad del suelo) en algunas zonas, lo cual confirma que el rendimiento depende de la influencia de muchos factores.

GEOSTATISTICAL ANALYSIS OF SOIL PROPERTIES AND COWPEA YIELD (*Vigna unguiculata* L) UNDER CONSERVATION MANAGEMENT

Keywords:

Soil variability
Geostatistic
Direct drilling
Covers
Savanna

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 108-120

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The evaluation of the spatial variability of soils at test sites is of great importance since it may mask the effect of treatments. The aim of this study was to analyze the spatial variability of soil attributes and yield of cowpea (Vigna unguiculata L) (Vigna unguiculata L) in experimental plots managed with conservation agriculture using geostatistics. The study was developed in an Ultisol, classified as Typic Plinthustuls sand, at the experimental station La Iguana at the University Simon Rodriguez, Guarico State, Venezuela. Systematic sampling was performed in a total area of 6 ha, divided into two lots, one lot which was used as a cover crop of Centrosema macrocarpum and one with Brachiaria dictyoneura, collecting 213 samples per each cover crop treatment in order to determine the contents of sand, silt and clay, penetration resistance, pH, total organic carbon (TOC), phosphorous (P) and yield. The semivariograms of soil attributes varied slightly between covers treatments, ranging from 4.15 to 34.50 m of spatial correlation in the plot with Centrosema macrocarpum, and 7.40 to 36.80 m to Brachiaria dictyoneura, fitting in both cases to an exponential model with a strongly degree of spatial dependence (<25%). The contour maps showed some similarities between some chemical properties (pH and TOC) and the cowpea yield (Vigna unguiculata) in the plot with Centrosema macrocarpum, while in the plot with Brachiaria dictyoneura crop yield was related to the properties physical (penetration resistance and soil moisture) in some areas, confirming that yield depend on the influence of many factors.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

El proceso de producción agrícola constituye un sistema de múltiples variables en continua interacción espacio-temporal, no obstante, la variabilidad espacial de las propiedades del suelo dentro de un campo es el resultado de la interacción de una serie de procesos geológicos, pedológicos y de manejo que puede tener una gran influencia en el rendimiento de los cultivos. En este sentido se ha señalado que el paso inicial en cualquier ensayo es la adecuada caracterización del sitio experimental, debido a que a este nivel se genera información que permite establecer las relaciones que existen entre los tratamientos aplicados y las respuestas de los usos. A nivel de pequeñas parcelas experimentales, la distribución espacial de parámetros de suelo puede representar una alta fuente de variabilidad, lo cual es de gran importancia debido a que la misma puede influir directamente en los resultados experimentales. Diversos autores (Cassel *et al.* 2000, Lozano *et al.* 2004, Bravo 2005) han demostrado que aun a nivel de pequeñas parcelas experimentales, la variabilidad puede ser significativa.

Tradicionalmente el diseño experimental en el campo de la agronomía se basa en el diseño de bloques con tratamientos distribuidos al azar con el propósito de reducir el error experimental (Cochran y Cox 1992), al permitir el uso de métodos tradicionales de análisis estadísticos como el análisis de varianza, regresión, entre otros (Fagroud y VanMeirvenne 2002). Esta consideración implica que la variabilidad espacial es aleatoria dentro de los bloques, aspecto que no siempre se cumple (Fagroud y VanMeirvenne 2002, Johnson *et al.* 2002). Como método alternativo para cuantificar la heterogeneidad se propone la aplicación de la geoestadística, la cual es usada para analizar la estructura de la variabilidad espacial de variables regionalizadas y para optimizar su interpolación (Fagroud y VanMeirvenne 2002).

A nivel mundial existen abundantes trabajos relacionados con el estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo bajo diferentes ambientes edafo-climáticos y tipos de manejo, los cuales se apoyan en el uso de la geoestadística para explicar las relaciones causa-efecto. Gran parte de las investigaciones han analizado la variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos para determinar la respuesta del suelo a usos específicos bajo determinadas prácticas de manejo y establecer su relación con el rendimiento de distintos cultivos (Cahn *et al.* 1994, Ovalles y Rey 1994, Frogbrook *et al.* 2002, Bravo *et al.* 2006, Timm *et al.* 2010). Estos estudios demuestran que no existe un patrón único de distribución espacial de suelo y la misma puede ser influenciada por el manejo agrícola y la escala de muestreo a que se esté trabajando. Sobre estas premisas, el objetivo de esta investigación consistió en caracterizar la variabilidad espacial de algunos atributos físicos y químicos del suelo y su relación con el rendimiento del frijol en parcelas experimentales manejas con siembra directa, distintos cultivos de coberturas y tratamientos de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental "La Iguana" de la Universidad Simón Rodríguez, localizada en el estado Guárico, Venezuela con 8° 25'47" Latitud Norte y 65° 25' 03" Longitud oeste (Bravo *et al.* 2001). El clima de la zona es Tropical Isotérmico, estacional con un período lluvioso (mayo-noviembre) y otro seco (diciembre-abril). La precipitación anual es de 1342 mm y la temperatura promedio anual tiene una media de 27.9°C (Ponce *et al.* 1994). El suelo es un Typic Plinthustuls arenoso (USDA 2006), de baja a moderada fertilidad natural, con pH de 5.2 (Bravo *et al.* 2004). El área experimental de 6 ha, fue dividida en dos lotes de 3 ha, las cuales se cultivaron con una rotación maíz-frijol bajo siembra directa con cultivos de cobertura, una con leguminosa (*Centrosema macrocarpum*) y otra con gramínea (*Brachiaria dictyoneura*) desde el año 2002. El muestreo se realizó en el período seco del 2008, cuando el área estaba cultivada con frijol (*Vigna unguiculata* L), cuyo manejo agronómico incluyó un pase de rotativa seguido de la aplicación de herbicida y luego la siembra y fertilización (20 kg N ha^{-1}, 90 kg P ha^{-1} de Fósforo y 60 kg K ha^{-1}). Finalmente la cosecha se realizó de forma manual a los setenta días después de la siembra.

El muestreo en cada parcela experimental fue realizado en una malla con una separación de 20 x 7 m, totalizando 213 puntos de muestreo en la capa superficial del suelo hasta 0.15 m de profundidad. En cada punto de la retícula para las variables de suelo se seleccionó un área de muestreo de 2 x 2 (4 m^2), mientras que para el rendimiento se estableció un área de 1.5 m de ancho x 2 m de largo (3 m^2). Las muestras de suelo fueron secadas y pasadas por un tamiz de 2 mm antes de realizar la determinación de los parámetros físicos y químicos. La textura (% arena, % de limo, % arcilla) fue determinada por el método del hidrómetro (Gee y Bauder 1986). La resistencia a la penetración del suelo (RP) se midió con un penetrómetro de impacto de punta Cónica (Nacci y Pla 1991). El pH del suelo fue medido en una relación suelo-agua- de 10 g de suelo y 25 ml de agua destilada. El contenido de fósforo disponible se determinó siguiendo el método propuesto por Olsen *et al.* (1954), extraído con la solución de Olsen y detectado por el método colorimétrico del molibdato-

ácido medido en un espectrómetro a una longitud de onda de 720 nm. El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black (Nelson y Sommer 1982). Se realizó un análisis de la variabilidad espacial de cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento del cultivo utilizando herramientas geoestadísticas para definición y ajuste de semivariograma de acuerdo con Isaak y Srivastava (1989) (Ec. 1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{n} Z(x_i) - Z(x_i + h)^2 \qquad (1)$$

Donde, γ (h) es la varianza estimada; N (h) representa el número de pares de valores medidos Z (x_i), Z (xi+h) separados por un vector (h).

De esta manera es posible realizar el ajuste de un modelo matemático que represente la variabilidad espacial de los parámetros estudiados. Los parámetros de ajustes son: C_o -efecto pepita; C_1-Varianza estructural y a – Alcance. El efecto pepita (C_o) representa la variabilidad no detectada en el muestreo. La varianza estructural (C_o +C) indica hasta qué punto la variabilidad de los datos se incrementa hasta que no haya más semejanza entre la variabilidad de las muestras y, el alcance (a) determina hasta que distancia las muestras tienen dependencia espacial. El ajuste del semivariograma fue realizado por el método descrito por Isaak y Srivastava (1989) basado en la validación cruzada para lo cual fue usado el programa GS^+ versión 5.1 (Gamma Design Software 1998). Las variables fueron estimadas por medio del *krigeado* ordinario (Ec. 2), utilizando el programa SURFER v.8.0 (2001).

$$\overline{Z}(xo) = \sum_{i=1}^{n} \lambda i.Z(xi) \qquad (2)$$

Donde n = número de muestras vecinas a Z(xo); λi = es el peso asignado a cada dato Z(xi); $\overline{Z}$(xo) = representa el valor estimado del atributo Z(xo) y Z(xi) = es la muestra vecina a Z(xo).

Para definir las distintas clases de dependencia espacial de las variables se usó la metodología propuesta por Cambardella *et al.* (1994) en la cual la varianza de la pepita es expresada como un porcentaje de la semivarianza total (C/(C+Co))*100. En este sentido si la relación es ≤ 25% la variable se considera con elevada dependencia espacial (E), entre 25-75% espacialmente moderada (M) y > de 75% con débil dependencia espacial (D).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis exploratorio de datos

Los estadísticos descriptivos de los atributos de suelo y el rendimiento de frijol bajo dos tratamientos de cobertura se muestran en la tabla 1. Se aprecia para la mayoría de las variables una buena correspondencia entre el valor de la media y la mediana presentando valores cercanos a la unidad, lo que refleja poblaciones con distribuciones simétricas, con normalidad de los datos y una mayor optimización para realizar el análisis geoestadístico, lo que fue corroborado mediante los coeficientes de asimetría y curtosis, con valores entre -1 a 1, que no representan problema para la obtención del modelo (Webster y Oliver 2001).

Los valores promedios de los componentes texturales para ambos tratamientos de cobertura permitieron clasificar el suelo como arenoso-Franco (aF), con una mayor proporción del % arena (81.61 para CM y 87.7% en BD) con respecto al limo y a la arcilla, lo cual se corresponde con lo descrito en estudios anteriores para la zona (Lozano *et al.* 2004). Como ha sido señalado por algunos investigadores, suelos de textura gruesa presentan algunas características especiales como baja superficie especifica, generalmente permeables al aire, agua y raíces, pero normalmente tienen limitaciones como baja capacidad de retener agua aprovechable para las plantas y baja capacidad de retención y suministro de nutrientes (Bravo *et al.* 2004, Casanova 2005).

De acuerdo con el grado de variabilidad de cada propiedad, definido en términos del coeficiente de variación (CV) (Wilding 1985), se pudo observar que para ambas coberturas los contenidos de arcilla y de limo fueron más dispersos con respecto al porcentaje de arena con CVs de 8.79 % para CM y de 1.8 en BD respectivamente (Tabla 1). Las medidas de dispersión del contenido de arena indican que la mayoría de los datos se concentran alrededor de su valor medio y por tanto la probabilidad de encontrar un valor cercano a éste aumenta (Webster y Oliver 2001), reflejando la naturaleza de estos suelos y confiriéndole una relativa homogeneidad (CV < 15%), mientras que los porcentajes de arcilla y limo exhibieron rangos de una moderada variabilidad para BD (15% < CV% ≤ 35%) a una alta variabilidad (CV ≥ 35%) en CM. Similares resultados han sido señalados por Timm *et al.* (2006) y Timm *et al.* (2010) en suelos con alto contenido de arena.

La resistencia a la penetración presentó un valor promedio de 1.16 MPa en la capa superficial y de 0.86 MPa en la subsuperficial, sugiriendo bajos niveles de compactación y ninguna limitación para el crecimiento de los cultivos (Bravo *et al.* 2004). Las medidas de dispersión de la Resistencia a la penetración (RP) mostraron una alta variabilidad para ambas capas y tipos de cobertura (CV ≥ 35%).

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de atributos de suelo y rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata*) en la Parcelas experimentales. (n=213)

Atributos del suelo	Media	mediana	M:m	CV (%)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Asimetría	Curtosis
Centrosema macrocarpum (CM)								
Arena (%)	81.61	83.00	0.98	8.79	57.50	89.50	-1.11	0.70
Limo (%)	9.64	8.50	1.13	45.6	2.50	26.50	0.96	0.99
Arcilla (%)	8.75	7.50	1.17	55.5	1.50	26.00	1.23	1.19
RP (MPa, 0-5 cm)	1.16	0.87	1.33	45.9	0.10	1.74	-0.32	-0.64
RP (MPa, 5-15 cm)	0.86	0.87	0.99	38.7	0.10	1.30	-0.11	-0.96
COT (%)	0.97	0.89	1.09	59.2	0.2	4.06	1.36	3.22
pH	5.28	5.21	1.01	7.48	4.26	6.67	0.94	1.61
P ($mg\,kg^{-1}$)	1.74	1.46	1.19	42.8	0.83	4.09	1.15	0.59
Rendimiento ($Mg\,ha^{-1}$)	1.07	1.05	1.02	48.6	0.00	2.41	0.40	-0.04
Brachiaria dictyoneura (BD)								
Arena (%)	87.74	88.00	1.00	1.76	81.5	89.5	-1.47	2.03
Limo (%)	7.61	7.50	1.02	26.9	2.50	13.00	0.72	0.72
Arcilla (%)	4.95	5.00	0.99	26.3	1.50	8.50	0.71	0.93
RP (MPa, 0-5 cm)	0.80	0.87	1.26	41.9	0.1	2.61	0.38	0.01
RP (MPa, 5-15 cm)	0.80	0.87	0.92	38.8	0.1	1.30	0.20	-1.04
COT (%)	1.31	1.23	1.07	41.9	0.13	2.86	0.35	-0.24
pH	5.72	5.70	1.00	6.82	4.80	6.78	0.23	-0.29
P ($mg\,kg^{-1}$)	1.98	1.73	1.15	37.4	0.75	4.06	0.86	-0.06
Rendimiento ($Mg\,ha^{-1}$)	0.57	0.47	1.21	67.2	0.0	2.06	1.10	1.00

RP: Resistencia a la Penetración; COT: Carbono Orgánico Total; P: Fósforo disponible

Las diferencias encontradas en RP se corresponden a los mayores valores medios de humedad (8.19 %) (Datos no mostrados) en el rango de 5-15cm de profundidad, sugiriendo que un mayor contenido de humedad representa una menor resistencia a la penetración, tal como ha sido descrito por Bravo *et al.* (2004).

En el caso de algunas variables químicas evaluadas (COT, P disponible) y el rendimiento de frijol mostraron una alta variabilidad (CV ≥ 35%), mientras que el pH presentó una baja variabilidad (CV < 15%) para ambas coberturas. El pH del suelo presentó un valor medio de 5.3 para CM y de 5.7 para BD clasificándolos como medianamente ácidos (Lozano 2004). El contenido de carbono orgánico (% COT) presentó valores promedios que oscilaron de 1.0 a 1.3 para CM y BD respectivamente, en ambos casos, categorizados como bajos para esta clase textural (suelo arenoso-Franco) y con un alto coeficiente de variación (59% en CM y 42% BD). Estos suelos vienen siendo manejados con una agricultura conservacionista (siembra directa) que implica el establecimiento de cultivos sobre coberturas de pasto y leguminosa (Bravo *et al* 2008). Por tanto, la presencia de residuos en superficie en ambas parcelas hace que su evolución sea muy heterogénea, debido a los cambios espaciales en los componentes granulométricos, en especial con los contenidos de arena y arcilla y la humedad del suelo, ejerciendo un efecto diferenciador que se manifiesta en una incorporación desigual de la materia orgánica en el suelo, con mayor evidencia en la parcela con *Centrosema macrocarpum*. Similares resultados han sido reportados por Martínez *et al.* (2010) en un ensayo a largo plazo (más de 25 años) bajo siembra directa en condiciones de suelo mediterráneo.

En cuanto al contenido medio de fósforo estuvo muy por debajo del valor crítico de 10 mg kg^{-1} (Solis y Torrent 1989), con un valor promedio de 1.74 mg kg^{-1} en CM y de 1.92 mg kg^{-1} categorizados como niveles muy bajos. La distribución de los datos de esta variable pudiera estar influenciada por la forma como históricamente se manejó la fertilización, la cual como se indicó en la metodología consistió en subparcelas de fertilización, basadas principalmente en el aporte o no de este nutriente mediante distintas fuentes de fertilización fosfórica, que pudiera estar generando un efecto diferenciador en cuanto a la disponibilidad de este elemento.

Finalmente, el rendimiento promedio del frijol (*Vigna unguiculata*) exhibió valores de 0.57 Mg ha^{-1} en *Brachiaria dictyoneura* y de 1.07 Mg ha^{-1} en *Centrosema macrocarpum* con un alto coeficiente de variación en ambos tratamientos de cobertura (≥ 35) y con intervalos con un valor mínimo de 0.1 Mg ha^{-1} y un máximo de 2.06 Mg ha^{-1}. La diferencia en el valor promedio de rendimiento de frijol entre las distintas coberturas, pudiera estar asociada a la mayor competencia por nutrientes, luz, entre otros factores, durante el desarrollo del cultivo en *Brachiaria*

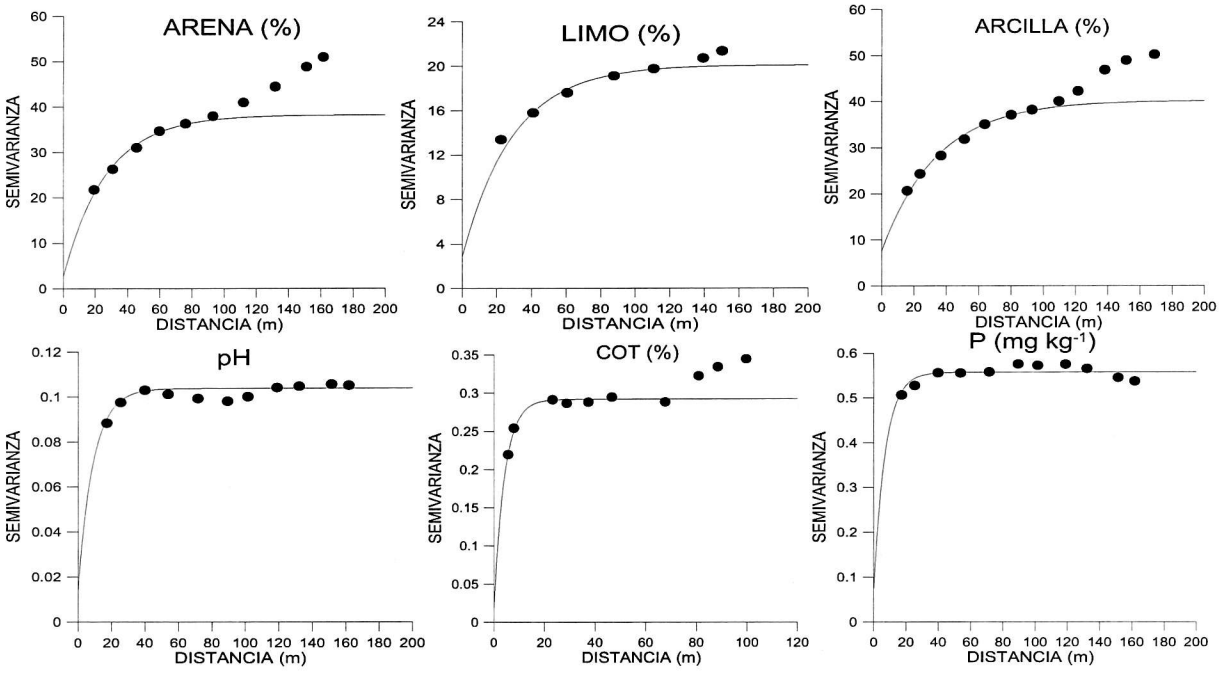
dictyoneura en comparación con la cobertura de *Centrosema macrocarpum*. Debido a los altos valores de los coeficientes de asimetría y curtosis fue necesario aplicar la metodología de Tukey (1977) para detectar valores atípicos que estuviesen incidiendo en la alta variación del rendimiento. En este sentido el CV disminuyó a 48.5%, se redujo el valor máximo de los intervalos de variación y mejoró notablemente los coeficientes de asimetría y Curtosis. El rendimiento de los cultivo puede ser altamente variables dentro de un lote como resultado de complejas interacciones entre topografía, atributos del suelo y prácticas de manejo (Bravo 2005, Castrignano *et al.* 2002), sin embargo a pesar de que estas parcelas vienen siendo manejadas desde hace varios años con siembra directa, que contempla el uso de coberturas, se evidencia que la estructura de variación espacial de esta variable pudiera estar influenciada por otros atributos de suelo no evaluados en este trabajo.

Correlaciones entre parámetros de suelo y rendimiento de frijol

En general, no se consiguió un grado de asociación entre las variables evaluadas y el rendimiento del cultivo, con excepción del contenido de arena con un r:-0.46 el cual fue negativamente relacionado ($p \leq 0.05$) con el rendimiento y el contenido de limo con un grado de correlación positiva r: 0.26 ($p \leq 0.01$), sugiriendo que zonas con mayor contenido de arena están asociadas con áreas de menor rendimiento, mientras que zonas con mayor contenido de limo poseen rendimientos más altos. Algunos estudios muestran asociación entre las propiedades del suelo y el rendimiento del cultivo (Daniels *et al.* 2001, Johnson *et al.* 2002, Bravo 2005), mientras que otros señalan relaciones débiles o ninguna relación (Frogbrook *et al.* 2002). Tal situación obedece a que la variación del rendimiento del cultivo depende de la interacción de un conjunto de factores (suelos, topográficos, climáticos, entre otros) que en algunos casos pudiera estar ejerciendo una mayor influencia que las variables consideradas en este trabajo. Los resultados sugieren que una parte de la variabilidad de los rendimientos de frijol pudiera ser explicada por las fracciones granulométricas (arena y limo) y su variación con el componente topográfico (datos no mostrados), lo cual es consistente con los resultados obtenidos por otros investigadores (Bravo 2005, Cox *et al.* 2006).

Semivariografía de las propiedades del suelo (físicas, químicas) y el rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata*) en parcelas experimentales

Las Figuras 1 y 2 presentan los semivariogramas que describen la estructura espacial de los atributos de suelo y del rendimiento del cultivo, mientras que los parámetros del modelo geoestadístico se muestran en la tabla 3.



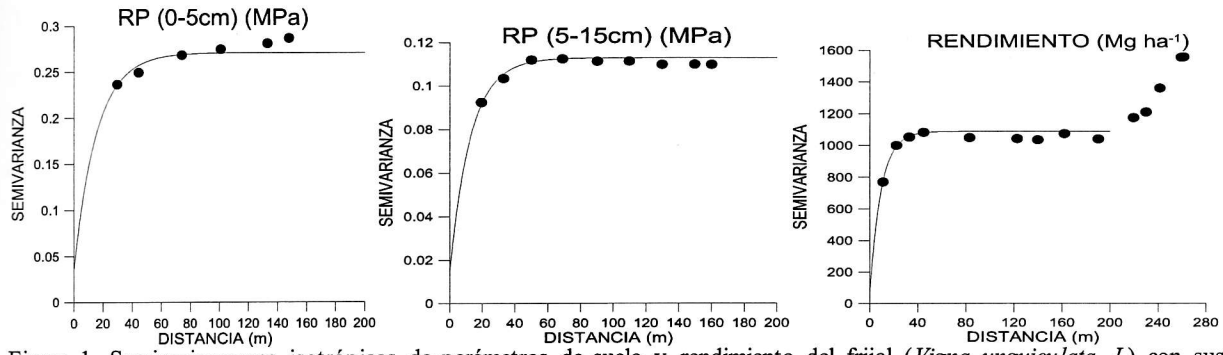


Figura 1. Semivariogramas isotrópicos de parámetros de suelo y rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata, L*) con sus respectivos modelos ajustados en la parcela con *Centrosema macrcarpum*.

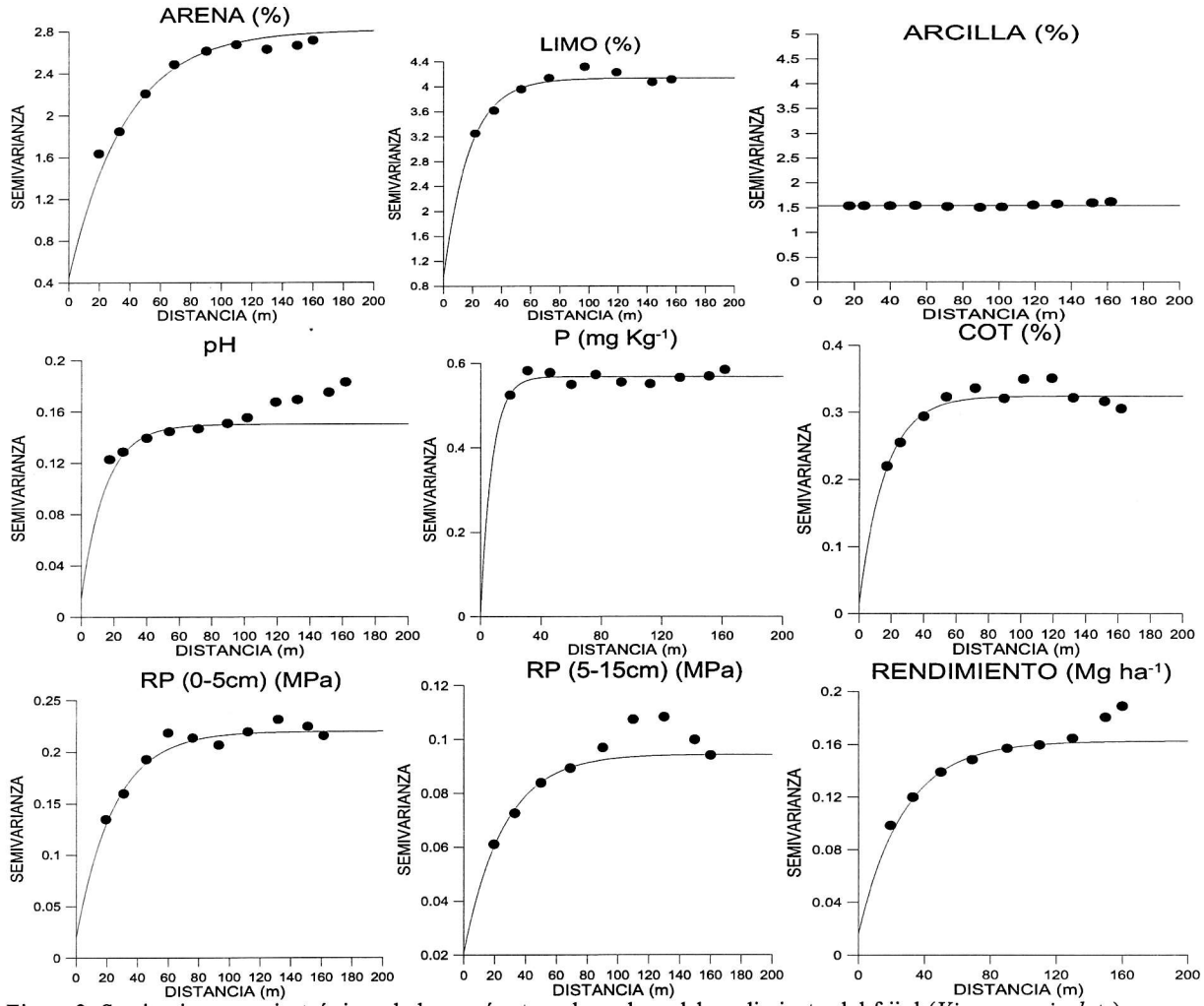


Figura 2. Semivariogramas isotrópicos de los parámetros de suelo y del rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata*) con sus respectivos modelos ajustados en parcela con cobertura de *Bachiaria dictyoneura.*

Se puede apreciar que los atributos estudiados presentaron carácter transicional, con incrementos en los valores de semivarianza con la distancia hasta alcanzar un máximo (Umbral), donde la semivarianza se hace estable, ocurriendo una transición de una condición de dependencia espacial a otra donde esta desaparece, lo cual indica la ocurrencia de correlación espacial entre observaciones (Rey y Ovalles 2001).

En ambos tipos de cobertura, los parámetros evaluados se ajustaron a un modelo exponencial (Tabla 3). En las parcelas experimentales, el efecto pepita (Co) obtenido para las variables granulométricas (% arena, % limo; % arcilla), estuvo

muy por debajo de la varianza total con porcentajes de 7%, 16% y 24% para arena, limo y arcilla bajo *Centrosema macrocarpum* (CM), y de 2.3 y 16% para limo y arena en *Brachiaria dictyoneura* (BD).

Tales resultados sugieren que gran parte de la variabilidad mostrada en los datos, pudo ser descrita por el esquema de muestreo utilizado, lo cual se corroboró al comparar el bajo valor obtenido en el error experimental (efecto pepita) con el valor de la meseta, tal como ha sido señalado por Avendaño *et al.* (2004) y Bravo (2005). El alcance o rango de dependencia espacial se obtuvo a los 27 m (% arena), 29 m (% limo) y 35 m (% arcilla) para CM, mientras que en BD osciló de 18 m (limo) a 37 m (Arena), con una elevada dependencia espacial (NDE < 25%) en ambas coberturas, según Cambardella *et al.* (1994).

Cabe destacar que en el tratamiento con BD, para el contenido de arcilla se encontró, con un efecto *pepita* puro (Figura 2), indicando que los datos de esta variable muestran un distribución espacialmente aleatoria para la escala de muestreo seleccionada, por tanto, como método de interpolación se uso la inversa de la distancia para la construcción del mapa contorno (Figura 4), tal como ha sido sugerido por Timm *et al.* (2010).

Los semivariogramas de la resistencia a la penetración (RP) (Figuras 1 y 2) mostraron alcances que oscilaron de 12 a 16 m para CM y de 25 m para BD, con NDE entre 2 y 22 %, sugiriendo una elevada dependencia a distancias muy cortas.

Las variables químicas como pH, carbono orgánico total (COT) y disponibilidad de fósforo (P) en ambos tipos de coberturas, presentaron una fuerte dependencia espacial con valores menores de 25% y con semivariogramas mostrando un carácter anidado, lo cual sugiere que la variabilidad es dependiente de la escala y probablemente refleje el efecto de la variabilidad de cada subparcela de fertilización. Variables con alta dependencia espacial son mas influenciadas por atributos intrínsecos del suelo (Cambardella *et al.* 1994). Con base en ello, la posibilidad para incorporar estructura de correlación espacial en puntos vecinos para predecir valores en sitios no muestreados permite usar el método de *krigging* como un estimador preciso de las estimas (Nielsen y Wendroth 2003, Timm *et al.* 2010).

Tabla 3. Parámetros de los modelos ajustados a los semivariogramas isotrópicos de los atributos de suelo y cultivo del frijol (*Vigna unguiculata*) en la parcelas experimentales.

Centrosema macrocarpum (CM).					
Atributo de suelo	Modelo	Co	Co+C	a(m)	NDE
Arena (%)	E	2.60	35.72	26.78	7.14
Limo (%)	E	2.91	17.21	29.44	16.9
Arcilla (%)	E	7.70	32.53	34.50	23.7
RP (0-5cm) (MPa)	E	0.036	0.24	15.67	15.1
RP (5-15cm) (MPa)	E	0.0143	0.098	12.80	14.6
pH	E	0.014	0.089	9.06	16.1
COT (%)	E	0.015	0.277	4.15	5.5
P ($mg\,kg^{-1}$)	E	0.074	0.48	7.12	15.2
Rend ($Mg\,ha^{-1}$)	E	76.32	1012.4	9.41	7.5
Brachiaria dictyoneura (BD)					
Variable	Modelo	C_o	C_o+C	a(m)	NDE
Arena (%)	E	0.5	2.8	36.8	16.0
Limo (%)	E	0.9	41.4	17.6	2.3
Arcilla (%)	-	1.5	1.5	-	100
RP (0-5cm) (MPa)	E	0.02	0.2	24.5	9.1
RP (5-15cm) (MPa	E	0.02	0.09	25.6	22.0
pH	E	0.01	0.2	14.6	9.3
COT (%)	E	0.01	0.3	16.2	4. 3
P ($mg\,kg^{-1}$)	E	0.01	0.6	7.4	1.67
Rend. ($mg\,ha^{-1}$)	E	0.01	0.16	27.5	6.3

C_o= Varianza Aleatoria; C_o+C = Umbral o Sill; a= alcance o rango; NDE= Nivel de Dependencia Espacial. COT= Carbono Orgánico total; P= Fósforo disponible; RP=Resistencia a la penetración

Como ha sido señalado, el alcance indica la distancia a partir de la cual las muestras son espacialmente independientes unas de otras y representan el tamaño de la variable (Ovalles 1991). El rango de dependencia espacial o alcance para CM fluctuó de 4 m (COT), 7m (P) y 9 m (pH) mientras que en BD varió entre 7 m (P), 15 m (pH) y 16 m (COT), coincidiendo algunas distancias con el ancho de las subparcelas o tratamientos de fertilización, lo cual pudiera influenciar los valores de algunos nutrientes. Igualmente se observó un claro componente *pepita* lo que sugiere la presencia de una microvariabilidad no explicada por la distancia de muestreo utilizada (Arrouays *et al.* 2000, Lozano *et al.* 2004).

El rendimiento de frijol (Figuras 1 y 2) y los parámetros de los modelos ajustados (Tabla 3), mostraron comportamiento similar al resto de las variables, donde el modelo que mejor se ajustó a los datos fue el exponencial, con alcances de 9,4 m en CM y de 28 m para BD. En ambos casos con un nivel de dependencia alrededor de 7 %, el cual representa un alto grado de dependencia espacial (Cambardella *et al.* 1994).

Para la parcela con *Centrosema macrocarpum* la estructura espacial del rendimiento de frijol presentó una buena similitud con la estructura de las propiedades químicas evaluadas tales como: carbono orgánico total, pH y el contenido de fósforo (Figura 1). El segundo incremento en la varianza a 200 m indica la presencia de uno o más factores no identificados que generan esta tendencia (Cassel *et al.* 2000)

Mapas de las propiedades del suelo (físicas y químicas) y del rendimiento de frijol (*Vigna Unguiculata L*) para las dos parcelas de coberturas (*Centrosema macrocarpum* y *Brachiaria dictyoneura*)

Para realizar las estimaciones de los distintos atributos del suelo en las parcelas bajo estudio, se aplicó la interpolación por *Krigging* ordinario considerando un comportamiento isotrópico. Los mapas de variabilidad espacial de las propiedades del suelo y rendimiento del frijol bajo dos tratamientos de cobertura se muestran en las figuras 3 y 4. En el caso de la parcela bajo *Centrosema macrocarpum* (CM) (Figura 3), los mapas de los componentes granulométricos muestran que los valores más altos del contenido de arena se presentan hacia la zona sur y los menores en la parte central, mientras que en la parcela con *Brachiaria dictyoneura* (BD) (Figura 4), los componentes granulométricos, en especial la arena, exhibieron un comportamiento espacial más definido donde gran parte de la superficie estuvo representada por valores superiores 87%, asociado con las cotas más bajas con algunos parches en los extremos norte y sur con valores alrededor del 89%. En ambos tipos de coberturas se observó un comportamiento inverso del contenido de arena con la arcilla y limo y viceversa. Dichas relaciones fueron confirmadas mediante las correlaciones de las estimas, arrojando valores de r=-0.73 para CM y de r=-0.89 entre el contenido de arena y arcilla (datos no mostrados). La pérdida de arcilla generalmente se produce en la parte más alta y se depositan en las zonas bajas, lo que pudiera afectar el contenido de humedad, la RP, el contenido COT y otros atributos de relevancia (Rey y Ovalles 2001, Lozano *et al.* 2004). Si bien, el suelo es de textura gruesa (areno-Francoso), la estructura de variación del contenido de arcilla en estas condiciones puede favorecer en algunas áreas, una mejor disponibilidad de nutrientes y mayor almacenamiento de humedad, lo cual pudiera incidir en la variación del rendimiento del cultivo. Esta afirmación se hace más evidente al observar el mapa de la distribución espacial del contenido de arcilla en la parcela de *Centrosema* (Figura 3) donde se muestran agregados o parches con valores de 14 a 16% de dicha variable hacia la parte centro-norte.

Los mapas de pH del suelo (Figura 3 y 4) muestran valores que oscilan de 4.7 a 5.9 para CM, mientras que para BD variaron de 4.6 a 6.4 en ambos casos clasificados de mediana a ligeramente ácidos. Gran parte de la superficie de la parcela en CM registró valores de 5.4 con pequeños agregados cuyos valores de pH estuvieron por encima de 5.5 hasta alcanzar el valor máximo de 5.6 no obstante en BD gran parte de la superficie estuvo representada por valores cercanos a pH 6. Las variaciones pudieran ser atribuibles a la descomposición de los residuos aplicados en superficie, a la formación de ácidos orgánicos o a la nitrificación del $NH4^+$ proveniente del fertilizante aplicado al cultivo, tal como sugieren Gong *et al.* (2009).

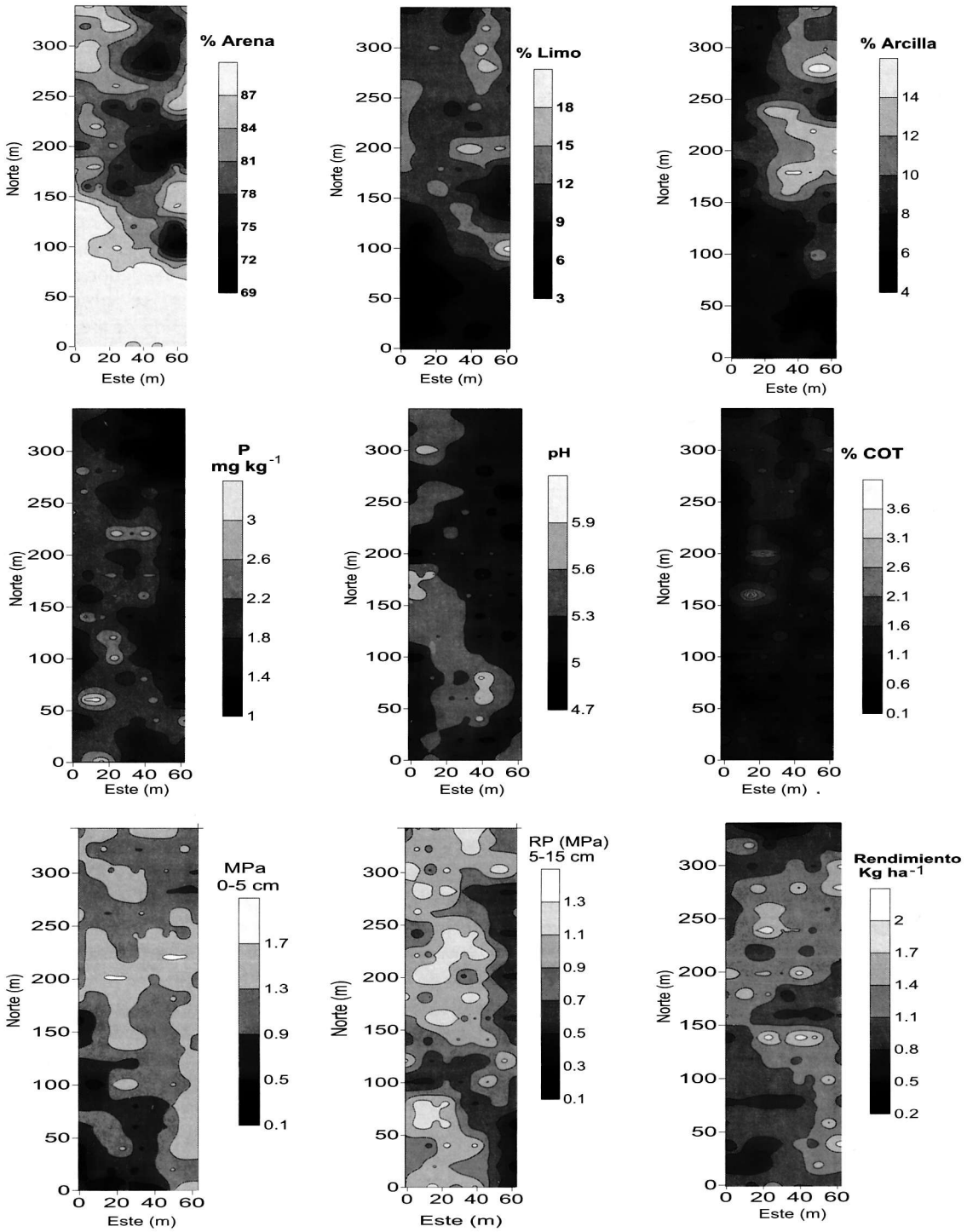


Figura 3. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades del suelo estudiadas (Textura, RP, pH, COT, P) y rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata L*) en la parcela experimental con *Centrosema macrocarpum*.

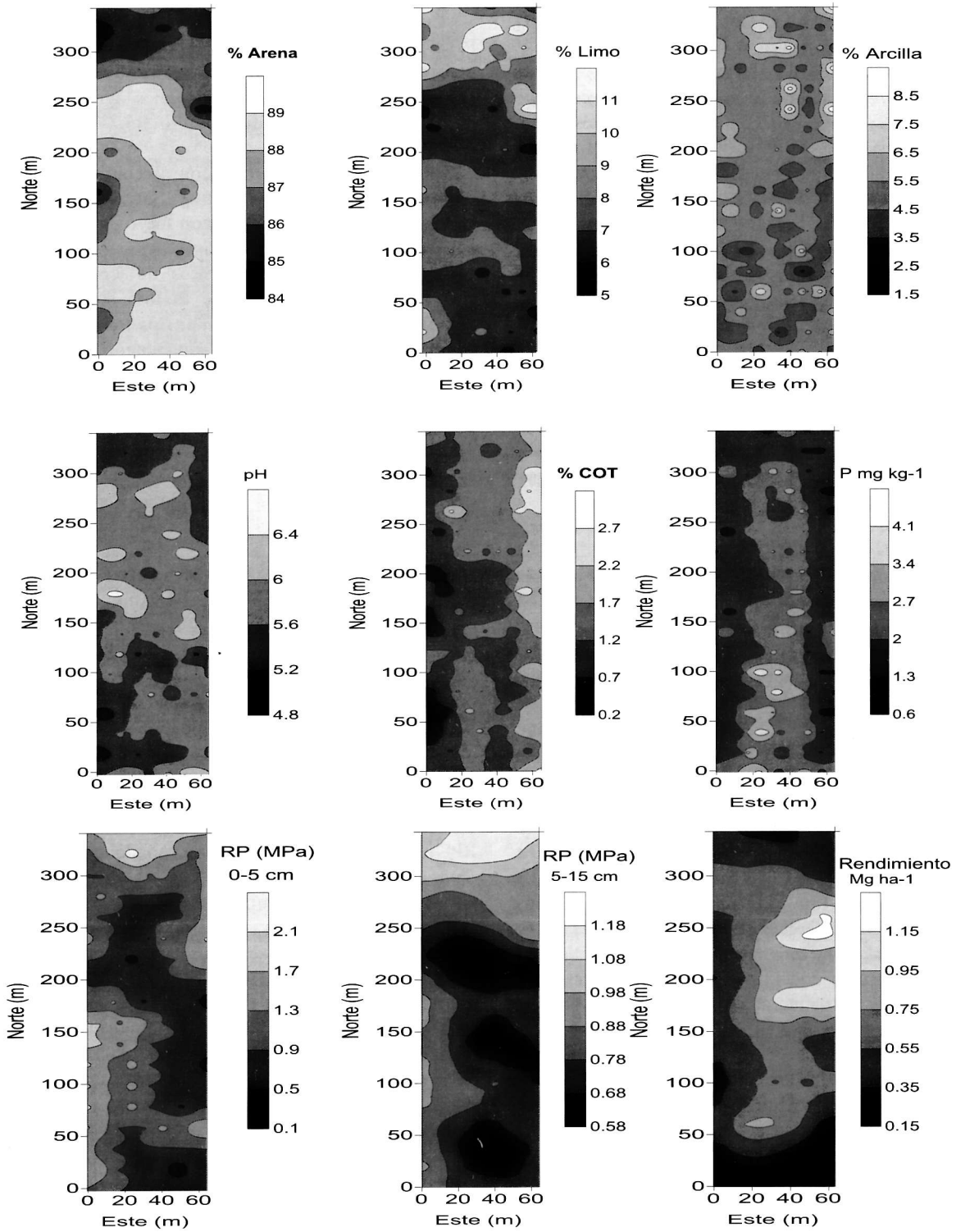


Figura 4. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades del suelo estudiadas (Textura, RP, pH, COT, P) y rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata L*) en la parcela experimental con *Brachiaria dictyoneura*.

La acidificación del suelo en la leguminosa (CM) pudiera estar asociada a una mayor absorción de Ca y la dependencia de la fijación biológica de N_2 de esta especie, lo cual puede resultar de un exceso de cationes en la planta y un flujo de H^+ a través de las raíces hacia la rizósfera para mantener la electroneutralidad dentro de la célula, tal como ha sido señalado por Lozano *et al.* (2010). Por el contrario en la gramínea (BD) se produce una mayor absorción de aniones como el $N\text{-}NO_3^-$, el cual por reducción en las raíces de las células puede generar una gran cantidad de OH^+ citoplasmático, el cual pudiera inducir la síntesis de ácidos orgánicos y provocar la extrusión de OH^+ hacia la rizósfera, como ha sido reportado por Pérez *et al.* (2007).

Los resultados de esta variable caen dentro de un rango para condiciones tropicales donde la mayoría de los nutrientes pueden estar disponibles para las plantas (López de Rojas 2008) con mejor comportamiento en BD.

La representación de las estimaciones del COT muestra que gran parte de la parcela de CM (Figura 3) presentó valores cercanos a 1%, con pequeños parches o agregados distribuidos de manera aleatoria con valores de 1.6 a 2.1%, mientras que para BD (Figura 4) mostró contenidos que variaron de 0.2 a 2.7% con mayores porcentajes hacia la zona este de la parcela. Como se puede apreciar al comparar los mapas de COT (Figura 3 y 4) la cobertura de BD favoreció una mayor incorporación de materia orgánica al suelo, posiblemente debido a la presencia de una mayor cantidad de raíces finas. En este sentido algunos autores han señalado que el C de las raíces de BD se libera con mayor facilidad que el de los residuos de CM (Wei *et al.* 2006 y Lozano *et al.* 2010). La distribución de esta variable no presentó una estructura espacial parecida al rendimiento del cultivo ni siguió unas características topográficas definidas. El COT del suelo constituye uno de los indicadores más usados para evaluar su calidad y en el trópico su conservación se considera como un factor crítico para sistemas sostenibles (Casanova 2005). Este parámetro está estrechamente relacionado con el período de tiempo bajo el sistema de manejo y con la cantidad que retorna al suelo (Lal *et al.* 1998). A pesar de ser un ensayo de labranza conservacionista donde se usa cobertura y no se perturba el suelo, el COT en toda el área de la parcela para ambos tratamientos registró valores considerados de bajos a medianos. Esto probablemente se deba por un lado, a que gran parte de los residuos de cosecha son retirados para su utilización en la alimentación del ganado, dejando pocos residuos para su incorporación, y por otro, que en suelos arenosos hay mayor oxidación y descomposición de la materia orgánica.

Cuando se visualizan los mapas de distribución del P, se puede apreciar que para CM que gran parte de la parcela estuvo representado por valores que fluctuaron entre 1.4 y 2.6 mg kg^{-1}, con algunos agregados con mayor concentración de fósforo (3.2 mg kg^{-1}), mientras que en BD los contenidos de este elemento variaron de 0.6 a 3.4 mg kg^{-1} con parches distribuidos de manera aleatoria de 4.1 mg kg^{-1} En la parcela bajo BD se detectó que una franja con mayores contenidos de P en la parte central de las parcelas que se corresponde con los tratamientos de fertilización o subparcelas cuyas fuentes de fósforo son de lenta solubilización. No obstante, en ambos tratamientos de cobertura los contenidos de P son categorizados como muy bajos, a pesar de que en estas parcelas se viene desarrollando un ensayo a largo plazo que contempla la aplicación de una dosis alta de fósforo.

Los mapas de variación espacial de la resistencia a la penetración (RP) para ambas coberturas se muestran en la figuras 3 y 4. Se puede apreciar que para CM gran parte de la superficie presentó valores que oscilaron entre 0.5 y 1.3 MPa en forma de agregados en el horizonte superficial (0 a 5 cm) y de 0.3 a 1.1 MPa en el segundo horizonte (5-15 cm), mientras que en BD la RP en el horizonte superficial registró valores entre 0.2 y 2.1 MPa, destacándose los valores altos hacia la parte sur y al noreste de la parcela, mientras que para la segunda profundidad (5 a 15 cm), se observó una disminución con medidas de resistencia entre 0.5 y 1.2 MPa, con una distribución espacial similar al horizonte superficial con mayores valores hacia la parte sur de la parcela. En ambas coberturas la distribución espacial de los valores de RP presentó una buena correspondencia con el contenido de humedad del suelo (datos no mostrados), cuyos valores fueron superiores en el horizonte sub superficial.

Finalmente, la distribución espacial del rendimiento de frijol (*Vigna unguiculata*) en ambas coberturas presentó un comportamiento espacial sin ninguna tendencia (Figuras 3 y 4), con valores en la parcela de CM que fluctuaron de 0.2 a 2 Mg ha^{-1} y gran parte de la superficie registró rendimientos que oscilaron de 0.6 a 1.2 Mg ha^{-1}, mostrando alguna distribución en pequeños agregados, cuyos valores están por encima de los promedios de rendimiento de la zona. Para BD se observó cierta agregación en la parte central de la parcela donde se registraron los mayores rendimientos. El rendimiento en grano presentó valores que fluctuaron de 0.15 y 1.15 Mg ha^{-1}, obteniendo mayor rendimiento en la parte central de la parcela y menor rendimiento en el resto de la superficie. Distintas causas pueden incidir en la variación del rendimiento, pero fundamentalmente se puede clasificar en dos categorías, las que pueden ser controladas y las que no pueden serlo (Johnson *et al.*

2002). En nuestro caso el rendimiento de frijol presentó poca relación con los parámetros de suelo. Estos resultados confirman que el rendimiento es un parámetro que depende de muchos factores y aun dentro de una misma condición de manejo la respuesta depende de otros factores limitantes de la producción distintos a los considerados en este estudio.

CONCLUSIONES

Los atributos estudiados presentaron un alto nivel de dependencia espacial, sugiriendo la necesidad de considerar la variabilidad espacial en parcelas experimentales. La aplicación de la geoestadística para la caracterización espacial de los parámetros evaluados representa una ayuda importante para interpretar los resultados de los ensayos que se vienen realizando en esta parcela, en especial la distribución de los componentes granulométricos. Los parámetros físicos y químicos considerados presentaron de baja a ninguna correlación espacial con el rendimiento de frijol, sin embargo, los mapas de distribución de las variables texturales (arena, limo) presentaron cierta correspondencia con algunas zonas del rendimiento del frijol (*Vigna unguiculata*), lo cual pudiera influir sobre la variabilidad de los rendimientos. No obstante se confirma que la variación espacial del rendimiento depende de un conjunto de factores y los parámetros de suelo sólo representan uno de ellos. Debido a que estos lotes (Parcela con cobertura de *Centrosema macrocarpum* y con *Brachiaria dictyoneura*) son usados como parcelas experimentales, se hace necesario considerar la variabilidad espacial de los atributos edáficos como factor que puede enmascarar el efecto de los tratamientos usados.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) y al IDECYT de la Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez por todo el apoyo logístico y económico que hicieron posible las evaluaciones en campo y laboratorio.

REFERENCIAS

AVENDAÑO F, PIERCE JO, SCHABENBERGER y MELAKERBERCHAN H (2004) The spatial distribution of soybean cyst nematode in relation to soil texture and soil map unit. Agr. J. (96): 181-194.

BRAVO C, LOZANO Z, HERNÁNDEZ RM, PIÑANGO L y MORENO B (2004) Efecto de diferentes especies de coberturas sobre las propiedades físicas de un suelo de sabanas con siembra directa de maíz. 16(3): 163-172 p.

BRAVO C (2005) Influencia de algunos factores edáficos es la producción vegetal bajo diferentes sistemas agrícolas en el sur de España. Trabajo de Grado Doctoral. Córdoba, España; Universidad de Córdoba. 209 p.

BRAVO C, ORDOÑEZ R, GONZÁLEZ P, GIRÁLDEZ J y AGÜERA J (2006) Algodón: Variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo y su relación con el rendimiento. Revista de Agricultura de conservación. 2: 39-42.

CAHN M, HUMMEL J, BROKER B (1994) Spatial analysis of soil fertility for management site-specific Soil. Sci. Soc. Am. J. 58: 1240-1248

CAMBARDELLA C, MOORMAN T, NOVAK J, PARKIN T, KARLEN D, TURCO R, y KONOPKA E (1994) Field scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. Soil Sci. Soc. Am.J.58: 1501-1511.

CASANOVA E (2005) Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela, Facultad de Agronomía 75-88.

CASSEL D, WENDROTH K y NIELSEN D (2000) Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: Opportunities arising from spatial dependence. Agronomy Journal. 92: 706-714.

CASTRIGNANO A, GIUGLIARINI L, RISALATI P y MARTINELLI N (2002) Study of spatial relationship among some soil physic-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistic. Geoderma 97:39-60.

COCHRAN W, COX C (1992) Experimental designs, 2nd ed. John Wiley & Sons, Nueva York.

COX M, GERARD P, ABSHIRE M (2006) Selected soil properties' variability and their relationships with yield in three Mississippi fields. Soil Sci. 171: 541-551.

DANIELS M, DELAUNE P, MOORE P, MAUROMOW-TAKOS A, CHAPMAN S, LANGSTON J (2001) Soil phosphorous variability in pastures: Implication for sampling and environmental management strategies. J. Environ. Qual. 30: 2157-2165.

FAGROUD M, VANMEIRVENNE M (2002) Accounting for soil spatial autocorrelation in the design of experimental trials. Soil Sci. Soc. Am. J 55: 1523-1528

FROGBROOK K, OLIVER M, SALAHI M, ELLIS R (2002) Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and yhe implications for sampling. Soil Use and Management. 18: 1-9.

GAMMA DESINGS (1998) GS^{+}. Geostatistical software for the agronomic and biological science. Version 5.1. Plainwell, Michigan.

GEE G, BAUDER J (1986) Particle size analysis. In : Methods of Soli Science. Klute, A. (ed). American Society of Agronomy; Madison. 383-411 p.

GOLDEN SOFTWARE INC. (2001) Surfer, version 8. Golden, USA.

GONG W, YAN X, WANG J, HU T, GONG Y, (2009) Long-term manure and fertilizers effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China. Geoderma 149:318-324.

ISAAC EH, SRIVASTAVA RM (1989). An Introduction to applied geostatistic. Oxford University Press, New York, 561 p.

JOHNSON R, DOWNER R, BRADOW J, BOUER P, SADLER E (2002) Variability in cotton fiber yield, fiber quality and soil properties in southeastern Costal Plain. Agron. J. 94: 1305-1316.

LÓPEZ DE ROJAS I, ALFONSO N, GÓMEZ N, NAVAS M, P YAÑEZ (2008) Manual de alternativas de recomendaciones de fertilizantes para cultivos prioritarios en Venezuela. Maracay, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. 400 p. (Serie B, No 18).

LOZANO Z, BRAVO C, OVALLES F, HERNÁNDEZ RM, MORENO B, PIÑANGO L, VILLANUEVA J (2004) Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. Bioagro, 16(1).61-72 p.

LOZANO Z, A MOGOLLÓN, HERNÁNDEZ RM, BRAVO C, OJEDA A, TORRES A, RIVERO C, TORO M (2010) Cambios en las propiedades químicas de un suelo de sabana por la introducción de pasturas mejoradas. Bioagro 22:135-144.

MARTÍNEZ G, VANDERLINDEN K, ORDOÑEZ R, AND MURIEL JL (2009) Can apparent electrical conductivity improve spatial characterization. Vadose Zone J. 8:586-593.

NACCI S, PLA I (1991) Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. FONAIAP. Serie B, N° 17. Maracay (Venezuela). 40 p.

NELSON D, SOMMER L (1982) Total carbon, organic carbon and organic matter. en: R.H. page and D.R. Keeny (eds). Methods of soil. Analysis, II. Chemical and microbiological propierties. 2da ed. Soil Sci. America Madison.

NIELSEN DR, WENDROTH O (2003) Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation. Catena Verlag, Reiskirchen, 398 p.

OLSENS C, WATANABE F, DEAN L (1954) Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. Department of Agriculture, EE.UU. Cir. No.939.

PONCE ME, GONZÁLEZ V, BRANDÍN J, PONCE M (1994). Análisis de vegetación asociada a una toposecuencia en los llanos centro-orientales de Venezuela. Ecotrópicos 7(2):11-22.

REY J, OVALLES F (2001) Efecto de técnicas exploratorias de los datos en estimaciones Kriging de propiedades del suelo. Agronomía Trop. 51:81-106

SOLÍS P, TORRENT J (1989) Phosphate fractions in Calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 462-466.

TIMM LC, PIRES LF, ROVERATTI R, ARTHUR RCJ, REICHARDT K, OLIVEIRA JCM, BACCHI OOS (2006) Fiel spatial and temporal patterns of soil water conten and bulk density changes. Sci. Agric. 63: 55-64.

TIMM LC, RECKZIEGEL NL, SANZI AQUINO L, BASSOI LH, GUIMARÃES EC, QUEVEDO TAVARES VE, VAZ CMP, MANIERI JM, CARVALHO RAMOS CM, DE ALMEIDA RIBEIRO PR, REICHARDT K (2010) Spatial variability of physical and hydraulic attributes of a sandy soil in northeast Brazil. Suelos Ecuatoriales 40 (2): 139-151.

TUKEY J (1977) Exploratory data analysis. Addison-Wesley, Reading, Mass, USA. 688 p.

USDA (2006) Keys to soil taxonomy. Soil Survey Staff. 10ma ed. Natural Resources Conservation Service U.S.. Department of Agriculture. Washington EUA.

WEBSTER R, OLIVER MA (2001) Geostatistics for environmental Scientists. John Wiley, Chichester, England.

WILDING LP (1985) Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. In D.R. Nielsen and J. Bouna 8eds. Soil Spatial Variability. Pudoc, Wageningen, The Netherlands.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

RIESGO DE OCURRENCIA DE DESLIZAMIENTOS EN LAS FORMACIONES EL CARMEN Y EL CHINO-EL CAÑO DE LA CORDILLERA DE LA COSTA CENTRAL, VENEZUELA

María Corina Pineda[1], ✉ Francisco Javier Fonseca[2], Ildefonso Pla[2], Jesús Viloria[1]

[1]Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología, Universidad Central de Venezuela, Maracay, Estado Aragua, Venezuela
[2]Universitat de Lleida, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Lleida, España

✉: pinedac@agr.ucv.ve

Palabras claves:

Movimientos en masa
Modelos de base física
Montañas
Frecuencia acumulada
Precipitación

RESUMEN

Los deslizamientos de tierra en zonas montañosas resultan de la compleja interacción entre diferentes factores. En este estudio se determinó la relación entre el clima y propiedades físicas de suelo como causa de deslizamientos, en áreas con diferente geología y grado de susceptibilidad a deslizamientos. Se utilizó el modelo SOMORE (balance diario de agua en el suelo) para simular el régimen de humedad del suelo a lo largo de 42 años de registros de precipitación. Se calculó la frecuencia de ocurrencia de dos diferentes niveles de humedad del suelo: primero, humedad del suelo mayor a capacidad de campo y, segundo, humedad del suelo mayor al contenido de agua a saturación, para determinar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. El mayor riesgo de deslizamientos de tierra corresponde al suelo de áreas altamente susceptibles, sobre metalavas máficas. Este suelo es menos profundo, con menor contenido de agua a saturación y menor conductividad hidráulica en el horizonte C que los otros suelos estudiados. Los meses con mayor riesgo de deslizamientos de tierra son Junio, Julio y Agosto.

RISK OF LANDSLIDES IN METAVOLCANIC ROCKS IN MOUNTAINS OF NORTH-CENTRAL VENEZUELA

Keywords:

Mass movements
Physically based models
Mountains
Often accumulated frequency
Rainfall

ABSTRACT

Landslides in mountainous areas result from the complex interaction of different factors. In this study we investigated the relationship between climate and soil physical properties as cause of landslides in areas with different geology and susceptibility degree to landslides. The SOMORE model (soil water balance in daily time steps) was used to simulate the soil moisture regime over 42 years of rainfall records. The frequencies of occurrence of two levels of soil moisture were calculated: first, soil moisture greater than field capacity and, second, soil moisture greater than saturated water content, to determine the probability of occurrence of landslides. The greatest risk of landslides corresponds to the soil from highly susceptible areas, on mafic metalavas. This soil is shallower, with lower saturated water content and lower hydraulic conductivity at the C horizon than the other studied soils. The months with the highest risk of landslides are June, July and August.

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 121-128

ISSN 0562-5351

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

El término erosión en masa incluye todos los procesos de erosión en los cuales la gravedad es la fuerza primaria que actúa para desprender y transportar los materiales sueltos y el suelo, con o sin ayuda del agua. Estos procesos por lo general afectan a suelos con una gran resistencia a la erosión superficial, por poseer propiedades hidráulicas y estructurales estables, capaces de permitir la infiltración del agua; pero con capas subsuperficiales con restricciones de drenaje (Pla 1992). Por ello, la ocurrencia de deslizamientos se puede relacionar directamente con la evaluación de procesos hidrológicos y estos con la evaluación del riesgo. En este caso, el riesgo se evalúa como un riesgo especifico, en el cual se establece la probabilidad de ocurrencia de un evento capaz de desencadenar consecuencias ambientales negativas en un sitio particular y durante un tiempo determinado, sin establecer el grado de pérdidas (Ayala *et al.* 2003, ONU 2004).

Debido a la complejidad de la dinámica del agua en el suelo, su estudio racional, objetivo y cuantitativo solo es posible por medio de modelos basados en principios físicos. Sin embargo, la mayoría de los modelos físicos disponibles actualmente, no incluyen información sobre los mecanismos de activación (Carrara *et al.* 2008), y son aplicables solo a determinadas condiciones hidrológicas (Casadei 2003). Por lo que es preferible el uso de modelos sencillos que intenten explicar los mecanismos de ocurrencia de los movimientos en masa, tomando en cuenta criterios de base física y el tiempo, tales como el modelo SOMORE (Pla 1997).

El modelo SOMORE se basa en la descripción de los procesos hidrológicos más importantes del suelo, influenciados por el uso y manejo de la tierra y el clima, para generar predicciones de balance de agua y régimen de humedad del suelo (Fonseca 2006). Este modelo a pesar de su sencillez, muestra la posibilidad, conjuntamente con los periodos de retorno de eventos meteorológicos, de predecir bajo que condicones se puede presentar el riesgo potencial de un movimiento en masa, con base en fundamentos físicos e hidrológicos (Pla 1995, Nacci 2001, Nacci *et al.* 2002, Abreu 2005, Fonseca 2006, Dalurzo 2010). El mismo ha sido utilizado y validado por varios autores en diferentes condiciones meteorológicas, simulando el régimen de humedad del suelo, el riesgo de degradación de los suelos por erosión (Nacci 2001, Abreu 2005, Nacci *et al.* 2002, Fonseca 2006, Dalurzo 2010) y la descripción cuantitativa de los procesos (Pla *et al.* 2007, Nacci 2010).

La investigación presentada acá evalúa el riesgo de ocurrencia de deslizamientos, en un área piloto localizada en la Cordillera de la Costa Central, a través de relaciones entre la precipitación (factor activador) y suelos (factores condicionantes) localizados en áreas previamente calificadas como altamente ó ligeramente susceptibles a deslizamientos, pertenecientes a dos formaciones geológicas distintas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio tiene una extensión de 6760 ha, con altitudes que van desde los 334m hasta 1405 m sobre el nivel del mar, en la Cordillera de la Costa central de Venezuela. A lo largo de la zona aparecen las formaciones geológicas El Chino-El Caño y El Carmen (Urbani y Rodríguez 2003). El Chino-El Caño se compone de basaltos y rocas metavolcánicas asociadas a rocas sedimentarias, y El Carmen incluye metalavas máficas intercaladas con rocas metasedimentarias y otras rocas metavolcánicas (Figura 1) (Urbani y Rodríguez 2003).

En este sector se elaboró un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos (Pineda *et al.* 2011a). La Figura 2a muestra la variabilidad interanual de la precipitación para un periodo de 42 años (1958-2000). La precipitación media es de 1413 mm, la precipitación mínima anual fue de de 829 mm (2000) y la máxima anual fue de 1918 mm (1981). En la Figura 2b, se observa la variabilidad de la precipitación mensual a lo largo del año, presentando mayores variación en los meses de mayo a octubre.

Basados en el mapa de susceptibilidad se seleccionaron dos áreas de muestreo en cada una de las formaciones geológicas, una altamente susceptible y otra ligeramente susceptible a los deslizamientos. En cada una de éstas, se seleccionaron dos laderas. En cada ladera se tomaron 8 puntos o perfiles de suelos, lo cual generó 32 puntos de muestreo. De estos se seleccionaron cuatro perfiles (Cuadro 1) de suelos como representativos de las siguientes combinaciones de substrato geológico y susceptibilidad a los deslizamientos: formación El Chino-El Caño ligeramente susceptible (FCHLS) y altamente susceptible (FCHAS) a deslizamientos y formación El Carmen ligeramente susceptible (FCALS) y altamente susceptible (FCAAS) a deslizamientos.

Para la caracterización de los suelos y la evaluación del régimen de humedad se determinaron las propiedades hidráulicas necesarias para la implementación del modelo SOMORE. Se determinó: la conductividad hidráulica a saturación (Ks, cm/h), el contenido de humedad a -33 kPa (muestras no alteradas) el cual se usó como una aproximación a capacidad de campo (CC), el contenido de humedad a saturación (SAT) y el contenido de humedad a -1500 kPa (muestras disgregadas) como una aproximación

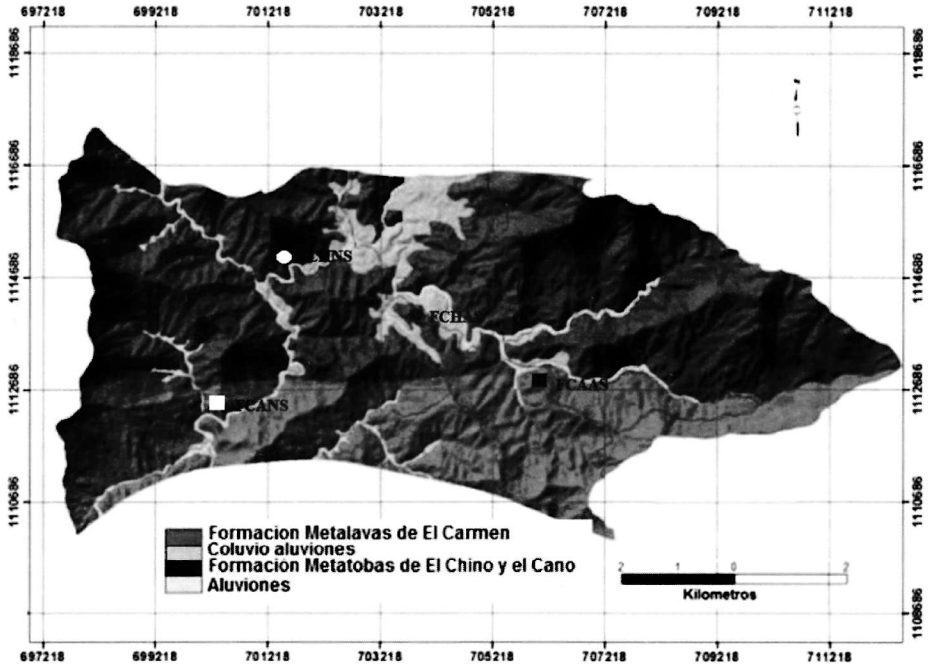
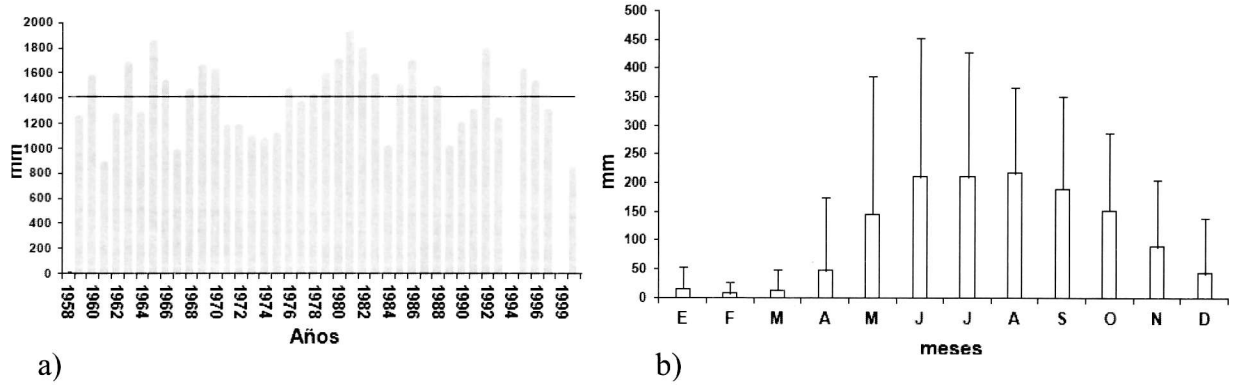


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio
FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles



a) b)

Figura 2. a) Precipitación anual de la estación Tiara desde 1958 hasta 2000. b) Variación de las precipitaciones medias mensuales registradas en la Estación Tiara desde 1958 hasta el 2000.

del punto de marchitez permanente (PMP) y la conductividad hidráulica del estrato rocoso (horizontes C), debido a que muchas especies vegetales pueden desarrollar raíces dentro de la roca fracturada y parcialmente meteorizada (Jones y Graham 1993). Como infiltración se consideró la media armónica de los valores de conductividad hidráulica a saturación de cada uno de los horizontes (Porta *et al.* 1999). Adicionalmente se determinó la distribución de tamaño de partículas por el método de la pipeta y la densidad aparente del suelo en muestras cilíndricas no disturbadas de 7,5 cm de diámetro y 7,5 cm de altura (Da, Mg/m^3) (Pla 1977).

Régimen hídrico del suelo y Probabilidad de ocurrencia de los eventos HTS (Humedad Total del Suelo)>SAT y HTS>CC.

Para establecer las variaciones en los regímenes de humedad del suelo asociados a la ocurrencia de deslizamientos en cada uno de los suelos seleccionados, se utilizó el modelo SOMORE (Pla 1997, Pla *et al.* 2007). La aplicación del modelo se realizó tomando en cuenta 42 años de registros de precipitación de la estación Tiara y evapotranspiración potencial calculada mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), con valores de

temperatura, radiación, humedad relativa y velocidad del viento de la estación Camatagua. Adicionalmente, se integraron parámetros referentes a la cobertura vegetal predominante (herbazal arbolado).

Los resultados obtenidos consisten en balances hídricos diarios del perfil de suelo, incluyendo la humedad total del suelo (HTS). Se consideraron como valores críticos, aquellos que alcanzan un contenido de humedad de suelo mayor o igual a saturación (SAT) y los valores de capacidad de campo (CC, -33 kPa). Para estimar la probabilidad de ocurrencia de los eventos HTS>SAT y HTS>CC, se realizó un análisis de frecuencia relativa acumulada (frecuencia acumulada dividida por la frecuencia total). Este valor corresponde a la probabilidad de ocurrencia de los eventos referidos. En sentido estricto, la humedad total del suelo (HTS) nunca podría ser mayor a la humedad de saturación (SAT) pero esta condición refleja que el perfil de suelo está saturado, condición que favorece la ocurrencia de deslizamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En general, los suelos en las áreas altamente susceptibles son poco profundos, presentan poco espesor del horizonte A y ausencia del horizonte B: pero son más permeables (mayor Ks e infiltración) que los suelos de áreas ligeramente susceptibles, sobre el mismo tipo de substrato geológico (Cuadro 1). La mayor infiltración y distribución del agua dentro del perfil de suelo puede favorecer la ocurrencia de deslizamientos (Pérez 2008); aunque los valores de Ks deben ser interpretados con cuidado, dado que su variabilidad es frecuentemente alta (Kutilek y Nielsen 1994, Dalurzo 2010). Los suelos desarrollados sobre ambas formaciones mostraron diferencias marcadas en la conductividad hidráulica del horizonte C.

Cuadro 1. Perfiles modales seleccionados del total de perfiles muestreados, utilizados en el modelo SOMORE.

Formación	Susceptibilidad	Horizonte	Profundidad (mm)	INF (mm/h)	Ks	Da ($Mg\,m^3$)	PMP	CC mm	SAT
FCH	LS	A	0-130	203,9	204	1,3	23,0	42,5	66,4
		B	130-260	285,4	285	1,3	25,2	40,3	63,7
		C			252	1,4			
	AS	A	0-110	523,0	523	1,3	20,6	25,4	70,9
		C			252	1,4			
FCA	LS	A	0-130	124,2	124	1,4	23,8	36,5	64,2
		B	130-250	21,9	22	1,5	26,5	39,4	52,1
		C			8	1,6			
	AS	A	0-120	145,4	145	1,4	21,7	37,7	57,2
		C			8	1,6			

FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles.

Régimen de humedad de los suelos

Al evaluar la humedad crítica en la condición (HTS>CC) se encontró un comportamiento similar en los cuatro suelos seleccionados (Figura 3). Las áreas calificadas como altamente susceptibles de ambas formaciones geológicas, presentaron los valores más altos de frecuencia de este evento debido a las características del suelo (menos profundos). Estos suelos al localizarse en áreas altamente susceptibles son más proclives a alcanzar esta condición, por tanto más propensos a la ocurrencia de deslizamientos.

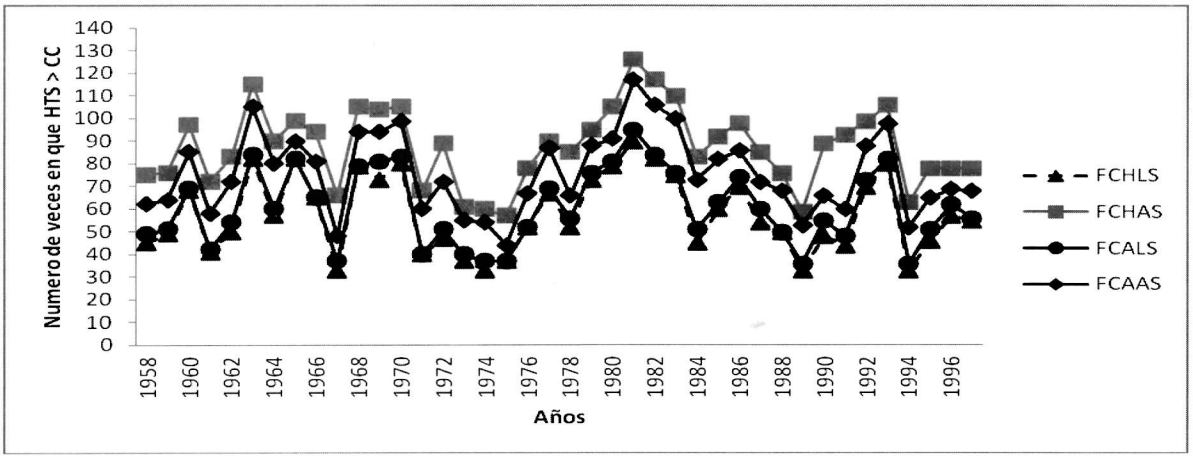


Figura 3. Número de veces en que la humedad total del suelo (HTS) es mayor a la capacidad de campo (CC) en 42 años de registros.
FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles.

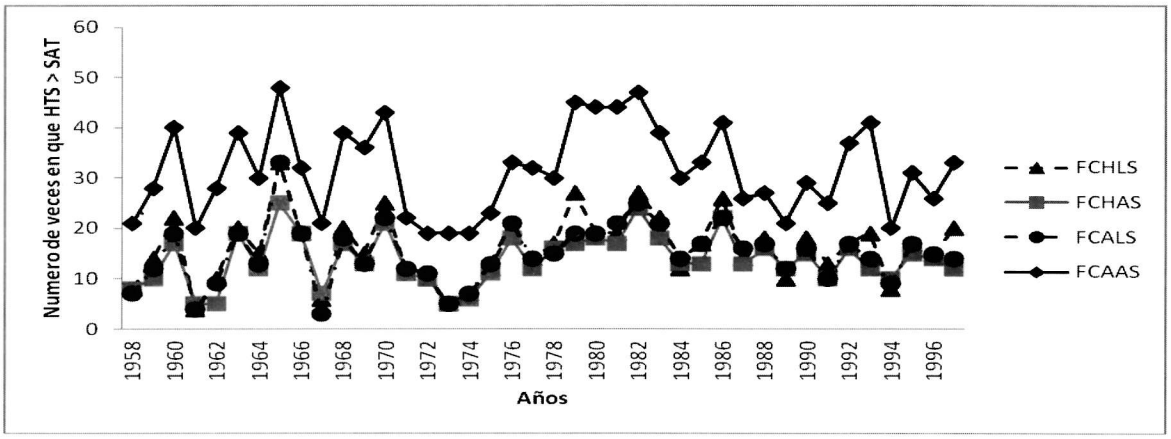


Figura 4. Número de veces en que la humedad total del suelo (HTS) es mayor a la saturación (SAT) en 42 años de registros.
FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles.

Al evaluar la condición HTS>SAT se encontró que el número de veces en que la humedad total del suelo es mayor a la saturación es marcadamente mayor en las áreas altamente susceptibles a deslizamientos, en la formación Metalavas de El Carmen (FCAAS), que en las otras condiciones de suelo consideradas en este estudio (Figura 4). La baja conductividad hidráulica del horizonte C del suelo de la formación El Carmen (FCA) restringe la percolación del agua que penetra en el suelo. En adición a esto, el perfil del suelo representativo de la condición altamente susceptible a deslizamientos en esta formación (FCAAS) es poco profundo y está restringido a un horizonte A de 12 cm de espesor (Cuadro 1). Esta combinación de factores provoca que el suelo representativo de la condición FCAAS se sature más rápidamente que los otros suelos considerados en esta investigación. Esto revela que bajo condiciones similares de lluvia, existen características del suelo que determinan que la condición de saturación de humedad se presente en unos suelos más frecuentemente que en otros. La escasa diferencia entre las áreas ligeramente (FCHLS) y altamente (FCHAS) susceptibles de la formación Metatobas de El Chino-El Caño indica que la susceptibilidad de estas áreas, no depende solo de las características del suelo o de las condiciones climáticas, también depende de atributos relacionados con el relieve (pendiente, orientación).

Probabilidad de ocurrencia de los eventos HTS>SAT y HTS>CC tomando en cuenta la variabilidad interanual de la precipitación.

Como se observa en los Figuras 5 y 6, la probabilidad de ocurrencia de los eventos HTS>SAT y HTS>CC varía según las condiciones climáticas y las características de los suelos. Las mayores probabilidades se presentan en los meses de mayo a octubre y los valores más altos se presentan los meses de junio, julio y agosto, los cuales son los meses más húmedos del año (Figura 2). En este período aumenta la probabilidad de que el contenido de humedad total del suelo sobrepase los valores de CC y SAT y se incrementa la tendencia a la ocurrencia de deslizamientos. Esta proporción disminuye hacia los meses de noviembre a diciembre hasta hacerse casi nula en los meses de enero a abril e incrementar nuevamente hacia el mes de mayo. Particularmente, en los suelos localizados en FCHAS, existe un 10% de probabilidad de que la condición HTS>CC ocurra en los meses de diciembre y 3% de que ocurra en enero, lo cual muestra que la humedad antecedente del suelo tiene influencia en el nivel de riesgo, al incrementarlo y provocar que este se presente tempranamente. La mayor probabilidad para ambas condiciones (HTS>CC y HTS>SAT) se presentó en el mes de julio, en los suelos desarrollados sobre áreas altamente susceptibles de ambas formaciones geológicas (Figuras 5 y 6). Este comportamiento está relacionado directamente con la variabilidad interanual de la precipitación. En un estudio anterior la formación Metatobas de El Chino-El Caño, fue calificada como la más susceptible a los deslizamientos (Pineda *et al.* 2011a), lo cual se corresponde al comportamiento encontrado al evaluar la condición HTS>CC, pero no cuando se evaluó la condición HTS>SAT. Los resultados presentados en el Figura 6 confirman que la frecuencia de ocurrencia de la condición HTS>SAT es más alta en el suelo representativo de las áreas altamente susceptibles de la formación Metalavas de El Carmen (FCAAS) que en el suelo representativo de las áreas altamente susceptibles de la formación Metatobas de El Chino y El Caño (FCHAS).

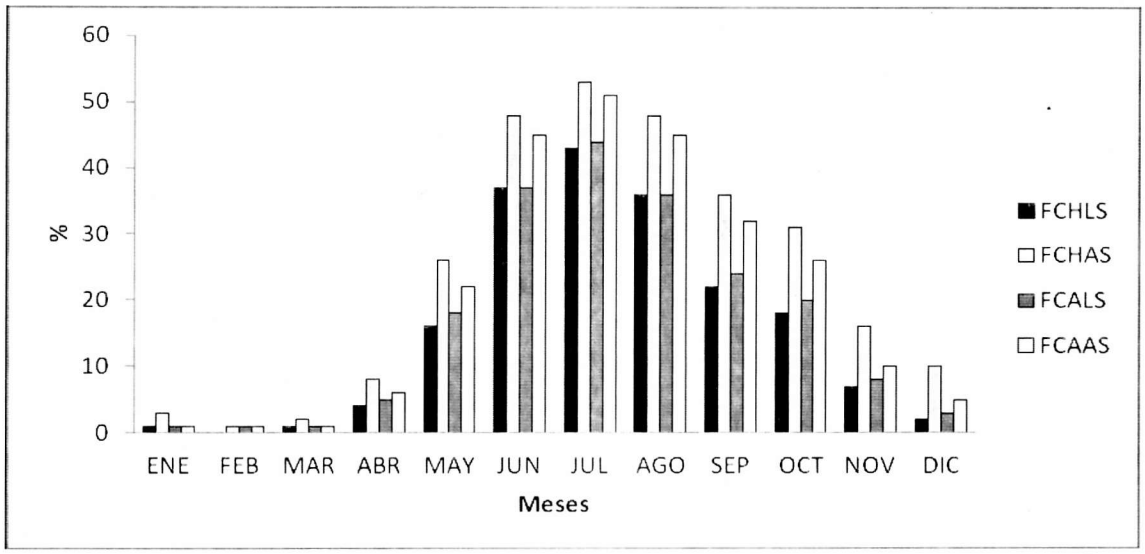


Figura 5. Probabilidad de ocurrencia del evento humedad total del suelo (HTS) es mayor a la capacidad de campo (CC), para 42 años de registro.
FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles.

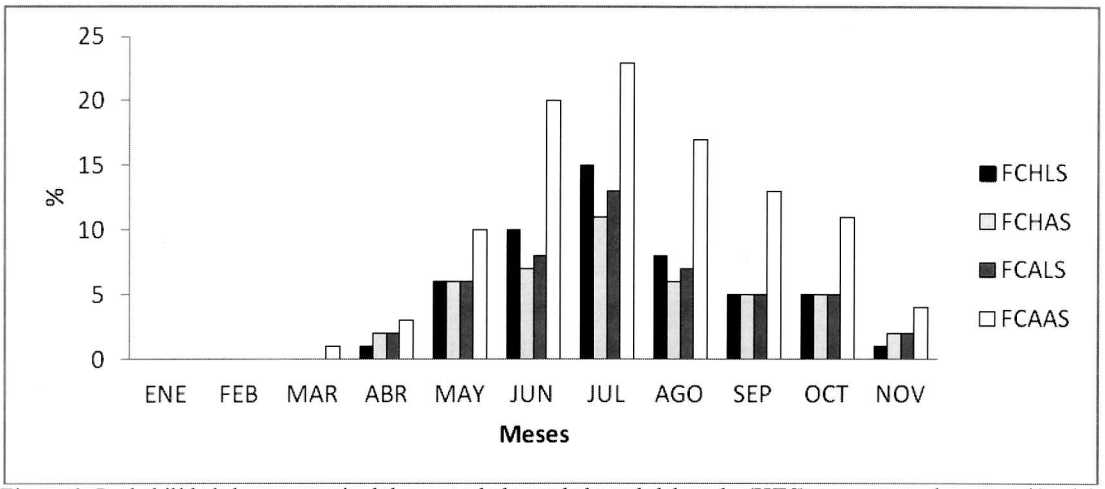


Figura 6. Probabilidad de ocurrencia del evento la humedad total del suelo (HTS) es mayor a la saturación del suelo (SAT), para 42 años de registro.
FCHLS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como ligeramente susceptibles, FCHAS= Metatobas de El Chino-El Caño calificadas como altamente susceptibles, FCALS= Metalavas de El Carmen, calificadas como ligeramente susceptibles, FCAAS= Metalavas de El Carmen, calificadas como altamente susceptibles.

El suelo del área altamente susceptible en la formación Metatobas de El Chino-El Caño (FCHAS) presenta valores más altos de saturación y conductividad hidráulica, que los otros suelos considerados en el estudio. Esta característica, unida a la conductividad hidráulica relativamente alta del horizonte C de este suelo, disminuyó la frecuencia con la cual el contenido de humedad en este suelo superó el nivel de saturación, en comparación con los otros suelos estudiados. Este resultado corrobora que, aún bajo las mismas condiciones de precipitación, las características del suelo son determinantes del riesgo de ocurrencia de deslizamientos.

CONCLUSIONES

Los resultados del modelo SOMORE sugieren que el régimen de humedad de los suelos varía según las condiciones climáticas y las características de los suelos. El mayor riesgo de ocurrencia de deslizamientos, estimado con base en las condiciones de humedad total de suelo (HTS) mayor a contenido de agua a saturación (SAT) y humedad total de suelo (HTS) mayor a capacidad de campo (CC), se presentó en los suelos desarrollados sobre los materiales parentales de la formación Metalavas de El Carmen. Los suelos desarrollados sobre estos materiales son menos profundos, menos permeables, particularmente en el horizonte C y tienen menor contenido de agua a saturación que aquellos desarrollados sobre materiales de la formación El Chino-El Caño. Esto demuestra que la susceptibilidad de un área de deslizamientos depende no solo de las condiciones climáticas, sino también de las características del suelo. En los meses de mayo y junio el riesgo de ocurrencia depende de la precipitación, mientras que en los meses de octubre y noviembre el riesgo depende de la humedad antecedente en el suelo.

REFERENCIAS

ABREU X (2005) Evaluación del efecto de las propiedades hidrológicas y sistemas de manejo sobre la susceptibilidad a erosión superficial y en masa en suelos pedregosos con vina del priorat (Cataluña, España). Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Cataluña.

ALLEN RG, PEREIRA LS, RAES D, SMITH M (1998) Crop evapotranspiration:Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome. Italy. 300 pp.

AYALA R, MALDONADO H, GANDARILLAS C (2003) Memoria explicativa mapa de riesgo socionatural específico, ciudad de la Paz. Gobierno municipal de la Paz. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. Programa de prevención de riesgos, atención de emergencias y reconstrucción del municipio de la Paz. Versión 1.2. La Paz – Bolivia. 32p.

CARRARA A, CROSTA G, FRATTINI P (2008) Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. Geomorphology 94: 353–378.

CASADEI M, DIETRICH WE, MILLER NL (2003) Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surf. Process. Landforms* 28: 925–950.

DALURZO HC (2010) Régimen Hídrico del suelo y producción de vinas bajo diferentes sistemas de riego en Raimat (Lleida, España). Tesis Doctoral Universita de Lleida. Escola Tecnica Superior d´Enginyeria Agrária. Departament de Medi Ambint Ciéncies del Sól 162p.

FONSECA FJ (2006) Balance hídrico en suelos pedregosos con viña de secaño en el Priorat (Cataluña). Efectos por cambios de manejo y clima. Tesis Doctoral. Universita de Lleida. Escola Tecnica Superior d´Enginyeria Agrária. Departament de Medi Ambint Ciéncies del Sól.134.pp

JONES DP, GRAHAM RC (1993) Water-holding characteristics of weathered granitic rock in chaparral and forest ecosystems. Soil Sc. Sc. Am. J., 57, 256-261.

KUTILEK M, NIELSEN DR (1994) Soil Hydrology. Catena-Verlag. Cremlingen

NACCI S (2001) Alteraciones en el régimen hídrico del suelo asociadas a la sistematización y cambios en el manejo de tierras con viña de secaño en el Añoia-Alt Penedes. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. Cataluña.

NACCI S (2010) Impacto del cambio en el manejo de tierras con viña de secano del área mediterránea sobre la suplencia de humedad al cultivo y sobre los procesos de degradación del suelo: Caso de la Comarca del Anoia. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl.147p.

NACCI S, RAMOS MC, PLA. I (2002) Dynamics of the soil physical properties in vineyards of the Añoia-Alt Penedes Región (Catalunya, Spain). In J.L. Rubio *et al* (eds) Man and soil at the third millennium, II: 1615-1624. Logrono, Spain. Geoforma.

ONU (2004) Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Versión 2004. Anexo 1. Secretaría interinstitucional de la estrategia internacional para la reducción de desastres, Naciones Unidas (EIRD/ONU). 8p. www.un.org/Pubs/sales.htm; www.unisdr.org/eng/library/lib-thesaurus.htm

PÉREZ F (2008) Análisis de Estabilidad Relativa. Requisito para la Ocupación. AGORA, Trujillo. Venezuela (11):21:211-227.

PINEDA MC, ELIZALDE G, VILORIA J (2011a) Determinación de áreas susceptibles a deslizamientos en un sector de la cordillera de la costa central de Venezuela. Interciencia 36:5:370-377.

PINEDA MC, ELIZALDE G, VILORIA J (2011b) Relación suelo-paisaje en un sector de la cuenca del río Caramacate, Aragua. Venezuela. Revista de la Facultad de Agronomía. UCV. 37:1.

PLA I (1977) Metodología para la caracterización física con fines de diagnostico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. Curso de Postgrado en Ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Comisión de Estudios para graduados.85p.

PLA I (1992) La erodabilidad de los andisoles en Latino América. Suelos Ecuatoriales 22(1). Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. Colombia. 33-43.

PLA I (1995) Modelling hydrological processes for guiding soil and water conservation practices. In the soil as strategic resource: Degradation processes and conservation measures. Meeting European Soc. Soil. Conserv. Spain.

PLA I (1997) A soil water balance model for monitoring soil erosion processes and effects on steep lands in the tropics. En: Pla, I. (Ed.). Soil Erosion Processes on Steep Lands. Special Issue of Soil Technology. Elsevier. Ámsterdam. pp: 17-30.

PLA I; NACCI S, FONSECA F, DALURZO HC (2007) Soil water regimen under different land and crop management systems in Catalonia (NE, Spain) vineyards. 5th International Congress of the European Society for Soil Conservation. Palermo (Italy). Book of Abstracts. 56p.

PORTA J, LÓPEZ ACEVEDO M, ROQUERO C (1999) Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.849pp.

URBANI, F; RODRÍGUEZ JA (2003) Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Coedición FUNVISIS y Universidad Central de Venezuela, iii + 146 p.

ARTÌCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

NÚMERO DE MUESTRAS SIMPLES PARA EL ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Luz Adriana Lince Salazar ✉, Siavosh Sadeghian Khalajabadi

Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé

✉: Luz.lince@cafedecolombia.com

Palabras claves:

variabilidad espacial
Geoestadística
Precisión
Exactitud
Rango óptimo de muestreo

RESUMEN

El suelo es una mezcla de materiales en cuya formación influyen agentes que generan variabilidad espacial, la cual debe ser tenida en cuenta en el momento de la caracterización. Con el objetivo de identificar el número mínimo de muestras simples (NMMS), se desarrolló un estudio en dos fincas –Buenos Aires y El Cortijo– ubicadas en el departamento de Quindío, Colombia. En cada finca se seleccionó un lote de 1 ha y se realizó un muestreo de 10 x 10 m para evaluar 14 propiedades químicas y 9 físicas. Los resultados obtenidos al aplicar la fórmula para el NMMS sirvieron como parámetro para proponer que, pH, CIC, MO, arena, arcilla, porosidad total, estabilidad de los agregados, densidad aparente, humedad gravimétrica (Hg), resistencia a la penetración (Rp) y distribución de los agregados (Dis) se pueden muestrear con un muy alto nivel de precisión y exactitud con un NMMS de 10. Mn, Fe, Zn, Al, K, Cu y Mg, se pueden muestrear con un alto nivel de precisión y un nivel alto a medio de exactitud con un NMMS de 20, y P, Ca, B, S y conductividad hidráulica se pueden muestrear con un nivel medio de precisión y exactitud con un NMMS entre 10 y 20. El rango óptimo de muestreo hallado mediante geoestadísticas, se logró determinar para Al y Dis en ambas localidades, Mn, Ar, y Rp en Buenos Aires y CIC y Hg en El Cortijo, con valores entre 16.3 y 58.9 m para CIC y Rp respectivamente.

NUMBER OF SINGLE SAMPLES FOR ANALYSIS OF SOIL PROPERTIES

Keywords:

Spatial variability
Geostatistics
Precision
Accuracy
Range optimal sampling

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 129-137

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The soil is a mixture of materials, and its formation is influenced by diverse agents that generate spatial variability, which must be considered for the soil's characterization. With the objective of identifying the minimum amount of simple samples (MASS) that represent the conditions of the soil, a study was developed in two coffee farms –Buenos Aires and El Cortijo–, located in the central region of the department of Quindío, Colombia, which andic soils correspond to the cartographical units of Chinchiná and Quindío, respectively. A 1 ha lot was selected in each farm and a sampling of 10 m x 10 m was done to evaluate 14 chemical and 9 physical properties. In the obtained results, when applying the Cline (1994) formula, the MASS of each variable functioned as a parameter for proposing that, pH, CEC, OM, Sand (S), Clay (Cl), Total porosity (Tp), Aggregate's' stability (As), Bulk density (Bd), Gravimetric moisture (Gm), Penetration resistance (Pr), and Aggregate's distribution (Ad) can be sampled with a very high level of precision and exactitude with a MASS of 10. Mn, Fe, Zn, Al, K, Cu and Mg can be sampled with a very high level of precision and exactitude with a MASS of 20, and P, Ca, B, S and, Hydraulic conductivity (Hc), can be sampled with a medium level of precision and exactitude with a MASS between 10 and 20. The optimum range of sample found through geoestadistic tools, was able to be determined for Al and Ad in both localities, Mn, Cl, and Pr in Buenos Aires and CEC and Gm in El Cortijo, with values between 16.3 and 58.9 , for CEC and Pr respectively.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

Conocer la variabilidad espacial del suelo es importante, entre otras, para lograr diseños de muestreo más sensibles y aceptables (Wilding y Drees 1983). En la situación descrita, el interés está dirigido en conocer el número de muestras que determine un muestreo confiable y el grado de variación; tendiente a ello se ha trabajado con base en dos herramientas de análisis: la estadística clásica y la geoestadística, la primera con el fin de definir el número mínimo de muestras (NMM), aplica la fòrmula de Cline (1944): $NMM = (t. CV/E)^2$, donde t es el valor de la Tabla t–Student a una confiabilidad determinada, CV es el coeficiente de variación y E es el porcentaje de error. La aceptación universal de la fórmula se debe a que cumple con los parámetros de calidad de un muestreo, exactitud y precisión (Swenson *et al.* 1984); el primero se incluye al tener en cuenta un límite de error y el segundo con un límite de confianza. Otro parámetro importante que se contempla en la fòrmula es el coeficiente de variación, que presenta una relación exponencial con el número de muestras necesarias para estimar la población media con una exactitud de ± 10 y ± 20% (Wilding y Drees 1983).

Es importante tener en cuenta que en este tipo de análisis el tamaño del lote no afecta el coeficiente de variación y por ende no incrementa el número de muestras, siempre y cuando las condiciones sean homogéneas (Keogh y Maples 1967, Cameron *et al.* 1971). La segunda se basa en la teoría de regionalización de variables, con el uso de semivarigramas y métodos de predicción o extrapolación, con un nivel de confianza determinado (Wilding y Drees 1983). Fue desarrollada entre 1940 y 1960 por Krige y Matheron y la definieron como "la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio" (Matheron 1962), cuyos fines iniciales fueron la exploración de metales en el campo de la minería, pero rápidamente fue adoptada por varias ramas de la investigación, entre ellas la pedométria para varios fines.

Estas dos herramientas de interpretación de la variabilidad han sido tema de discusión en la ciencia del suelo, debido a que algunos argumentan que la fòrmula de Cline es de poca utilidad, porque no aporta información de la naturaleza, dirección y sentido, y otros argumentan que la geostadística es de poca aplicación para determinar algunas propiedades del suelo por presentar variabilidad al azar como los nutrientes para las plantas en el suelo y la distribución de contaminantes (plaguicidas), debido a que los primeros son afectados por el manejo de los cultivos y los segundos no guardan relación con la geología y/o fisiografía (Webster en Krasilnikov *et al.* 2008). Sin embargo en múltiples publicaciones emplean las dos herramientas como complementarias.

La determinación del NMM es un concepto altamente difundido a nivel mundial, tal como se aprecia en el protocolo para la preparación y toma de muestras de suelo de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (1992), los programas regionales de fertilización y enmienda de Brasil (Anghinoni y Volkweiss 1984) y Argentina (Roberts y Henry 2000, Alvarez *et al.* 2008) entre otros. Sin embargo en Colombia no se emplea constantemente dicha fórmula y la mayoría de recomendaciones de muestreos para análisis de suelos se basan en la propuesta del Instituto Colombiano Agropecuario (1992), la que indica que para un área homogénea se deben tomar por lo menos 20 submuestras en diferentes lugares y sí el lote es mayor a 10 ha se debe dividir en unidades de 10. Actualmente la recomendación de muestreo para lotes cafeteros es de 5 a 6 submuestras por lote de 1 ha, tomadas en zigzag (Sadeghian 2008), este mismo autor en 2010 (Sadeghian 2010), al aplicar la fòrmula de Cline (1944) en dos lotes cafeteros, indicó que el número de submuestras para pH y MO es relativamente bajo, en comparación con el resto de las propiedades (K, Ca, Mg, Al y P).

Hoy día se desconoce el grado de exactitud y precisión en los muestreos de suelos realizados por los caficultores, lo que conlleva al aumento en la incertidumbre por la respuesta de las plantaciones a la fertilización basada en análisis de suelos. Con este estudio se pretende dar a conocer el NMMS (número mínimo de muestras simples) que deben forman una muestra compuesta, que representen las condiciones químicas y físicas, con un grado de exactitud y precisión y el rango óptimo de muestreo (ROM) mediante análisis geoestadístico, para las unidades de suelos analizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en dos fincas de vocación agrícola cafetera, Buenos Aires y El Cortijo, ubicadas en la región central del departamento de Quindío, Colombia a 4°29'01''N, 75°42'00'' W y 4°34'50'' N, 75°38'43'' W, cuyos suelos corresponden a las unidades denominadas por la Federación Nacional de Cafeteros como Chinchiná y Quindío (*Typic Melanudands* y *Typic Hapludands* respectivamente). En cada una de las fincas se seleccionó un lote de 1 ha y se realizó un muestreo en red de 10 m X 10 m, a una profundidad de 20 cm. Dicho muestreo fue georreferenciado. Las propiedades

evaluadas y el método utilizados descritos por IGAC (1990) y Carrillo (1985).

En el análisis de los datos se utilizaron la estadística y la geoestadística, la primera con el objetivo de determinar el NMMS y la segunda para determinar el ROM.

En la estadística clásica para determinar el NMMS que forma una muestra compuesta, se aplicó estadística univariada y multivariada, en la primera se determinaron valores máximo, mínimo, media, mediana, moda y distribución de la población. Esta última se considera como simétrica cuando el sesgo es igual a cero, asimétrica a la derecha (AD) cuando el sesgo mayor a cero y asimetría a la izquierda (AI) cuando el sesgo es menor a cero. Los valores de curtosis y sesgo también fueron empleados para definir si la población tiene o no una distribución normal (valores entre 2 y –2), mediante el software Statgraphics. Además se calculó el coeficiente de variación (CV), caracterizado mediante la clasificación de Warrick y Nielsen (1980) que indica variabilidad baja cuando el CV es menor a 12%, media cuando el CV está entre 12 y 60% y variabilidad alta cuando el CV es mayor a 60%.

La determinación del NMMS se llevó a cabo mediante la fórmula de Cline (1944) para niveles de confiabilidad de 75, 90 y 95% y niveles de errores de 5, 10 y 20%. Como técnica multivariada se aplicó el análisis clúster con el fin de agrupar las variables según el NMMS; en este sentido, se estableció como máximo 20 NMMS para definir el nivel de confianza y error a cada grupo.

El análisis geoestadístico se realizó en las etapas de exploración, análisis estructural y predicción. En la etapa de exploración de los datos, se tuvo en cuenta la normalidad, (analizada en la etapa anterior) y se comprobó el supuesto estacionariedad espacial, para lo que empleó el software ArcGis mediante las funciones de análisis de tendencias y diagramas de Voronoi (Kamble y Aggrawal 2011), en este se tomó como valor de cálculo la opción simple. En el análisis estructural, los semivariogramas se realizaron en ArcGis, de acuerdo a lo sugerido por Kamble y Aggrawal (2011), y la información arrojada se interpretó según Cambardella (1994), que caracteriza la dependencia espacial en términos de la relación porcentual Nugget/Sill, quien considera, que si es menor a 25% es fuerte, entre 25 y 75% media y mayor a 75% débil. La confiabilidad del modelo geoestadístico se calculó como 100 menos el error máximo (tomado del mapa de predicción del error), y debe ser mayor a 90% para tener un modelo aceptable. La comparación de los resultados obtenidos con la estadística clásica y la geoestadística se realizó con base en el rango óptimo de muestreo y el CV, este último por ser el componente de mayor representatividad en el cálculo del NMMS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Según la distribución de frecuencias (Figura 1) los datos para pH, MO, P y K, se agrupan en más de un 80% en una o dos clases, de acuerdo a los requerimientos del cultivo del café (Sadeghian 2008) y aproximadamente el 20% restante es el causante de la alta variabilidad. Según la clasificación de Warrick y Nielsen (1980), las propiedades que presentaron una baja variabilidad (CV menor a 12%) fueron pH, Ar, Da, Pt, Ea en ambas fincas, y A en El Cortijo, las propiedades con variabilidad media (CV entre 12% y 60%) correspondieron a MO, K, Al, CIC, Fe, Mn, Zn, HG, Dis, Rp en ambas localidades y P, Mg y Cu en El Cortijo y S, B, A y Ch en Buenos Aires y las de variabilidad alta (CV mayor a 60%) fueron Ca en ambas localidades, S, B y Ch en El Cortijo y Mg, P y Cu en Buenos Aires (Tabla 1).

Lo anterior concuerda con los reportes de Cora y Bachmeier (2006) Acevedo *et al.* (2008), Anghinoni *et al.* (2003) para pH; Muñoz *et al.* (2006) y Valbuena *et al.* (2007) para CIC; Wilding y Drees (1978) y Siqueira *et al.* (2007) para Da; Cora y Bachmeier (2006) para Dr; Anghinoni *et al.* (2003) para MO; Cora y Bachmeier (2006) y Anghinoni *et al.* (2003) para K; Cora y Bachmeier (2006) y Siqueira *et al.* (2007) para Rp; Siqueira *et al.* (2007) para Hg; Lozano *et al.* (2004) para A y Ar; Acevedo *et al.* (2008) y Lozano *et al.* (2004) para Ch y P; Ball y Williams (1968) y Cora y Bachmeier (2006) para Mg y Ca. La alta variabilidad en las bases intercambiables del suelo es atribuida a la aplicación de fertilizantes y enmiendas agrícolas (Cambardella *et al.* 1994), mientras que la de Ch es atribuida a los cambios en el tamaño de partículas y la distribución de la densidad aparente (Wilding y Drees 1978, Babalola 1978). En cuanto a la normalidad de los datos, se halló que las propiedades Mn, Al, Ar, Dis y Rp para Buenos Aires y CIC, Al, Hg y Dis en El Cortijo, cumplieron con los supuestos.

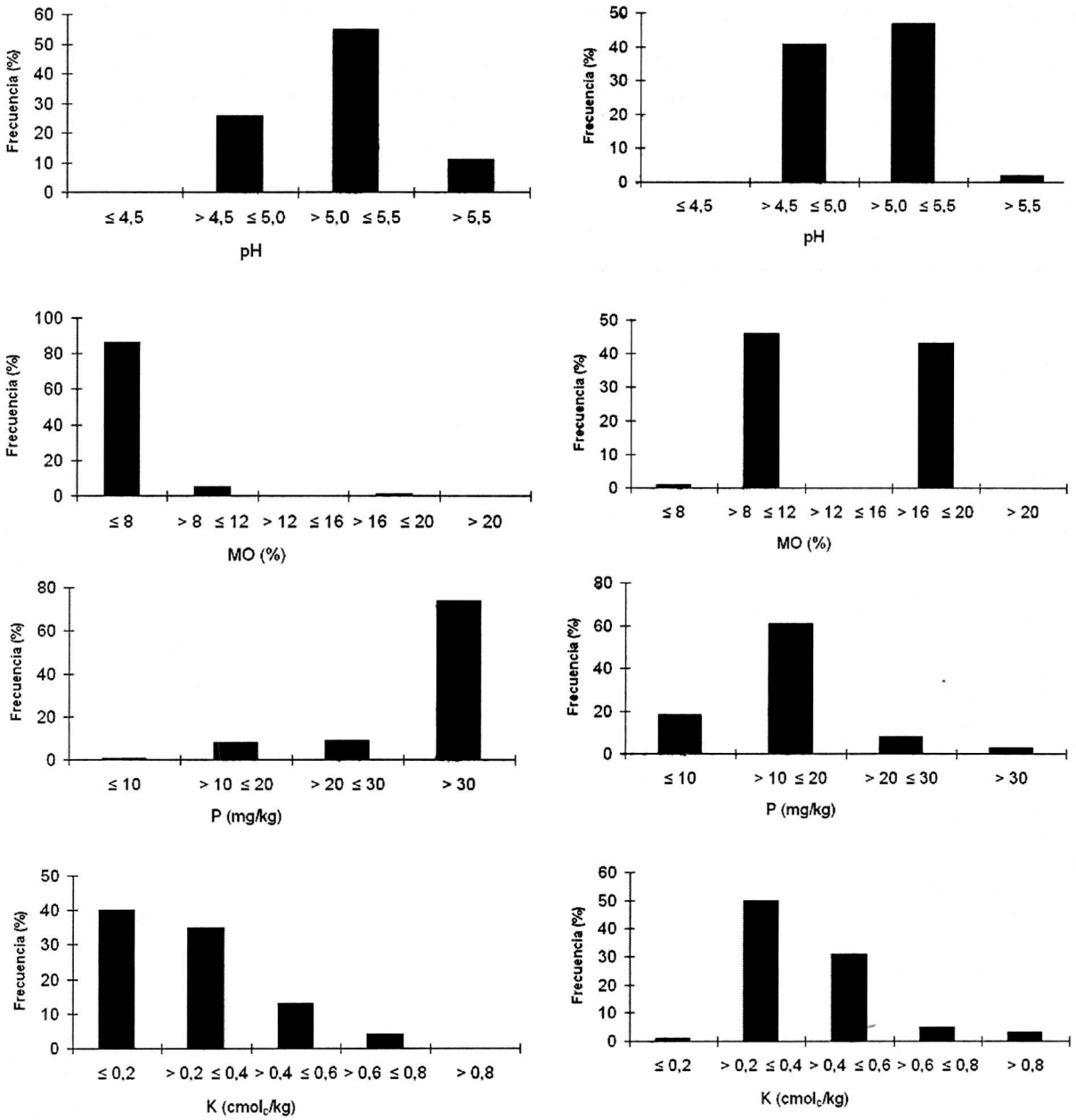


Figura 1. Histogramas de distribución para pH, MO, P y K, según los requerimientos nutricionales del cultivo del café para las fincas Buenos Aires y El Cortijo.

Al aplicar la fòrmula de Cline (1944) se encontró que pH, Pt y Ea requieren menos NMMS en comparación con Ca, P, S, B y Ch (Tabla 2). Para pH, Pt y Ea la diferencia entre el número de muestras calculado con los valores de mayor y menor exactitud (5% y 20%) y precisión (95% y 75%), es menor a 5, mientras que para Ca, P, S, B y Ch la diferencia es mayor a 100, con valores extremos de 2215 y 1383 para Ch y S respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura, al emplear la fòrmula de Cline (1944), con una confianza del 95% y un error del 5 y 10%, los que indican para pH un NMM de 1 a 4 (Cora y Bachmeier 2006, Acevedo *et al.* 2008, Anghinoni *et al.* 2003), CIC de 1 a 18 para los sitios de menor y mayor intervención respectivamente (Cora y Bachmeier 2006), Mg y Ca más de 135 (Ball y Williams 1968, Wilding y Drees 1978, Cora y Bachmeier 2006), P más de 300 (Anghinoni *et al.* 2003, Lozano *et al.* 2004, Cora y Bachmeier 2006, Acevedo *et al.* 2008), Da de 1 a 5 (Cora y Bachmeier 2006, Siqueira *et al.* 2007), Dr de 1 a 2 (Cora y Bachmeier 2006), A de 1 a 18 (Lozano *et al.* 2004), Hg de 18 (Siqueira *et al.* 2007) y Rp de 5 (Cora y Bachmeier 2006, Siqueira *et al.* 2007). Sin

embargo algunos autores reportan valores diferentes a los encontrados en este estudio, en el caso de MO le asignan un NMM de 1 (Anghinoni *et al.* 2003), a Ar entre 46 y 196 (Lozano *et al.* 2004) y a K mayor a 400 (Anghinoni *et al.* 2003, Cora y Bachmeier 2006), los dos últimos casos son valores más elevados a los reportados en este estudio, posiblemente la diferencia se deba al manejo agronómico dado a los lotes.

Tabla 1. Estadísticos asociados a las propiedades del suelo. Finca Buenos Aires y El Cortijo.

Propiedad	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	Moda	CV (%)	Sesgo	Curtosis	Distribución
				Buenos Aires					
pH	4.60	6.70	5.23	5.20	5.30	5.82	5.18	9.75	AD
MO (%)	2.10	16.10	6.40	6.35	6.30	24.48	8.43	32.63	AD
K ($cmol_c/kg$)	0.07	0.69	0.27	0.22	0.17	53.95	4.09	0.87	AD
Ca ($cmol_c/kg$)	0.36	14.80	2.39	2.14	0.81	81.44	13.45	36.05	AD
Mg ($cmol_c/kg$)	0.16	2.99	0.75	0.63	0.48	65.51	7.17	9.64	AD
Al ($cmol_c/kg$)	0.10	1.60	0.70	0.60	–	55.42	1.17	–1.81	AD
CIC ($cmol_c/kg$)	9.00	29.00	18.46	18.00	18.00	17.95	–0.30	2.61	AI
P (mg/kg)	8.00	253.00	67.60	54.00	54.00	74.18	7.21	8.05	AD
Fe (mg/kg)	57.00	319.00	116.77	115.00	–	28.91	9.38	25.71	AD
Mn (mg/kg)	8.00	22.00	13.90	14.00	–	24.90	1.13	–1.50	AI
Zn (mg/kg)	2.60	11.20	5.19	4.80	5.10	34.43	4.79	3.62	AD
Cu (mg/kg)	1.40	60.10	13.70	11.80	–	63.95	10.22	18.85	AD
S (mg/kg)	1.60	55.50	22.64	21.95	–	52.86	2.29	0.36	AD
B (mg/kg)	0.13	1.22	0.42	0.39	0.20	50.03	3.99	2.76	AD
A (%)	7.00	21.00	15.56	16.00	16.00	16.33	–3.14	3.34	AI
Ar (%)	58.00	75.00	66.06	66.00	67.00	5.09	0.88	1.92	AD
Da (g/cm^3)	0.63	1.25	0.96	0.95	0.89	8.78	0.81	6.56	AD
Pt (%)	51.42	75.36	61.11	61.14	–	5.21	–2.30	–1.31	AD
H (%)	21.14	49.98	35.04	35.08	–	13.80	–0.20	2.22	AI
Ch (cm/h)	0.24	2.51	0.76	0.66	0.59	52.71	7.25	8.2	AD
Ea (mm)	1.84	3.12	2.83	2.89	–	7.54	–6.99	9.27	AI
Dis (mm)	0.79	2.79	1.62	1.61	–	26.39	1.18	–0.34	AD
Rp (Mpa)	0.27	0.69	0.47	0.47	–	16.46	0.05	0.2	AD
				El Cortijo					
pH	4.70	6.20	5.08	5.10	5.10	4.19	7.22	15.65	AD
MO (%)	5.50	18.10	11.98	11.95	–	16.07	0.41	2.68	AD
K ($cmol_c/kg$)	0.19	0.91	0.41	0.40	0.33	34.89	5.55	5.18	AD
Ca ($cmol_c/kg$)	0.39	9.30	1.31	1.07	1.07	84.11	18.69	60.76	AD
Mg ($cmol_c/kg$)	0.15	1.43	0.42	0.36	–	54.23	9.58	14.45	AD
Al ($cmol_c/kg$)	0.10	2.10	1.05	1.00	0.90	35.77	1.36	0.77	AD
CIC ($cmol_c/kg$)	14.00	33.00	24.14	24.00	20.00	14.42	0.29	–0.07	AD
P (mg/kg)	6.00	40.00	15.00	14.00	12.00	39.94	6.22	6.8	AD
Fe (mg/kg)	50.00	183.00	108.92	105.50	106.00	25.35	2.63	0.37	AD
Mn (mg/kg)	5.00	34.00	17.42	17.00	–	34.54	2.16	0.12	AD
Zn (mg/kg)	1.40	6.60	3.26	3.15	1.90	32.87	2.59	0.73	AD
Cu (mg/kg)	1.00	10.20	2.08	1.90	1.20	54.99	16.58	53.96	AD
S (mg/kg)	0.10	29.70	4.19	3.40	0.10	112.44	8.76	17.19	AD
B (mg/kg)	0.11	2.79	0.47	0.36	–	85.45	14.18	32.89	AD
A (%)	16.00	22.00	19.90	20.00	21.00	7.11	–3.36	0.12	AI
Ar (%)	50.00	65.00	57.36	59.00	59.00	6.86	–0.77	–2.09	AI
Da (g/cm^3)	0.63	0.91	0.73	0.72	0.73	8.36	2.48	–0.30	AD
Pt (%)	58.53	72.76	68.54	68.85	–	3.65	–3.66	3.42	AI
H (%)	37.85	87.49	64.38	66.43	–	17.44	–1.16	–1.10	AI
Ch (cm/h)	0.01	1.72	0.16	0.09	0.03	142.32	17.51	53.75	AD
Ea (mm)	2.38	3.21	3.05	3.07	–	4.24	–8.69	16.56	AI
Dis (mm)	2.24	5.00	3.22	3.23	–	15.60	1.69	1.17	AD
Rp (Mpa)	0.41	1.00	0.63	0.62	–	19.24	2.09	0.65	AD

Tabla 2. Número mínimo de muestras simples para de las variables con diferente nivel de confiabilidad y error.

	Confianza 75%			Confianza 90%			Confianza 95%		
	Error			Error			Error		
	5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %	5 %	10 %	20 %
	Buenos Aires								
pH	1	1	1	3	1	1	4	1	1
MO	11	3	1	40	10	3	67	17	5
K	54	14	4	195	49	13	322	81	21
Ca	122	31	8	443	111	28	734	184	46
Mg	79	20	5	287	72	18	475	119	30
Al	57	15	4	205	52	13	340	85	22
CIC	6	2	1	22	6	2	36	9	3
P	101	26	7	367	92	23	609	153	39
Fe	16	4	1	56	14	4	93	24	6
Mn	12	3	1	42	11	3	69	18	5
Zn	22	6	2	80	20	5	131	33	9
Cu	76	19	5	273	69	18	452	113	29
S	52	13	4	187	47	12	309	78	20
B	46	12	3	167	42	11	277	70	18
A	5	2	1	18	5	2	30	8	2
Ar	1	1	1	2	1	1	3	1	1
Da	2	1	1	6	2	1	9	3	1
Pt	1	1	1	2	1	1	4	1	1
H	4	1	1	13	4	1	22	6	2
Ch	51	13	4	186	47	12	308	77	20
Ea	2	1	1	4	1	1	7	2	1
Dis	13	4	1	47	12	3	77	20	5
Rp	5	2	1	19	5	2	30	8	2
	El Cortijo								
pH	1	1	1	2	1	1	2	1	1
MO	5	2	1	18	5	2	29	8	2
K	23	6	2	82	21	6	135	34	9
Ca	130	33	9	472	118	30	782	196	49
Mg	54	14	4	197	50	13	326	82	21
Al	24	6	2	86	22	6	142	36	9
CIC	4	1	1	14	4	1	23	6	2
P	30	8	2	107	27	7	177	45	12
Fe	12	3	1	43	11	3	72	18	5
Mn	22	6	2	80	20	5	132	33	9
Zn	20	5	2	73	19	5	120	30	8
Cu	56	14	4	202	51	13	335	84	21
S	232	58	15	843	211	53	1398	350	88
B	134	34	9	487	122	31	807	202	51
A	1	1	1	4	1	1	6	2	1
Ar	1	1	1	4	1	1	6	2	1
Da	2	1	1	5	2	1	8	2	1
Pt	1	1	1	1	1	1	2	1	1
H	6	2	1	21	6	2	34	9	3
Ch	372	93	24	1351	338	85	2239	560	140
Ea	1	1	1	2	1	1	2	1	1
Dis	5	2	1	17	5	2	27	7	2
Rp	7	2	1	25	7	2	41	11	3

El análisis multivariado permitió la división de las propiedades químicas y físicas de las dos localidades en 7 grupos (Tabla 3). Los grupos fueron ubicados en un rango de confianza y error con un NMMS menor o igual a 20. En la mayoría de los casos las propiedades se agruparon de la misma forma en ambas localidades, a excepción de P, S, B y Ch, lo que llevó a seleccionar el mayor valor en el momento de asignar un grupo.

De la clasificación se tiene que las propiedades de los grupos 1 y 2 (pH, CIC, MO, A, Ar, Pt, Ea, Da, HG, Rp y Dis) (Figura 2) se pueden muestrear con un muy alto nivel de precisión y exactitud (confianza de

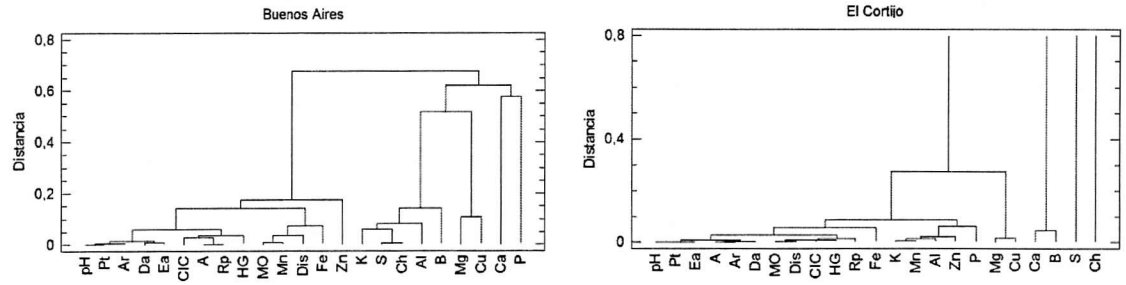


Figura 2. Análisis cluster para las variables físicas y químicas en las fincas El Cortijo y Buenos Aires.

Tabla 3. Grupos de propiedades químicas y físicas según confianza y error para un número mínimo de muestras simples.

Grupo	CV %	Confianza (%)	Error (%)	NMMS	Propiedad
1	≤ 10	95	5	10	pH, Ar, Pt, Ea, Da
2	$> 10 \leq 20$	95	10	10	MO, CIC, HG, A, Rp, Dis
3	$> 20 \leq 35$	90	10	20	Mn, Fe, Zn
4	$> 50 \leq 60$	95	20	20	Al
5	$> 60 \leq 70$	90	20	20	K, Cu, Mg
6	$> 70 \leq 90$	75	20	10	P, Ca, B
7	$> 110 \leq 150$	75	20	20	S, Ch

95% y errores de 5 y 10%) con un NMMS de 10. Las de los grupos 3, 4 y 5 (Mn, Fe, Zn, Al, K, Cu y Mg) se pueden muestrear con un alto nivel de precisión y un nivel entre alto y medio de exactitud (confianza del 95 y 90% y errores de 10 y 20%) con un NMMS de 20. Y las de los grupos 6 y 7 (P, Ca, B, S y Ch) se pueden muestrear con un nivel medio de precisión y exactitud (confianza 75% y errores de 20%) con un NMMS entre 10 y 20..

Como fue descrito por Wilding y Drees (1983), el CV es un parámetro que influye directamente en el cálculo del NMMS en función de una confianza y un error, razón que justifica que las propiedades con mayor incertidumbre como P, Ca, B, S y Ch se deban trabajar con niveles más bajos en precisión y exactitud (confianza 75% y error 20%), ya que con niveles más altos se requiere de un elevado NMMS, lo que genera un muestreo poco práctico debido a las implicaciones económicas y logísticas. Como se expresó anteriormente las propiedades Mn, Al, Ar, Dis y Rp para Buenos Aires y CIC, Al, Hg y Dis en El Cortijo, cumplieron con los supuestos de normalidad. El análisis de tendencia, aplicado a las variables con distribución normal, mostró para estas una tendencia espacial de segundo orden. Las variables restantes no se incluyeron en el análisis geoestadístico porque en su mayoría responden a una transformación Log (Log, ResLog) o residual, situación que según Wilding y Dress (1983) es riesgosa debido a que los datos toman valores positivos y negativos, haciendo que la media tienda a cero.

En el análisis estructural, la tendencia fue removida mediante la función "remover tendencia de segundo orden" en ArcGis, para dar continuidad con la elaboración de los semivariogramas, en los que se seleccionó el modelo con menor RMS, ASE, MS y un RMSS cercano a 1. Los valores de Nugget, Sill Parcial, Lag y tamaño de Lag fueron calculados automáticamente por ArcGis (

Tabla 4). El análisis estructural indicó que todas las propiedades se ajustan a un modelo de semivariograma esférico, exceptuando Al en El Cortijo que presentó un efecto Nugget puro, lo que significa que no hay correlación entre las muestras, cualquiera que sea la distancia que las separe (Nielsen y Wendroth 2003). En cuanto a la dependencia espacial, Ar presentó una dependencia espacial fuerte (menor a 25%), Mn y Dis en Buenos Aires y Hg en El Cortijo presentaron dependencia espacial media, y finalmente Al y Rp en Buenos Aires y CIC en El Cortijo presentaron dependencia espacial débil (mayor a 75%). Los ROM's fueron mayores en Buenos Aires, con valores entre 21.5 y 58.9 m, para Al y CIC, respectivamente, y en El Cortijo entre 16.3 y 25.2 m, para CIC y Dis, respectivamente. Las variables analizadas en ambos lotes no se comportaron de la misma forma, en el caso del Al se determinó un efecto Nugget en El Cortijo, situación que no se dio en Buenos Aires, y para Dis se tienen diferente ROM, pero iguales modelos teóricos (esférico) y

dependencia espacial (media). Los niveles de confianza fueron superiores al 90%, por lo que se estima que todos los modelos geoestadísticos son aceptados (confiabilidad mayor a 90%).

Tabla 4. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial.

Variable	Modelo	Sill parcial	Nugget	Rango (m)	RMS	Error máximo	Confianza	Nugget *100 / Sill total
			Buenos Aires					
Al	Esférico	0.007292	0.095365	21.5	0.341	0.1426	99.85	92.90
Mn	Esférico	2.789695	7.984069	43.2	3.207	2.5653	97.43	74.11
Ar	Esférico	11.05982	0.959683	25.1	2.597	4.0459	95.95	7.98
Dis	Esférico	0.058137	0.104549	51.6	0.365	0.3426	99.96	64.26
Rp	Esférico	0.000535	0.003373	58.9	0.065	0.0339	99.97	86.31
			El Cortijo					
Al	Nugget	0.000	0.113308	213.5	0.354	0.1683	99.83	100.00
CIC	Esférico	0.103263	12.048900	16.3	3.476	1.1975	98.80	99.15
HG	Esférico	22.862000	42.817690	19.2	7.817	5.6150	94.38	65.19
Dis	Esférico	0.087613	0.186365	25.2	0.489	0.4169	99.58	68.02

Los resultados a los que se llegó en este estudio coinciden con lo reportado en la literatura para Ar (Obando *et al.* 2006, Rodríguez *et al.* 2007, Peña *et al.* 2009), Hg y Rp (Siqueira *et al.* 2007), no obstante, para Hg y Rp se encuentran opiniones encontradas indicando una dependencia espacial media, ajustada a un modelo esférico y gaussiano para Hg (Lozano *et al.* 2004) y la no existencia de dependencia espacial para Rp (Peña *et al.* 2009). En el caso de CIC los resultados de este estudio no coinciden con lo reportado en la literatura, en la que señalan una fuerte dependencia espacial (Silva *et al.* 2008, Obando *et al.* 2006, Muñoz *et al.* 2006, Valbuena *et al.* 2007, Peña *et al.* 2009).

Debido a que solo fue posible analizar geoestadisticamente 7 de las 23 propiedades edáficas planteadas, no se establece la relación entre el NMMS y el ROM, situación que es muy común en este tipo de estudios debido a la variabilidad que genera el manejo agrícola de los lotes, alejándolo de las condiciones naturales originales (Webster 2008).

Agradecimientos. Al Comité Departamental de Cafeteros del Quindío, al Dr. Guillermo Zuluaga (director ejecutivo Comité Departamental de Cafeteros del Quindío), al Ing. Germán Huertas (extensionista), a los tecnólogos Anderson Artunduaga y Santiago Arango. A los caficultores propietarios y administradores de las fincas experimentales. A Cenicafé, a los investigadores científicos Argemiro Moreno, Hernán Gonzáles, Edgar Hincapié y Luis Fernando Salazar, al Sr. Arturo Gómez y colaboradores de la estación experimental Paraguacito.

REFERENCIAS

ACEVEDO DC, ÁLVAREZ ME, HERNÁNDEZ E, MALDONADO R, PÉREZ M, CASTRO R (2008) Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. TERRA Latinoamericana (Universidad Autónoma Chapingo México), 26(4): 317–324.

ALVAREZ R, STEINBACH HS, BAUSCHEN B, ENJALBERT J (2008) ¿Cuántas submuestras del suelo hay que tomar para caracterizar la fertilidad de un lote en La Pampa Ondulada? Informaciones Agronómicas del Cono Sur 37: 17–19.

ANGHINONI I, VOLKWEISS J (1984) Recomendações de uso de fertilizantes no Brasil. In: Anghinoni I.; Schlindwein J.; Nicolodi M. 2003. Manejo del fósforo en siembra directa en el sur de Brasil: Variabilidad de fósforo y muestreo de suelo. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 20–26 p.

ANGHINONI I, SCHLINDWEIN J, NICOLODI M (2003) Manejo del fósforo en siembra directa en el sur de Brasil: Variabilidad de fósforo y muestreo de suelo. Actas Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 20–26 pp.

BABALOLA O (1978) Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. Soil Sci. 126: 269–279.

BALL DF, WILLIAMS WM (1968) Variability of soil chemical properties in two uncultivated Brown Earths. J Soil Sci. 19:379–91.

BALL DF, WILLIAMS WM, HORNUNG M (1970) Variability of chemical properties in "uniform" soils. Welsh Soils Disc. Group, Rep. 11: 31 – 4.

CAMBARDELLA CA (1994) Fieldscale variability of soil properties in central Iowa. Soil Sci Soc AM J 58(5): 1501–1511.

CAMERON DR, NYBERT M, TOOGOOD JA, LOVERTY DH (1971) Accuracy of field sampling for soil test. Can. J Soil Sci. 58:165 –175.

CAMERON DR, NYBERT M, TOOGOOD JA, LOVERTY DH (1971) Accuracy of field sampling for soil test. Can. J Soil Sci. 58:165 –175.

CLINE MG (1944) Principles of soil sampling. Soil Sci. 58: 275 – 288.

CORA A, BACHMEIER OA (2006) Número mínimo de muestras necesario para un muestreo edáfico en el Chaco Árido de Córdoba (Argentina). Multequina, 15: 97–102.

INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO (ICA) (1992) Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación manual de asistencia técnica 64 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC) (1990) Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 5 ed. Bogotá: IGAC. 502 p.

KAMBLE KH, AGGRAWAL P (2011) Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones. International Journal of Geosciences. 2(4):585–596.

KEOGH JL, MAPLES R (1967) A statistical study of soil sampling of Arkansas alluvial soils. Arkansas Agric. Exp. Stn. Rep. Series 157p.

KRASILNIKOV P, CARRE F, MONTANARELLA L (2008) Soil Geography and Geostatistics. Concepts and Applications. JRC Scientific and Technical Reports, Chapter 1. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 204 p.

LOZANO Z, BRAVO C, OVALLES F, HERNÁNDEZ RM, MORENO B, PIÑANGO L, VILLANUEVA G (2004) Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. Bioagro, 16:61–72.

MATHERON G (1962) Traité de Géostatistique appliquée, tome 1 (1962), tome 2 (1963). Paris: Ed. Technip.

MUÑOZ JD, MARTÍNEZ LJ, GIRALDO R (2006) Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). Agronomía Colombiana, 24(2):1–16.

NIELSEN DR, WENDROTH O (2003) Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation. Reiskirchen: Catena Verlag GMBH, 398 p.

OBANDO FH, VILLEGAS AM, BETANCUR JH, ECHEVERRI L (2006) Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands arenoso de la región Andina Central Colombiana. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín, 59(1):3217–3235.

PATIÑO MA, SADEGHIAN S, MONTOYA EC (2006) Caracterización de la fertilidad del suelo de la zona cafetera del Valle del Cauca mediante registros históricos. Cenicafé, 57(1):7–16.

PEÑA R, RUBIANO Y, PEÑA A, CHAVES B (2009) Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia). Agronomía Colombiana, 27(1):111–120.

ROBERTS L, HENRY L (2000) El muestreo de suelos: los beneficios del buen trabajo. INPOFOS Cono Sur. Informaciones Agronómicas, 8:7–10.

SADEGHIAN KS, OCHOA WA, SUAREZ S (2003) Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. Cenicafé, 54(2):179–189.

SADEGHIAN KS (2008) Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Boletín técnico No 32, Chinchiná: Cenicafé 43 p.

SADEGHIAN KS (2010) Evaluación de la fertilidad del suelo para una adecuada nutrición de los cultivos. Caso café. XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Santo Domingo, Ecuador 17 – 19 noviembre. En línea http://www.secsuelo.org/XIICongreso/Simposios/Nutricion/ Magistrales/7.%20Siavosh%20Sadeghian%20-%20Evaluacion%20fertilidad%20cafe.pdf. (citado en 14 de mayo 2012).

SALAMANCA A, SADEGHIAN KS (2007) Efecto del uso y manejo sobre las propiedades físicas de algunos suelos de la zona cafetera colombiana. IX Escuela Latinoamericana de física de suelos ELAFIS. Ecuador.

SILVA FM, SOUZA ZM, FIGUEIREDO CAP, VIEIRA LHS, OLIVEIRA E (2008) Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. Ciência agrotécnica, Lavras, 32(1):231–241.

SIQUEIRA GM, VIEIRA SR, SOUZA ZM, DAFONTE J, PAZ A (2007) Utilización de herramientas estadísticas y geoestadísticas para optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo. In: Cervera, J.V.G. and Hornero, F.J.J. (eds) VIII Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, 173–178 p.

SWENSON LJ, DAHNKE WC, PATTERSON DD (1984) Sampling for soil testing. North Dakota State University, Dept. of Soil Sci., Res. Rep. No 8.

VALBUENA C, MARTINEZ L, GIRALDO R (2007) Variabilidad espacial de la fertilidad del suelo y el rendimiento en un cultivo de mango (Mangifera indica L.) localizado en la Mesa Cundinamarca. Semana Geomática, 2007. Colombia.

VILLEGAS AM, POSADA HE (2004) Agricultura de precisión (AP) aplicada en mejoramiento genético. un caso en café. Ponencia: Congreso de la Sociedad Colombiana de Fitomejoramiento y producción de cultivos.

WARRICK AW, NIELSEN DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field., Applications of soil physics, New York: Academic Press, Hillel, D. (Editors.) 319–344 p.

WEBSTER R (2008) Soil science and geostatistics. In: Krasilnikov, P.; Carre, F.; Montanarella, L. (Eds.), Soil Geography and Geostatistics. Concepts and Applications. JRC Scientific and Technical Reports, Chapter 1. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1–11 p.

WILDING LP, DREES LR (1978) Spatial variability: a pedologist's viewpoint. In: diversity of soil in the tropics. Soil Sci. Soc. Am., spec.34(1):1–12.

WILDING LP, DREES LR (1983) Spatial variability. In Pedogenesis and soil Taxonomy. I. Concepts and interactions, by L.P. Wilding, N.E. Smeck and G.F. Hall (Editors), 83 – 116.

ARTÌCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS POR EL CAMBIO DE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO: PÁRAMO DE QUIMSACOCHA AL SUR DEL ECUADOR

Pablo Quichimbo[1, 2] ✉, Gustavo Tenorio[1], Pablo Borja[1], Irene Cárdenas[1], Patricio Crespo[1], Rolando Célleri[1]

[1]Grupo de Ciencias de la Tierra y del Ambiente, DIUC, Universidad de Cuenca, Ecuador.
[2]Departamento de Ciencias Agropecuarias y de Alimentos, Escuela de Ingeniería Agropecuaria, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador.

✉: pabloquichimbo@yahoo.com

Palabras claves:

Páramo
Cobertura vegetal y uso del suelo
Pajonal
Andisoles
Histosoles

RESUMEN

El Páramo se constituye en uno de los ecosistemas más vulnerables al cambio ambiental global, dado fundamentalmente por las actividades del ser humano; a esto se suma, el desconocimiento de muchos de los procesos que se dan dentro de tal ecosistema; en este contexto, el efecto del cambio de cobertura y uso del suelo sobre las propiedades físicas y químicas, de los suelos de páramo fue el objeto de investigación de este trabajo. El estudio se llevó a cabo en una microcuenca ubicada en los páramos de Quimsacocha al Sur del Ecuador, en donde se evaluaron ocho tipos de cobertura y uso del suelo, correspondientes a: almohadillas, bosque montano alto, bosque de pino, bosque de polylepis, cultivo de papas, pajonal, pasto y pajonal quemado; definidos bajo treinta y seis sitios obtenidos por transectos de muestreo. En estos sitios se evaluaron las propiedades físicas y químicas de los suelos caracterizados según horizontes superficiales y subsuperficiales, en función de datos de campo y a toma de muestras tanto alteradas como inalteradas. Los resultados demostraron que los cambios de cobertura tuvieron lugar fundamentalmente sobre suelos Andisoles y en estos, las propiedades físicas a nivel de horizontes superficiales se ven afectadas frente a las actividades antrópicas. La modificación de las propiedades químicas fue más notable a nivel de horizontes subsuperficiales en donde dominan los procesos de iluviación.

EFFECTS ABOUT THE PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL PROPERTIES BY THE VEGETAL COVERAGE AND LAND USE CHANGE: PÁRAMO OF QUIMSACOCHA AT THE SOUTHERN ECUADOR

Keywords:

Paramo
Vegetal coverage and land use
Tussock grass
Andisols
Histosols

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 138-153

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

Páramo is one of the most vulnerable ecosystems to global environmental change due primarily to the human activities. Furthermore, the problem is aggravated for the ignorance of many of the processes that occur within that ecosystem. In this context, this study aimed to quantify the effects of the change in vegetal soil coverage and land use with respect to the physical and chemical properties of soils. The study was conducted in a watershed located in the Andean mountains of the south of Ecuador, Páramo of Quimsacocha , where, it was evaluated eight types of vegetal coverage and land use: cushion plants, upper montane forest, pine forest, polylepis forest, potatoes crops, tussock grasses, extensive grazed and burned tussock grass. They were defined in thirty six observation sites by transect sampling. In these sites were evaluated physical and chemical properties of soils characterized according to surface and subsurface horizons, based on field data sampling and taking of disturbed and undisturbed samples. The results showed that changes in coverage have occurred basically on Andisols and within these soils were affected the physical properties at the level of surface horizons due to the anthropogenic activities (cultivation and forest plantations). Modification of the chemical properties was most visible at the level of subsurface horizons, where illuviation processes are dominating.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

El suelo al ser la capa más superficial de la corteza de la Tierra y al posibilitar la vida terrestre, es la interfase entre la litósfera y la atmósfera por la asimilación de la energía y también interactúa fuertemente con la biósfera e hidrósfera, constituyéndose en uno de los mayores componentes de todo el ecosistema terrestre y como el más básico de todos los recursos naturales (Lal & Shukla 2004, Smeck & Lee Burras 2006). En este contexto, para la superficie de la Tierra, el uso del suelo y los cambios en su cobertura, al menos por varias décadas más, van a seguir siendo los componentes más importantes del cambio a nivel global (Douglas 2002). El cambio en la cobertura y uso del suelo por lo tanto tiene serias implicaciones en el equilibrio general de los ecosistemas y dentro de una perspectiva eco-pedológica, el suelo al ser un subsistema de los ecosistemas terrestres, también muestra impactos ante estos cambios, constituyéndose así, en uno de los subsistemas cuya estructura y funcionalidad son menos conocidas (Zapata 2002).

La relación entre las funciones del suelo y el uso de la tierra se ha perdido en cierta medida (Bouma 2006) y en donde los aspectos de la cobertura y los cambios del uso del suelo agrupados en dos grandes categorías: conversión y modificación (Douglas 2002), tienen al ser humano como actor principal, dado por una población creciente que demanda de estándares de vida más elevados, lo que acelera la presión sobre los recursos naturales (Keddy 2007) afectando a los servicios y funciones de los ecosistemas en general (Farley 2007; Lambin *et al.* 2001).

En el Ecuador, un porcentaje significativo de la población (aproximadamente el 45% de la población total) vive en los Andes, región conocida como Sierra (INEC 2012); en esta región se dan unos de los más abruptos contrastes ambientales (Brush 1982) y también en este espacio existe una fuerte presión por los recursos naturales.

Las partes altas de los Andes, enmarcadas dentro de las regiones tropicales alpinas húmedas, tienen a los Páramos como protagonistas por su gran importancia para sostener la biodiversidad, los procesos biológicos, almacenamiento de carbono y provisión de agua pero que pese a eso, también son unos de los ecosistemas menos estudiados y descritos en el mundo (Buytaert *et al.* 2011). En estos ecosistemas de altura, que en el Ecuador representan un 7 % (18434.77 km^2) de su territorio nacional (Beltrán *et al.* 2009), presentan características biofísicas y socioeconómicas particulares, cuyo estado de salud basado en el análisis de tales características, demuestran una situación heterogénea y donde los Páramos del centro y occidente son los más afectados por las actividades antrópicas (Mena 2008).

Las actividades del hombre sobre tales ecosistemas, han tenido mayor fuerza a partir de la época colonial con la expulsión de los aborígenes hacia la zona altas y que contemporáneamente ha tomado mayor impulso después de la reforma agraria a partir de los años sesenta (Podwojewski *et al.* 2002, Molinillo & Monasterio 2002, Ramón 2008), dichas acciones antrópicas tales como la deforestación, forestación, el avance de la frontera agrícola, el pastoreo en áreas inadecuadas o el sobrepastoreo, la construcción desordenada de infraestructura vial, entre otras (Podwojewski 1999, Buytaert *et al.* 2002, Buytaert *et al.* 2007a, Buytaert *et al.* 2009); están afectando, directa o indirectamente a los servicios y funciones de los ecosistemas que se desarrollan en estos espacios, en especial los servicios hidrológicos ambientales; estos últimos, de una manera especial ante un progresivo interés por el agua y su demanda creciente, han motivado iniciativas de implementación de esquemas para protección y conservación de cuencas altoandinas; lo que resalta aún más la importancia de estos ecosistemas Andinos (Célleri 2010).

Por lo tanto esta investigación plantea como objetivo principal el comprender las relaciones del comportamiento del suelo ante dichas actividades antrópicas reflejadas en los cambios de cobertura existentes dentro de tales ecosistemas y que contribuyan de alguna manera a un mejor entendimiento de los patrones que rigen tales cambios y que serían de interés para la adopción de nuevas políticas en torno a la gestión adecuada de ecosistemas de Páramo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio fue realizado en el Austro ecuatoriano, en el espacio correspondiente a la microcuenca del río Zhurucay que vierte sus aguas hacia el Pacífico, esta microcuenca cubre un área aproximada de 13.92 km^2 (Figura 1). Presenta una pendiente promedio del 23 %, repartida dentro de una gradiente altitudinal que va desde los 3400 hasta los 3900 m s.n.m. La cobertura del suelo es relativamente no antropizada con especies endémicas, típicas de los ecosistemas húmedos de altura andinos (Hofstede *et al.* 2003) y que se mencionan a continuación: pajonal (*Calamagrostis intermedia* (J. Presl) Steud.) y las almohadillas (*Azorella pedunculata* (Spreng) Mathias & Constance *y Plantago rigida* Kunth); en bosques de riberas la dominan las especies de *Polylepis incana* Kunth y *Polylepis reticulata* Kunth, sin embargo también estas

últimas se encuentran en las partes altas formando parches sobre el pajonal. En la franja del subpáramo se encuentran fragmentos de bosque siempre verde montano alto, localizados en la transición entre el bosque de neblina y el páramo, entre las especies predominantes del bosque se encuentran las del género *Weinmannia, Hedyosmum cumbalense* H. Karst y *Miconia tinifolia* Naudin, entre otras. A pesar de ser un ecosistema relativamente inalterado, en estas últimas décadas, las actividades agropecuarias en esta zona han empezado a ser practicadas con más intensidad caracterizadas por prácticas como las quemas controladas anuales, el pastoreo extensivo y la forestación con pino.

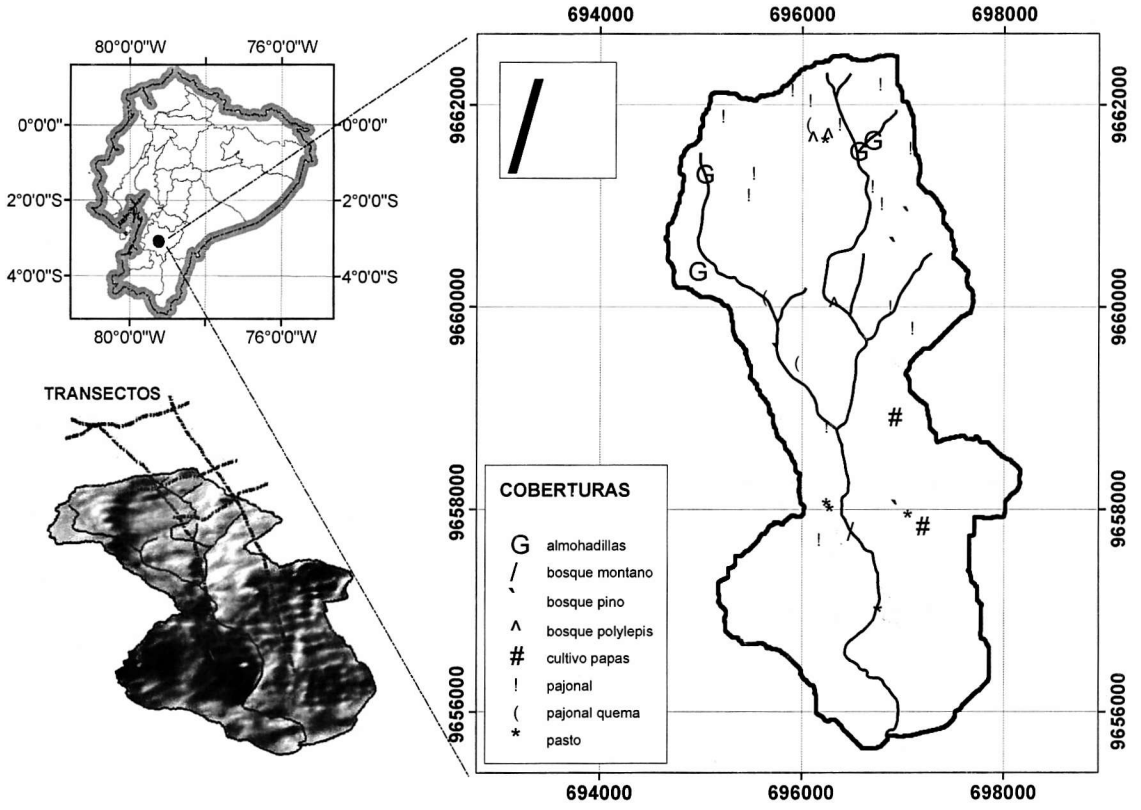


Figura 1. Ubicación geográfica y unidades de muestreo en el área de estudio.

El clima en esta microcuenca está influenciado por el régimen de la Costa del Pacífico al Oeste y por las masas de aire provenientes del Atlántico al Este (Vuille *et al.* 2000). El tipo de precipitación es bimodal, con temporadas de lluvias importantes de Diciembre a Febrero y una época de lluvias menos pronunciada en los meses de Agosto a Septiembre. De acuerdo al INAMHI la precipitación media anual está entre 900 a 1600 mm, calculada en base a un período de datos comprendido entre 1964-2008. Las intensidades de lluvia son bajas siendo en el 90 % de las veces menores a 10 mm h^{-1} (Buytaert *et al.* 2006a). Existe una temperatura media mensual 6°C y una humedad relativa promedio mensual de 90% (Iñiguez *et al.* 2008), con un gradiente promedio de 0.5 a 0.7°C por 100 m (Baculima *et al.* 1999). La radiación solar y la temperatura a lo largo del año son relativamente constantes, mientras que las variaciones diarias son bien marcadas y extremas. Mayor detalle a cerca del clima de la zona se puede encontrar en Buytaert *et al.* (2006a) y PROMAS/IAMGOLD (2009).

La geología corresponde a depósitos de rocas volcánicas y volcanoclásticas compactadas por la actividad glaciar durante la última edad de hielo (Coltorti & Ollier 2000, Hungerbühler *et al.* 2002). Su geomorfología está constituida por valles y llanuras accidentados, principalmente de formación glaciar; hay que mencionar la posible influencia del área de Bermejos al Norte del área de estudio, donde se localiza una extensa área de pantanos y turberas en lo que antes fue el cráter del volcán Quimsacocha (Borja *et al.* 2008). La parte Norte de la microcuenca pertenece a la formación Quimsacocha (Pratt *et al.* 1997), la cual consiste de flujos basálticos con plagioclasas, feldespatos y piroclastos andesíticos, mientras la parte Sur pertenece a la formación Turi

(Kennerley 1980) que consiste de brechas tobáceas andesíticas, conglomerados, flujos de escombros y arenas con estratificación horizontal. La edad es del Mioceno tardío para ambas formaciones (IAMGOLD 2006).

Los principales tipos de suelos en la microcuenca de estudio son los Andisoles, Histosoles y Entisoles. El clima húmedo-frío y la baja presión atmosférica característica de las zonas montañosas, favorece la acumulación de la materia orgánica y esto, conjuntamente con la acumulación de cenizas volcánicas y la geomorfología de la zona, son responsables para la formación de suelos negros, húmicos y ácidos, con una estructura porosa (FAO 2001). Los suelos de esta zona pertenecen a la cordillera occidental y están desarrollados sobre sedimentos del Cretáceo y del Mioceno temprano, sobre los cuales se han acumulado cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Sangay y Tungurahua, y por la distancia a ellos estos son menos profundos que los del Norte del país y altamente meteorizados (Buytaert *et al.* 2005, Buytaert *et al.* 2006b, Buytaert *et al.* 2007b) dando como resultado suelos con características particulares como son el alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente y elevada capacidad de retención de agua, pH bajo y disponibilidad baja de fósforo (Poulenard 2000, Buytaert 2004, Podwojewski & Poulenard 2006, Post 2006).

Muestreo de suelos

El muestreó no probabilístico (Poduri 2000), ha sido empleado en esta investigación a través de transectos: dos longitudinales siguiendo el corte altitudinal y tres transectos transversales, los cuales han sido diseñados garantizando que las unidades de observación correspondan a los tipos de uso y cobertura que han sido identificados como: almohadilla, bosque montano alto, bosque de pino, bosque de polylepis, cultivo de papas, pajonal, pasto y pajonal quemado. Siguiendo estos transectos se tomaron muestras de suelos tanto alteradas como inalteradas. Para tomar las muestras alteradas se consideró un área de 10 x 10 m alrededor del sitio seleccionado, las muestras tomadas diagonalmente fueron mezcladas para formar la muestra representativa del sitio, luego fueron almacenadas de manera que no se contaminen o entren en contacto con el aire y en un lugar fresco hasta ser analizadas en el laboratorio. Las muestras inalteradas se tomaron en anillos de Kopecky de 100 cm^3, dos anillos por cada horizonte. Para determinar la conductividad hidráulica saturada (Ks) se utilizó el método de pozo y pozo invertido (Kessler & Oosterbaan 1974); se realizaron tres repeticiones en cada sitio para cada horizonte identificado.

Análisis de laboratorio

La determinación en laboratorio para los parámetros químicos se menciona a continuación: el pH fue determinado en una relación suelo-agua de 1:2.5, mediante potenciometría. La acidez de intercambio se determina por titulación en una alícuota del extracto de cloruro de potasio 1 N, haciendo uso de fenolftaleina como indicador, titulado con una solución de NaOH 0.01 N. El contenido de materia orgánica (MO) fue determinado por Walkley and Black. El N en forma de nitrato fue determinado por el método del ácido sulfónico; el nitrógeno amoniacal se determinó por extracción con bicarbonato de sodio y la adición de fenol básico y cloretol, determinado por absorbancia en un colorímetro. Los sulfatos fueron extraídos con 2 M KCl y determinando su concentración por colorimetría. El contenido de fósforo fue determinado por colorimetría usando como extractante bicarbonato de sodio a un pH de 8.5. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue estimada usando el método de acetato de amonio (pH 7). La conductividad eléctrica (CE) fue determinada por extracto de agua en pasta saturada con el suelo mediante el uso del puente de salinidad de Wheatstone. Los cationes básicos Ca, Mg, Na y K son extraídos con solución de bicarbonato de sodio para luego determinarlos por absorción atómica. Los micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn, fueron extraídos por un agente quelatante EDTA, que es adicionado a la misma solución extractora de bicarbonato de sodio, para luego ser determinados por absorción atómica. El B es determinado mediante el método de la curcumina y leída su absorbancia en un colorímetro.

El contenido de humedad a saturación (HS) y capacidad de campo (CC) (potencial matricial de 10 kPa o pF 2.0) fueron medidas en muestras inalteradas usando el método de flujo de salida por etapas múltiples (van Dam *et al.* 1992), el punto de marchitez (PM) (potencial matricial de 1600 kPa o pF 4.2) fue estimado usando el aparato de membranas. La densidad aparente (DA) se estimó después de secar las muestras inalteradas por 24 horas a 105°C. La textura fue estimada usando el método de la pipeta (van Reeuwijk 2002), sin embargo, la oxidación de la MO con peróxido de hidrógeno (H_2O_2), previa a la dispersión de partículas con hexametafosfato de sodio ($(NaPO_3)_6$), ocasiona que la MO reaccione formando pseudoarenas y pseudolimos generando problemas en los resultados para suelos con alto contenido de MO (van Ranst *et al.* 1999), esta metodología usada por el

laboratorio limitó el uso de los resultados de textura para los horizontes orgánicos.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se realizó un análisis exploratorio de datos por medio de un Análisis de Componentes Principales normalizado, ACP, (Hotelling 1933) y un Análisis Discriminante, AD (Fisher 1936), para las variables siguientes: almohadilla (Al), bosque montano alto (BMa), bosque de pino (BPi), bosque polylepis (Bp), cultivo de papas (Cp), pajonal (P), pasto (Pa) y pajonal quemado (Pq); las mismas que se analizaron bajo 36 unidades de muestreo. Para efectos del análisis, se consideró una división de los datos de las unidades de muestreo bajo dos grandes grupos correspondientes a horizontes superficiales y subsuperficiales.

Para cada uno de estos grupos se aplicó el AD y ACP, con la finalidad de explicar la mayor variabilidad posible de los datos en función de proyecciones que maximicen las varianzas (Härdle & Simar 2007); para determinar la influencia del cambio de cobertura y uso del suelo sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los suelos de la zona de estudio

En el área definida, se han estudiado 36 pedones, en función de los transectos de muestreo en un rango de altitud comprendido entre 3400 a 3900 m s.n.m.; la influencia del material parental aerotransportado en estos paisajes les confiere a estos suelos características particulares que raramente se encuentran en suelos derivados de otros materiales parentales y que se reflejan fundamentalmente en sus propiedades físicas (Ollier 1988, Shoji *et al.* 1993, FAO 2001, Buytaert 2004, Buytaert *et al.* 2007b). Los pedones identificados corresponden a 25 pedones de Andisoles, 8 pedones de Histosoles y 3 de Entisoles. De los pedones muestreados, los correspondientes a los Andisoles, representan el porcentaje mayor (69%) y están repartidos bajo diferentes tipos de cobertura (excluyendo a las almohadillas y el bosque montano alto) lo que indica la dominancia de estos suelos bajo el área de estudio. Estos suelos se caracterizan por presentar propiedades ándicas con un alto contenido de MO, aproximadamente 310 g kg^{-1}, con una profundidad promedio de los horizontes con propiedades ándicas (Ah) de 44 cm y una densidad promedio de 0.4 Mg m^{-3}, con una abundancia de poros finos y muy finos de 51 – 200 por dm^2, la abundancia de las raíces muestra ser de 50 a 200 por dm^2 de un diámetro de las raíces < 2 mm; consistencia firme en masa de suelo húmedo. Presenta un color oscurecido (10YR1,7/1) (índice melánico menor a 1.7). Químicamente son suelos muy fuertemente ácidos, pH=4.7 y una acidez intercambiable de 5.27 $cmol_c$ dm^{-3}. Presenta una saturación de bases efectiva (SBE) del 36% y una CIC de 46 $cmol_c$ kg^{-1}.

Los Histosoles aparecen en menor porcentaje que los Andisoles, por lo contrario muestran rasgos zonales y están confinados a las partes bajas (pie de monte y fondo de valle), se caracterizan por la presencia de un horizonte hístico (H) de una profundidad promedio de 33 cm, con un alto contenido de MO, aproximadamente 440 g kg^{-1}, muestran las densidades más bajas que en promedio son de 0.21 Mg m^{-3}. Comúnmente se encuentra bajo las coberturas de Al y de Bp y los horizontes son de una coloración con un matiz de 5 a 10 YR (brillo y saturación superiores a dos en la escala de Munsell). La consistencia en húmedo es de muy friable. Químicamente son suelos categorizados como muy fuertemente ácidos (pH=4.8); muestran una acidez intercambiable de 2.54 $cmol_c$ dm^{-3}, una CIC de 16 $cmol_c$ kg^{-1} de suelo, una CICE de 5.5 $cmol_c$ dm^{-3} de suelo y una SBE de 52.4%.

Y en menor proporción se encuentran los Entisoles, repartidos en las partes medias y bajas de la topografía, localizados bajo coberturas de BMa, P y Pa. Se caracterizan por presentar densidades más elevadas 0.62 Mg m^{-3} y un menor contenido de MO del 230 g kg^{-1}, con relación a los otros suelos mencionados anteriormente y presenta una profundidad menor para su horizonte representativo (profundidad promedio: 30 cm).

Efectos del tipo de cobertura sobre la morfología y el desarrollo del perfil del suelo

La relación del tipo de cobertura con la geomorfología de la zona ha sido considerada en función del concepto de catena geomorfológica (Huggeth 2007), para lo cual se han definido tres unidades básicas geomorfológicas, en base a su posición dentro del paisaje: Baja (pie de monte y fondo de valle), Media (ladera) y Alta (cima). Encontrándose que la mayor variabilidad en cuanto a tipo de coberturas está definida para las posiciones baja y media del paisaje, en tanto que para las cimas la dominancia está dada para la cobertura tipo pajonal.

Bajo la hipótesis de que las actividades agrícolas y forestales están provocando cambios en las propiedades de los suelos; se realizó un análisis de las propiedades, empezando por las morfológicas, en donde se encontraron los resultados que se describen a continuación.

El horizonte Ah, característico en los suelos Andisoles, es dominante bajo la mayoría de tipos de

coberturas identificadas. Los horizontes minerales (A, Ah, Ap) dentro de la gradiente morfológica se encuentran a lo largo de toda la toposecuencia; es de resaltar la presencia del horizonte Ah en todas las unidades geomorfológicas; la presencia dominante de este tipo de horizonte, está condicionada fuertemente a la deposición de material tipo Tephra del Holoceno de la actividad volcánica del Cuaternario (Coltorti & Ollier 2000; Hungerbühler *et al.* 2002; Buytaert *et al.* 2007b). En las partes bajas de la secuencia morfológica sobresalen los horizontes H con gran contenido de materia orgánica correspondientes a las coberturas almohadillas y bosque de polylepis, lo que es de esperarse pues la topografía es determinante para la acumulación de la materia orgánica ya que a menudo su acumulación es favorecida en las partes bajas de los relieves (Quideau 2006).

Con relación a la profundidad de los horizontes superficiales, los horizontes superficiales minerales (A, Ah y Ap) tienden a ser de mayor profundidad (43 cm) en comparación a los horizontes superficiales orgánicos (34 cm), sin embargo dentro de una comparación de la profundidad total del perfil del suelo, los suelos orgánicos confinados a las coberturas de bosque de polylepis y almohadillas son más profundos que los minerales (minerales: 62.17 cm; orgánicos: 75,43 cm), sugiriendo que la profundidad del suelo está en función de la topografía de la zona y también fortalecida por la actividad de la biosfera (Jenny 1941; Graham 2006; Karpachevsky 2006; Chesworth 2008).

Analizando la profundidad del suelo, se nota que las actividades antrópicas como la quema de pajonal pueden contribuir indirectamente a la disminución de la profundidad promedio del suelo frente a pajonales no intervenidos especialmente en su horizonte superficial (Ah_P: 45 cm; Ah_{Pq}: 35 cm), con relación a esto, Hofstede (1995) y Podwojewski & Poulenard (2006), afirman que la quema favorecería a un mayor pastoreo (por la obtención de pasto fresco) con la consiguiente compactación y promoviendo la aparición de superficies desnudas temporales, las cuales se vuelven receptivas a una degradación estructural del suelo y que sumado a la mayor absorción de la radiación solar de los suelos desnudos oscuros, contribuirían al secado del suelo y una repelencia de la superficie del suelo al agua, todo esto favorece la pérdida de las propiedades sobre todo físicas de los suelos lo que les vuelve más susceptibles a la degradación.

Resaltan también los suelos profundos bajo la cobertura Cp (80 cm de profundidad promedio), que se explicaría por el laboreo del suelo que contrario a la quema del pajonal, esta actividad contribuiría al aumento de la profundidad, ya que este cultivo requiere de suelos profundos, pero este aumento en la profundidad del suelo tendría un efecto benéfico de corto plazo porque la destrucción de la estructura del suelo es una de las mayores afecciones y estos suelos son muy propensos a cambios irreversibles de la estructura especialmente por la pérdida de materia orgánica (Buytaert *et al.* 2005, Podwojewcki & Germain 2005).

Las mayores profundidades se pueden observaron bajo la cobertura de Al con un promedio 67.00 cm y Bp con un promedio 86.67 cm, dado fundamentalmente por su posición fisiográfica y por la acción de la biota misma como principales factores formadores para estos suelos (Jenny 1941, FAO 2001, McGill 2007), los mismos que han evolucionado a partir de los Andisoles (Buytaert *et al.* 2005, Buytaert *et al.* 2007b), lo que se puede corroborar con la presencia de horizontes subyacente de tipo A con matriz de cenizas volcánicas. En el caso de la profundidad del suelo bajo la cobertura de BPi, a pesar de mostrarse como la más inferior frente al resto de coberturas, si éste análisis se hace con relación a la cobertura dominante en el área de estudio (P) y ante situaciones de similitud en condiciones topográficas, no se muestran diferencias significativas en cuanto a profundidad del perfil. En esto puede influir la adaptabilidad a la altitud de la especie, que al estar fuera del rango apropiado para su crecimiento ésta se ve afectada, manifestándose en un pobre desarrollo morfológico de la especie arbórea (Quichimbo 2008), lo que no podría influir sobre el desarrollo de la profundidad del suelo (profundidad promedio en posición de ladera: BPi: 55.3 cm, P: 57.0 cm).

Con relación a otras características morfológicas como la consistencia en húmedo, no se encontraron diferencias influenciadas por el tipo de cobertura, estás diferencias serían más bien inherentes al tipo de suelo, al igual que la porosidad (macroporosidad).

Efectos sobre las propiedades hidrofísicas y químicas de los suelos

Efectos sobre los horizontes superficiales

Los horizontes superficiales muestran una profundidad promedio de 41 cm (rango: 20 - 66 cm). El AD muestra que el cambio de cobertura influye sobre las propiedades de los suelos, la prueba de Lambda de Willks-Rao confirma que existen diferencias significativas (nivel de significación α=0.05) entre las propiedades de los suelos para los diferentes tipos de coberturas.

La Figura 2, muestra que para aproximadamente el 71% de la varianza explicada por las funciones discriminatorias, existen cinco grupos: aquellos que pertenecen a las coberturas de: Pa, Al, BMa y Bp que presentan mayor variabilidad en cuanto a las

propiedades inherentes al suelo y que se diferencian del resto de coberturas (P, Pq, BPi y Cp), estas últimas dentro de su conjunto muestran un solapamiento de sus elipses de varianza interna de los datos para cada tipo de cobertura, lo que demuestra que muchas de sus propiedades son más comunes que las primeras coberturas nombradas.

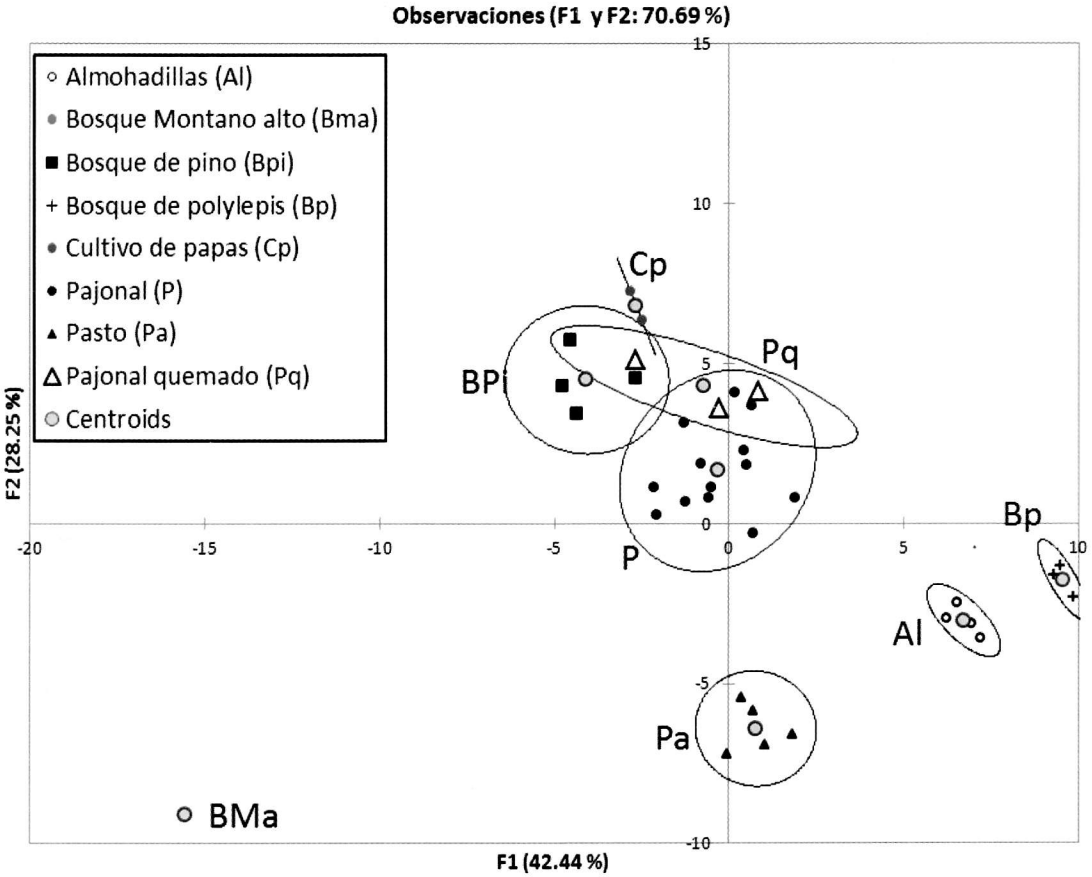


Figura 2. Diferencias entre los tipos de cobertura en función de la varianza de las propiedades de las observaciones muestreadas (70.69% de la varianza explicada).

Para explicar estas diferencias entre coberturas, se aplicó el ACP para dichos horizontes, que proyecta la incidencia de cada una de las variables analizadas (propiedades hidrofísicas y químicas) para los suelos de la zona de estudio. El análisis se desarrolló bajo la premisa de que, aunque todas las variables originales entran en la composición de cada componente principal, algunas son más importantes que otras, y estás, las más importantes determinan la naturaleza de cada uno de los componentes escogidos para el análisis (Härdle y Simar 2007). El ACP aplicado al grupo de horizontes superficiales está basado en el análisis del criterio gráfico (Jolliffe 2002) y que bajo un análisis de correlación entre las variables estudiadas, ha determinado tres componentes principales: C1, C2 y C3 representativos para este análisis y en función de ellos se explica el 65% de la variabilidad total de los datos.

Del ACP se tiene que el componente C1 (34.44 % de la variabilidad total) está altamente correlacionado con las propiedades hidrofísicas del suelo: DA, CC, PM, HS y más el contenido de MO y en menor porcentaje con algunas propiedades químicas como: conductividad eléctrica, nitrógeno y potasio.

Tabla 1. Características físicas según coberturas de los horizontes superficiales.

Cobertura	Prof. (cm)	Ks (cm h^{-1})	D.A. (Mg m^{-3})	HS (m^3 m^{-3})	CC (m^3 m^{-3})	PM (m^3 m^{-3})
almohadillas	33,25	0,50	0,11	0,87	0,86	0,15
bosque montano	30,00	10,84	0,62	0,65	0,63	0,41
bosque pino	46,50	3,73	0,51	0,74	0,70	0,46
bosque polylepis	37,33	2,07	0,43	0,79	0,77	0,38
cultivo papas	43,00	1,34	0,44	0,80	0,76	0,37
pajonal	44,93	1,53	0,43	0,80	0,77	0,43
pajonal quema	46,33	1,14	0,35	0,81	0,79	0,38
pasto	35,00	1,22	0,41	0,74	0,72	0,48

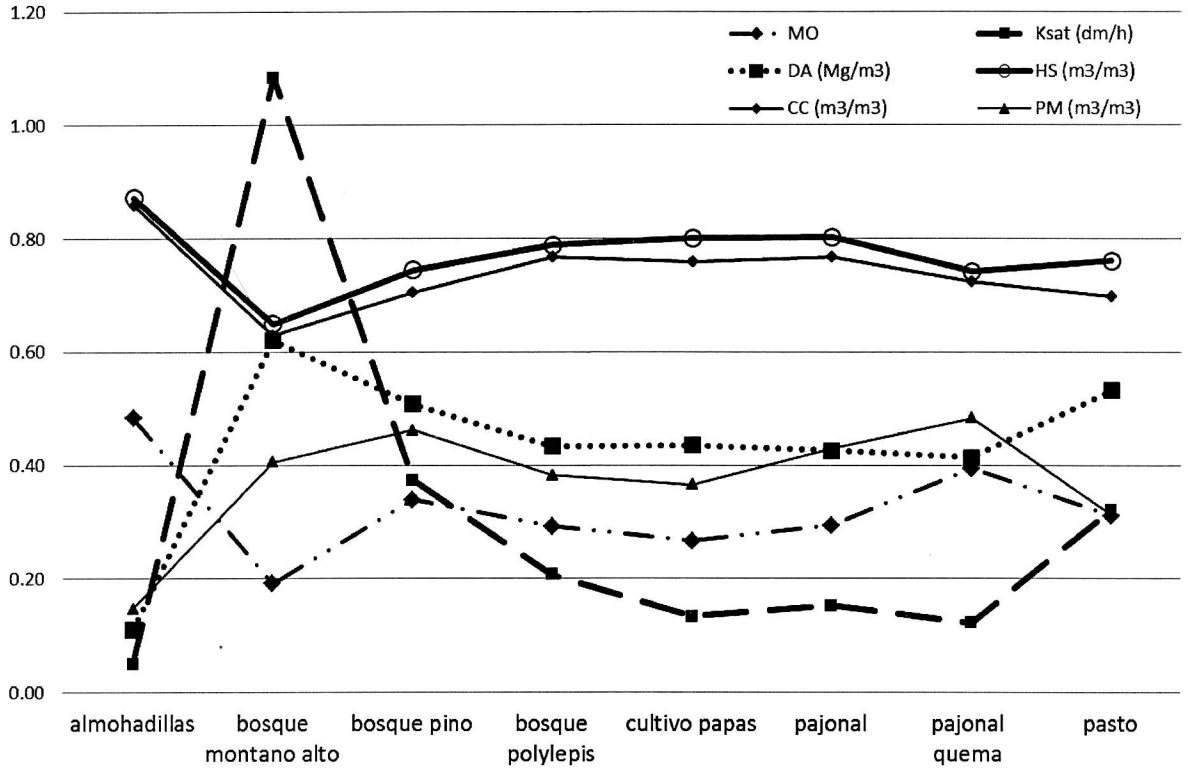


Figura 3. Influencia del tipo de cobertura sobre las propiedades hidrofísicas de los suelos a nivel de horizontes superficiales. MO expresada en relación adimensional (porcentaje/100).

El conjunto de todas las variables mencionadas aporta un 83.75 % a la variabilidad del C1, el 56% de esta última obedece a las propiedades hidrofísicas. En tanto que el componente C2, explica el 18.1 % correlacionado altamente con la saturación de bases en especial con el contenido de Ca y Mg, y con la Ks, en conjunto estas variables explican el 75.09% de la variabilidad de C2. El componente C3 que representa el 12.49% de la variabilidad total, estaría más identificado con el pH, Al+H y la CIC, estas tres variables explicarían el 52.83% de la variabilidad en C3. Según el ACP, el efecto de la cobertura sobre el contenido de fósforo no sería explicado por estos tres componentes, sin embargo este tendría un efecto del 2% a nivel de la variabilidad general (en componente 6 no analizado). Por lo tanto el ACP indica que las propiedades hidrofísicas son las fuentes de mayor variabilidad por el efecto del cambio de cobertura (Tabla 1) en los horizontes superficiales, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Hofstede (1995).

La profundidad promedio de los horizontes bajo análisis es de aproximadamente 38.6 cm. Las coberturas naturales: Al, Bp y P muestran contenidos de humedad más altos a HS y CC, se observa que las actividades antrópicas reflejadas en las coberturas de Pq, Cp, Pa y BPi, modifican el contenido de humedad en los niveles de HS y CC (Figura 3), lo que se

atribuiría a la disminución del contenido de M.O. la misma que determina de una manera crucial el comportamiento de retención de agua en estos suelos que inclusive es de mayor relevancia que el mismo contenido de alófana (Buytaert 2004). Se puede ver una disminución de la Ks en sitios de Cp y Pq frente a pajonales inalterados, lo que concuerda con los resultados de los estudios realizados por Poulenard *et al.* (2001), en donde se afirma de la reducción de la Ks ante cambios en el uso del suelo en las zonas de páramo.

En el caso de la cobertura BPi se puede observar un aumento en el contenido de MO (340 g kg^{-1} %) comparado con el contenido de la cobertura P (29 g kg^{-1}) lo que no corresponde al patrón general de disminución de la MO bajo coberturas de pino que alteran la composición química y microbial de los suelos, todo esto se traduce en la degradación física de los suelos dado por la pérdida de la MO (Hofstede *et al.* 2002, Farley 2007, Buytaert *et al.* 2007a). También se nota un aumento de la Ks, bajo BPi, 3.7 cm h^{-1}, lo que sugeriría la contribución del flujo preferencial y/o calidad de la MO, para dicho aumento ya que normalmente ante el incremento del contenido de MO se esperarían valores más bajos de Ks, sin embargo estos resultados pueden corroborar la disminución de la producción de agua bajo pino, dado por su flujo rápido en condiciones de saturación y por otro lado por el alto consumo de la especie (alta evapotranspiración) descrita por otros autores (Buytaert *et al.* 2007a, Crespo *et al.* 2010).

En el caso de Pa se observa una disminución del contenido de MO y un aumento en el valor de Ks valor que es más alto que el del P, lo esperado sería una reducción de la Ks por una reorganización superficial de los agregados en la superficie del suelos bajo labranza que se traduce en procesos de encostrado con superficies de muy baja conductividad (Poulenard *et al.* 2001).

En el caso de la DA de los suelos se observa un aumento bajo coberturas antrópicas en Pa, Cp y Bpi (promedio=0.49 Mg m^{-3}), frente al P y Bp (promedio=0.43 Mg m^{-3}) lo que influye en la capacidad de almacenamiento del agua.

En el caso del Pq se ve una disminución de la densidad (0.41 Mg m^{-3}) lo que se debe a que después de las quemas se promueve un secado del suelo (suelos desnudos) donde se produce una nueva estructura extremadamente rígida de alguna manera irreversible, y que hace que ante este aumento de la porosidad también lo haga la sensibilidad a la modificación de la arquitectura de los poros con la consiguiente pérdida de las propiedades de almacenamiento después del secado ya que se desarrollan superficies de repelencia al agua durante el secado (Podwojewski & Poulenard 2006, Hofstede 1995).

El caso de la cobertura tipo arbustivo BMa que presenta los valores más bajos de contenido de humedad a HS (0.66 m^3 m^{-3}), CC (0.60 m^3 m^{-3}) y PM (0.25 m^3 m^{-3}) y su alto valor de Ks de 10.84 cm h^{-1}, se lo puede atribuir a su bajo contenido de MO, lo que se refleja en la densidad aparente más elevada para los horizontes superficiales (0.62 Mg m^{-3}), hay que tener en cuenta también que este tipo de cobertura se halla en las altitudes más bajas del área de estudio y que de acuerdo a Zehetner (2003), existe una correlación negativa de la altitud con el contenido de carbono orgánico (MO) lo que influye directamente en todas las propiedades hidrofísicas de estos suelos que estarían más ubicados en la región de subpáramo húmedo que se caracteriza por el tipo de cobertura que es más arbustivo (Cañadas 1983), de todo esto deriva sus diferencias significativas con el resto de coberturas analizadas anteriormente.

En el caso de las propiedades químicas, la Tabla 2 resume su distribución según las coberturas analizadas.

Las propiedades químicas de los suelos bajo estudio se derivan principalmente de su material parental, que está constituido esencialmente de eyecciones volcánicas aerotransportadas (Tephras) y que se caracterizan por su rápida meteorización que resulta en altas concentraciones de Al, Fe y Si (alofana, imogolita y ferhidritas) (Ollier 1988, Arnalds 2008), sobre esta matriz están actuando las diferentes coberturas que de alguna manera influyen en las diferentes propiedades químicas de estos suelos y para los cuales se muestran los siguientes resultados.

La relación del pH con el tipo de cobertura, da a notar que hay una disminución del valor del pH con el cambio de cobertura, bajo la comparación de P (pH=4.90) frente a Pa, Cp, Pq y BPi (pH=4.65) esto puede darse por la extracción de bases por los cultivos y por el lavado de bases (Porta *et al.* 2003) lo que se ve reflejado en la disminución del porcentaje de SBE de las coberturas influenciadas por la actividad antrópica (SBE (%) : coberturas antrópicas = 29.71; pajonal= 36.9). En general las coberturas sin alteración (Al, P, Bp y BMa) tienden a mostrar un valor de pH ligeramente más elevado que las coberturas más antropizadas (pH=4.94).

Tabla 2. Características químicas de los horizontes superficiales según coberturas.

	almohadillas	bosque montano	bosque pino	bosque polylepis	cultivo papas	pajonal	pajonal quema	pasto
pH	4,88	5,30	4,73	4,70	4,30	4,90	4,80	4,78
CE ($dS\ m^{-1}$)	0,73	0,19	0,12	0,31	0,49	0,17	0,22	0,29
MO ($g\ kg^{-1}$)	483,83	191,00	339,33	292,37	266,75	294,04	394,17	311,40
C (%)	28,07	11,08	19,68	16,96	15,47	17,06	22,86	18,06
NT (%)	2,34	0,91	0,95	1,07	0,90	1,06	1,29	1,39
NH4 ($mg\ dm^{-3}$)	225,80	60,00	104,33	123,53	107,70	126,52	130,53	132,16
NO3 ($mg\ dm^{-3}$)	38,18	9,00	11,83	12,63	66,05	2,96	9,67	6,46
C/N (%)	12,67	12,17	21,09	15,24	17,39	16,35	18,64	13,70
P ($mg\ dm^{-3}$)	20,88	6,00	7,55	23,00	10,65	8,33	10,07	9,88
SO4 ($mg\ dm^{-3}$)	11,30	4,90	4,10	7,77	5,85	14,51	13,70	14,04
K ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,52	0,46	0,11	0,20	0,14	0,20	0,20	0,29
Ca ($cmol_c\ dm^{-3}$)	2,06	6,52	0,91	5,91	1,54	1,44	1,58	5,07
Mg ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,57	1,45	0,34	0,76	0,42	0,45	0,47	0,85
Na ($cmol_c\ dm^{-3}$)	0,18	0,04	0,03	0,07	0,06	0,05	0,03	0,05
Cu ($mg\ dm^{-3}$)	1,00	5,30	2,20	1,41	1,85	1,63	1,17	2,68
Fe ($mg\ dm^{-3}$)	3066,88	104,40	690,65	779,80	509,20	369,91	702,67	625,90
Mn ($mg\ dm^{-3}$)	858,10	65,20	44,50	25,77	6,60	11,73	5,27	14,26
Zn ($mg\ dm^{-3}$)	26,15	6,50	3,83	6,70	4,35	7,09	5,10	12,20
B ($mg\ dm^{-3}$)	0,05	0,01	0,01	0,14	0,41	0,05	0,01	0,09
Al+H ($cmol_c\ dm^{-3}$)	2,36	2,97	7,29	2,99	6,70	5,34	7,06	7,96
CIC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	14,10	52,00	49,50	33,07	48,00	39,03	49,33	50,40
CICE ($cmol_c\ dm^{-3}$)	5,68	11,44	8,68	9,92	8,85	7,48	9,35	14,24
SBE (%)	57,68	74,04	18,58	69,97	24,76	36,90	24,89	50,63

La CIC y CICE, muestra valores promedio por lo contrario más elevados para las coberturas antropizadas en comparación con las que no están muy influenciadas por las actividades del hombre (Figura 4), este efecto puede ser atribuido al aumento de la actividad de la materia orgánica que se libera de los complejos órgano-metálicos, pero que también se vuelve más susceptible a su descomposición y pérdida a largo plazo (Hofstede 1995, Hofstede *et al.* 2002).

La acidez intercambiable también se ve influenciada por el cambio de cobertura vegetal, se puede notar un elevado valor promedio para las coberturas que tienen influencia humana, Al+H = 7.25 $cmol_c\ dm^{-3}$ (Cp, BPi, Pq y Pa), frente a un valor de 3.42 de las coberturas no antropizadas (P, Al; Bp y BMa), esto sugiere que los iones de Al se liberan de las estructuras alofánicas (Jhonson-Maynard 2006), por una meteorización inducida por los cultivos lo que hace que el valor de la acidez intercambiable aumente (Tabla 4) con los problemas consiguientes de toxicidad para las plantas por el incremento de la actividad del Al^{3+} y del H^+ (Robarge & Wayne 2008).

El cambio de cobertura afecta también al contenido de N y de su estado; las coberturas antropizadas (Cp, BPi y Pq) estarían promoviendo procesos de oxidación, lo que se refleja en la disminución del valor de la relación amonio/nitrato (11,10) frente a coberturas inalteradas como P (relación amonio/nitrato=42.68); en las otras coberturas a pesar de tener relaciones amonio/nitrato bajas el contenido de amonio es superior a las coberturas antropizadas ($NH_{4\ antropizadas}$=118.7 $mg\ dm^{-3}$, $NH_{4\ no\ antropizadas}$=133.9 $mg\ dm^{-3}$) lo que da a notar la dominancia en estas coberturas (Al, Bp, BMa) de procesos primarios de mineralización del nitrógeno (Semoka 2008), reflejado en contenidos relativamente altos de MO lo que se da en ambientes húmedos como son los páramos y que son de mayor preponderancia en los suelos bajo cobertura de Al, donde la amonificación es muy notable por desarrollarse bajo condiciones de saturación.

En el caso del fósforo, se observa un ligero aumento de su valor bajo las coberturas alteradas (9.54 $mg\ dm^{-3}$) en relación con el pajonal (8.33 $mg\ dm^{-3}$), lo que se corrobora con la afirmación de Farley & Kelly (2004) sobre la poca influencia del cambio en la vegetación sobre el contenido del fósforo; también hay que mencionar que el contenido de fósforo sigue manteniéndose en proporciones bajas en relación con la disponibilidad para el desarrollo de los cultivos (Sanchez 2006).

Es importante también notar el ascenso considerable en el valor del contenido de hierro en la transición de pajonal a coberturas antropizadas (Pa, Cp y BPi) donde el hierro muestra casi el doble de su valor bajo antropización, la elevada concentración podría llegar a niveles de toxicidad y que está en función del descenso del pH que aumentaría su

solubilidad (Römheld & Nikolic 2007) al igual que la del manganeso que aumenta pero en menor proporción para las coberturas antropizadas (Pa, Cp, BPi y Pq).

Efectos sobre los horizontes subsuperficiales

Los horizontes subsuperficiales, muestran un espesor promedio de 30.6 cm (rango: 10 - 67 cm); el AD practicado también vislumbra diferencias en los tipos de coberturas bajo estudio, lo que es demostrado por la prueba de Lambda de Willks-Rao cuyo estadístico de prueba (p-valor<0.0001) afirma que existen diferencias significativas (α=0.05) entre los diferentes tipos de coberturas en función de sus propiedades para todas las observaciones. En la Figura 5, se puede apreciar la existencia de dichas diferencias (diferencias dadas en función de las distancias Mahalanobianas) para los tipos de coberturas; se resaltan las diferencias entre las coberturas tipo: Al, BMa y Bp distintas a las coberturas de Cp, Pa, P y Pq que se muestran más semejantes (menor distancia mahalanobiana entre ellos).

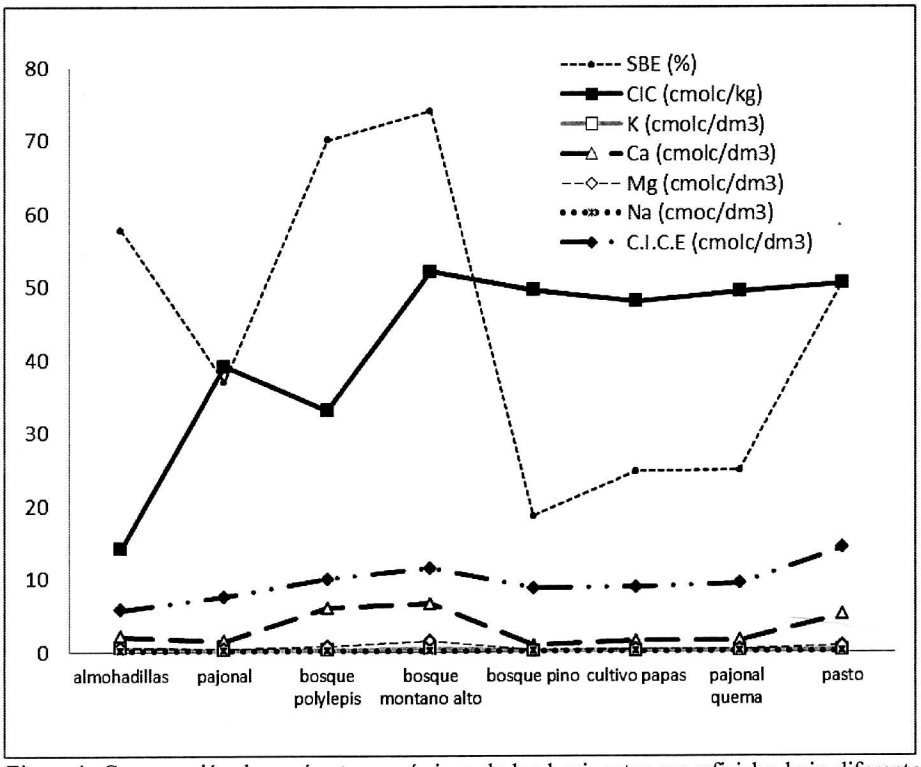


Figura 4. Comparación de parámetros químicos de los horizontes superficiales bajo diferentes tipos de cobertura del suelo dentro del área de estudio.

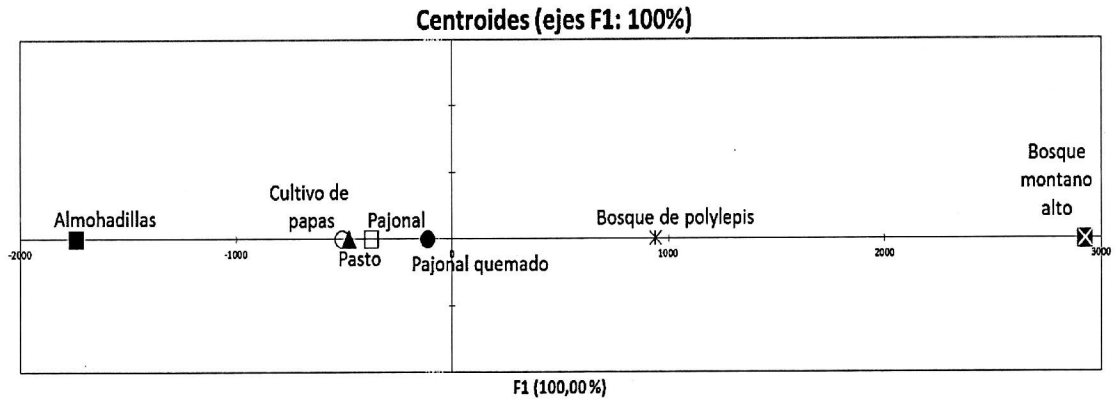


Figura 5. Diferencias en función del análisis discriminante entre los tipos de cobertura dadas por las propiedades de los suelos a nivel subsuperficial.

Para el análisis de las propiedades de los horizontes subsuperficiales, se eligió de igual manera un ACP bajo los tres primeros componentes que explicarían el 70.36% de la variabilidad total. El componente C1 para estos horizontes que representa aproximadamente el 40% de la variabilidad, tiene como mayores exponentes al Nitrógeno total, la CE, M.O., D.A, Na, P, HS, CC, Ca, Mg, K, y el pH, todas estas variables representan aproximadamente el 95% de la variabilidad explicada para este componente, el 35% de esta variabilidad corresponde a las propiedades hidrofísicas. Para el componente C2 (17.6%) el aporte a su variabilidad está dado por la S.B., en tanto que para el componente C3 (13.1%), el aporte representativo viene dado por la CIC y por la acidez intercambiable. Hay que hacer notar que la cobertura de pino, no tiene participación pues solo se tiene la presencia de un epipedón y debajo de este se encuentra directamente otro tipo de material parental bien consolidado.

Del ACP, se puede notar claramente que para el caso de los horizontes subsuperficiales, se tiene que la variabilidad dada por las propiedades hidrofísicas es menor que para los superficiales, lo que significaría que las propiedades químicas serían las más afectadas como lo revela el ACP.

En la Tabla 3, se presentan los valores para las propiedades físicas, de ella resalta la mayor capacidad de almacenamiento a HS y CC a nivel subsuperficial, esto se explicaría por la lixiviación de la materia orgánica lo que influye en la disminución del valor de la densidad promedio de los horizontes subsuperficiales ($D.A._{antropizado}$= 0.58 Mg m^{-3}; $DA_{no\ antropizado}$=0.85 Mg m^{-3}) en suelos bajo coberturas alteradas (Pa, Cp y Pq), también se puede notar la disminución de la Ks promedio bajo las coberturas de Pa, Cp y Pq.

Sin embargo, hay que considerar que la actividad en la rizósfera es determinante para la respuesta del suelo frente a los diferentes tipos de cobertura, ya que se constituye en una zona de flujo de agua y nutrientes y donde los procesos biogeoquímicos en general se vuelven muy activos (Porta *et al.* 2003), por lo que su mayor efecto estaría dado para los horizontes superficiales, en tanto que para los horizontes subsuperficiales la profundidad sería un limitante para el desarrollo de las raíces, esto ha llevado a que las propiedades hidrofísicas y químicas sean afectadas en menor grado.

En la Tabla 4, se muestran las propiedades químicas para los horizontes subsuperficiales. Una de las propiedades más importantes, y que sería la que más información da sobre el estado químico del suelo, es el pH, responsable de muchas otras propiedades y por ende de muchas de las reacciones biogeoquímicas (Porta *et al.* 2003, Grant 2006, Hossner 2008), para estos horizontes subsuperficiales se puede notar un ligero aumento del pH, a causa de las actividades ligadas a la agricultura (Cp y Pa) (pH=5.2), frente al de pajonal sin alteración (pH=4.89) esta ligera variación en el pH explicaría los cambios que se perciben en las otras propiedades químicas del suelo como el de la acidez intercambiable, cuyo valor promedio para aquellas coberturas antropizadas ha disminuido (4.33 $cmol_c\ dm^{-3}$) (pajonal=5.05 $cmol_c\ dm^{-3}$).

Se puede notar también una disminución de la CIC bajo las coberturas antropizadas a pesar del incremento del valor del pH, lo que normalmente no se esperaría (Sparks 2003), pero que se explicaría al considerar horizontes subsuperficiales en donde se observa la disminución de la MO mayormente responsable de la CIC en este tipo de suelos. También se puede notar un aumento de la CICE en la solución del suelo y que se debe a la mayor participación de la SBE (40%) en las coberturas alteradas de Pa y Cp lo que denotaría la mayor disponibilidad de nutrientes ante el aumento del pH (Urbano 1998) y una notable disminución de la capacidad tampón del suelo por la disminución del contenido de MO (Pinochet *et al.* 2005).

Es de resaltar el aumento del hierro, entre los tipos de cobertura alterado e inalterado, sin embargo considerando la profundidad no sería de mucha importancia como si sucede en los horizontes superficiales cuyo contenido de hierro a más de ser elevado, está más fácilmente disponible para la rizósfera.

Se puede notar también una disminución del porcentaje de SBE en las coberturas alteradas, lo que supondría una mayor extracción de estas bases por los cultivos, ya que el aumento del pH aumentaría la disponibilidad de los nutrientes; sin embargo la acidez intercambiable (Schaetzl & Anderson 2005) se ve aumentada lo que denota procesos de iluviación de bases en estos horizontes reflejándose también en el porcentaje de saturación de bases ligeramente más elevado.

Tabla 3. Características físicas de los horizontes subsuperficiales según coberturas.

Cobertura	Prof. (cm)	Ks (cm h^{-1})	D.A. (Mg m^{-3})	HS (m^3 m^{-3})	CC (m^3 m^{-3})	PM (m^3 m^{-3})
almohadillas	30,00	0,21	0,17	0,82	0,81	0,19
bosque montano	30,00	2,11	0,77	0,66	0,60	0,25
bosque polylepis	35,00	0,78	0,44	0,79	0,78	0,37
cultivo papas	37,00	1,32	0,85	0,66	0,61	0,35
pajonal	29,63	1,10	0,85	0,70	0,64	0,33
pajonal quema	22,50	0,60	0,43	0,74	0,73	0,28
pasto	30,00	0,49	0,45	0,80	0,78	0,20

Tabla 4. Características químicas de los horizontes subsuperficiales según coberturas

	almohadillas	*bosque montano*	*bosque pino*	*bosque polylepis*	*cultivo papas*	*pajonal*	*pajonal quema*	*pasto*
pH	4,88	5,30	4,73	4,70	4,30	4,90	4,80	4,78
CE (dS m^{-1})	0,73	0,19	0,12	0,31	0,49	0,17	0,22	0,29
MO (g kg^{-1})	483,83	191,00	339,33	292,37	266,75	294,04	394,17	311,40
C (%)	28,07	11,08	19,68	16,96	15,47	17,06	22,86	18,06
NT (%)	2,34	0,91	0,95	1,07	0,90	1,06	1,29	1,39
NH4 (mg dm^{-3})	225,80	60,00	104,33	123,53	107,70	126,52	130,53	132,16
NO3 (mg dm^{-3})	38,18	9,00	11,83	12,63	66,05	2,96	9,67	6,46
C/N (%)	12,67	12,17	21,09	15,24	17,39	16,35	18,64	13,70
P (mg dm^{-3})	20,88	6,00	7,55	23,00	10,65	8,33	10,07	9,88
SO4 (mg dm^{-3})	11,30	4,90	4,10	7,77	5,85	14,51	13,70	14,04
K ($cmol_c$ dm^{-3})	0,52	0,46	0,11	0,20	0,14	0,20	0,20	0,29
Ca ($cmol_c$ dm^{-3})	2,06	6,52	0,91	5,91	1,54	1,44	1,58	5,07
Mg ($cmol_c$ dm^{-3})	0,57	1,45	0,34	0,76	0,42	0,45	0,47	0,85
Na ($cmol_c$ dm^{-3})	0,18	0,04	0,03	0,07	0,06	0,05	0,03	0,05
Cu (mg dm^{-3})	1,00	5,30	2,20	1,41	1,85	1,63	1,17	2,68
Fe (mg dm^{-3})	3066,88	104,40	690,65	779,80	509,20	369,91	702,67	625,90
Mn (mg dm^{-3})	858,10	65,20	44,50	25,77	6,60	11,73	5,27	14,26
Zn (mg dm^{-3})	26,15	6,50	3,83	6,70	4,35	7,09	5,10	12,20
B (mg dm^{-3})	0,05	0,01	0,01	0,14	0,41	0,05	0,01	0,09
Al+H ($cmol_c$ dm^{-3})	2,36	2,97	7,29	2,99	6,70	5,34	7,06	7,96
CIC ($cmol_c$ kg^{-1})	14,10	52,00	49,50	33,07	48,00	39,03	49,33	50,40
CICE ($cmol_c$ dm^{-3})	5,68	11,44	8,68	9,92	8,85	7,48	9,35	14,24
SBE (%)	57,68	74,04	18,58	69,97	24,76	36,90	24,89	50,63

CONCLUSIONES

Los cambios de cobertura fundamentalmente se han dado sobre suelos Andisoles, en los cuales las actividades antrópicas expresadas bajo el uso agropecuario (pastos, papas y quemas) y forestal del suelo (plantaciones de pino), están provocando alteraciones en las propiedades de esos suelos.

Las coberturas de almohadillas y bosque de polylepis, no han sufrido procesos de antropización por lo que sus propiedades físicas y químicas no se han visto alteradas y presentan un desarrollo natural dominado por la acumulación de la materia orgánica.

La cobertura correspondiente a bosque montano alto refleja propiedades tanto físicas como químicas distintas a los otros tipos de coberturas, lo que estaría en función de su formación bioclimática (subpáramo húmedo) haciendo que difiera notablemente del resto de coberturas (en cuanto a propiedades del suelo se refiere).

Dentro de las coberturas antropizadas, el análisis de los horizontes superficiales y los subsuperficiales, permite notar el efecto del tipo de cobertura sobre las propiedades hidrofísicas en los horizontes superficiales, en tanto que para los horizontes subsuperficiales la afección obedece a cambios en las

propiedades químicas. Dentro de este contexto, la transición de pajonal a cultivo de papas, pasto, pino o la quema de pajonal, estarían disminuyendo el contenido de humedad en los puntos de saturación y capacidad de campo. De igual manera, la densidad aparente aumenta bajo condiciones antrópicas (pasto, cultivo de papas y bosque de pino) lo que afecta la capacidad de almacenamiento de agua de los suelos. Se concluye también, que las coberturas de papas y pajonal quemado disminuyen el valor de la Ks a nivel superficial, en tanto que ésta se ve aumentada bajo pasto y pino.

En cuanto a las propiedades químicas, a nivel superficial, las coberturas antropizadas de pasto, cultivo de papas y pino promueven la acidificación de los suelos por la disminución del porcentaje de saturación de bases diferenciándose de las coberturas sin alteración que muestran valores más elevados de pH. Se puede observar una disponibilidad mayor de nutrientes dado por el aumento de la CIC de los suelos antropizados y que se atribuiría a la liberación de la materia orgánica de los complejos órgano metálicos; pero esta mayor disponibilidad también se traduciría en pérdidas mayores por efectos de lixiviación y que se manifiesta en los horizontes subsuperficiales.

Todo esto corroboraría la importancia de los suelos de páramo como reguladores hidrológicos por sus características particulares en especial en lo referente a su retención de agua (Buytaert 2006; Podwojewski & Poulenard 2006; Buytaert *et al.* 2011); por lo tanto las propiedades hidrofísicas son las fuentes de mayor variabilidad dentro del cambio de cobertura en los horizontes superficiales, lo que concuerda con los resultados obtenidos por Hofstede (1995) concluyendo finalmente que la materia orgánica cumple un rol fundamental ya que influye de manera directa en el grado de estructuración del suelo, lo que se traduciría en valores de densidad más bajos y en un poder de retención de agua mayor para los suelos de páramo, pero también esta pérdida de la materia orgánica comprometería en un período relativamente corto el equilibrio químico de los suelos. En base a ello la pérdida de la calidad de la materia orgánica por procesos que aceleran su descomposición estaría en función del cambio de cobertura en estas zonas de páramo.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología del Ecuador que financió este estudio bajo el proyecto "Cuantificación de los servicios hidrológicos en cuencas alto-Andinas -Proyecto PIC-08-460, ejecutado por el Grupo CTA de la Universidad de Cuenca. Los autores agradecen a los técnicos y trabajadores que laboran en el proyecto Quimsacocha (IAMGOLD Ecuador S.A.) por las facilidades a la investigación y la asistencia en el muestreo.

REFERENCIAS

ARNALDS O (2008) Andosols, 39 - 46 pp. *In:* CHESWORTH W (ed) Encyclopedia of Soil Science. Springer Dordrecht, The Netherlands.

BACULIMA F, BACULIMA JC, BERMEO Y (1999) Caracterización de clima por microcuencas en el Austro Ecuatoriano. Tesis M.C. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cuenca. Cuenca (Ecuador). 120 p.

BELTRÁN K, SALGADO S, CUESTA F, LEÓN-YÁNEZ S, ROMOLEROUX K, ORTIZ E, CÁRDENAS A, VELÁSTEGUI A (2009) Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador. EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA, Quito (Ecuador), 15-54 pp.

BORJA P, IÑIGUES V, CRESPO P, CISNEROS P, CISNEROS F (2008) Carácterísticas físico - químicas de histosoles y andosoles de los páramos de Quimsacocha, Ecuador. *In:* Memorias XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. SECS. Quito (Ecuador).

BOUMA J (2006) Soil functions and land use, 211-222 pp. *In*: CERTINI G, SCALENGHE R (eds) Soils: Basic Concepts and Future Challenges. Cambridge University Press. Cambridge (UK).

BRUSH S (1982) The Natural and Human Environment of the Central Andes. Mt. Res. Dev. 2: 19 - 38.

BUYTAERT W, WYSEURE G, DE BIEVRE B, DECKERS J (2005) The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. Hydrol Process 19: 3985–3997.

BUYTAERT W, DECKERS J, DERCON G, DE BIEVRE B, POESEN J, GOVERS G (2002) Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. Soil Use Manage 18: 94-100.

BUYTAERT W, IÑIGUEZ V, DE BIÈVRE B (2007) The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. Forest Ecol Manag 251: 22 - 30.

BUYTAERT W, CÉLLERI R, DE BIÈVRE B, CISNEROS F, WYSEURE G, DECKERS J, HOFSTEDE R (2006) Human impact on the hydrology of the Andean páramos. Earth Sci Rev 79: 53–72.

BUYTAERT W (2004) The properties of the soils of the South Ecuadorian Páramo and the impact of land use change on their Hydrology. Belgium: PhD Dissertation. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Katholieke Universiteit Leuven.

BUYTAERT W, CUESTA-CAMACHO F, TOBÓN C (2011) Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. Global Ecol Biogeogr 20: 19-33.

BUYTAERT W, DECKERS J, WYSEURE G (2007) Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parental material, climate and land use. Catena 70: 143 - 154.

BUYTAERT W, DECKERS J, WYSEURE G (2006) Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). Geomorphology 73: 207 - 221.

BUYTAERT W, CÉLLERI R, WILLEMS P, DE BIÈVRE B, WYSEURE G (2006) Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. J Hydrol 329: 413 - 421.

CAÑADAS L (1983) Mapa bioclimático y ecológico del Ecuador. MAG - PRONAREG. Quito, (Ecuador) 210 p.

CÉLLERI R (2010) Estado del conocimiento técnicocientífico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes: Estado del conocimiento, la acción y la política para asegurar su provisión mediante esquemas de pago por servicios ambientales, 25-46 pp. IEP, CONDESAN, Lima (Perú).

CHACÓN G, GAGNON D, PARÉ D (2009) Comparison of soil properties of native forests, Pinus patula plantations and adjacent pastures in the Andean. Soil Use Manage 25: 427-433.

CHESWORTH W (2008) Landscape and soils, 427-431 pp. *In*: CHESWORTH W Encyclopedia of Soil Science. Springer Dordrecht, The Netherlands.

COLTORTI M, OLLIER CD (2000) Geomorphic and tectonic evolution of the Ecuadorian Andes. Geomorphology 32: 1-19.

CRESPO P, CÉLLERI R, BUYTAERT W, FEYEN J, IÑIGUEZ V, BORJA P, DE BIEVRE B (2010) Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March–2 April 2009). IAHS Publ. 336: 71 - 76.

DOUGLAS I (2003) Global land cover and land use trends and changes Vol 3: 13-15 pp. *In*: (eds) Encyclopedia of Global Environmental Change. John Willey & Sons, Manchester, United Kingdom.

FAO (2001) World Soil Resources Report No. 94: Lecture notes on the major soils of the world. FAO, Rome, Italy, 329 p.

FARLEY K (2007) Grasslands to Tree Plantations: Forest Transition in the Andes of Ecuador. Ann Assoc Am Geogr 97(4): 755–771.

FARLEY K, EUGENE K (2004) Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. Forest Ecol Manag 195: 281–290.

FISHER R (1936) The use of multiple measurements in taxonomic problems. Ann Hum Genet 7(2): 179-188.

GRAHAM R (2006) Factors of soil formation: topography, 151-164 pp. *In:* CERTINI G, SCALENGHE R (eds) Soils: Basic Concepts and Future Challenges. Cambridge University Press, New York, EU.

GRANT, THOMAS (2006) Ph, 1270-1274 pp. *In:* RATTAN L (ed) Encyclopedia of Soil Science. Cambridge University Press, New York. EU.

HÄRDLE W, SIMAR L (2007). Applied Multivariate Statistical Analysis. Springer. Berlín, Germany, 215-247 pp.

HOFSTEDE R, GROENENDIJK P, COPPUS R, FEHSE J, SEVINK J (2002). Impact of Pine Plantations on Soils and Vegetation in the Ecuadorian High Andes. Mt Res Dev 22 (2): 159–167.

HOFSTEDE R (1995) The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. Plant Soil 173: 111-132.

HOFSTEDE R, SEGARRA P, MENA P (2003) Los páramos del mundo: Proyecto atlas mundial de los páramos. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/Ecociencia, Quito, Ecuador, 300 p.

HOSSNER L (2008) Field pH. 271-272 pp. *In*: CHESWORTH W, (ed) Encyclopedia of Soil Science. Springer. Dordrecht, The Netherlands.

HOTELLING H (1933) Analysis of a complex of statistical variables into principal components. J Educ Meas 24: 417–441.

HUGGETH, RICHARD J (2007). Fundamentals of Geomorphology. Second Edition. Routledge, Taylor & Francis Group. Manchester, UK.

HUNGERBÜHLER D, OTROS (2002) Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. Earth-Sci Rev 52: 75-124.

INEC (2012). Censo Nacional de Población y Vivienda 2010. Recuperado el 5 de Mayo de 2012, de Resultados del Censo Nacional 2010: http://www.inec.gob.ec/cpv/

IÑIGUEZ V, BORJA P, CRESPO P, CISNEROS F (2008). Importancia de la Hidropedología en la determinanción de procesos hidrológicos a escala de ladera en zonas de páramo. XI Congreso de la Ciencia de Suelo. CECS, Quito.

JENNY H (1941) Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. New York, US.

JHONSON-MAYNARD J (2006) Allophanes, 72-74 pp. *In:* LAL R,(ed) Encyclopedia of Soil Sciences. Cambridge University Press. New York, EU.:

JOLLIFFE, I.T.(2002) Principal Component Análisis. New York, EEUU, Springer - Verlag New York Inc. 111-147 pp.

KARPACHEVSKY L (2006) Biota, 174 -178 pp. *In:* RATTAN L, (ed) Encyclopedia of Soil Science. Cambridge University Press ,New York, EU.

KEDDY P (2007). Plant and Vegetation: Origins, Processes, Consecuences. Cambridge University Press, New York, EEUU. 553-573 pp.

KENNERLEY J.B (1980) Outline of the geology of Ecuador. No 55. Overseas geology and mineral resources. London, UK. 17 p.

KESSLER J, OOSTERBAAN R.J. (1974) Determining hydraulic conductivity of soils. Drainage principles and application, IRLI, 16 (3): 255-295.

LAL R, SHUKLA M (2004) Principles of Soil Physics. Marcel Dekker Inc, New York. EEUU. 638 p.

LAMBIN E.F,OTROS (2001) The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. Global Environ Chang 11: 261–269.

MCGILL W. (2007) The Physiology and Biochemistry of Soil Organisms, 231 -257 pp. *In:* ELDOR A (ed) Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry. Academic Press, US.

MENA P. (2008) El estado de salud de los páramos en el Ecuador: alternativas interesantes y pronósticos complicados, 21-38 pp. *In:* MENA P (ed) Gente y Ambiente de Páramo: Realidades y Perspectivas en el Ecuador,otros. EcoCiencia-Abya Yala. Quito, Ecuador.

MOLINILLO M ,MAXIMINA M.(2002) Patrones de vegetación y pastoreo en ambientes de paramo. Ecotropicos 15(1): 19-34.

OLLIER C (1988) Volcanoes. Blackwell Pub, Oxford, UK, 345 p.

PODURI R (2000) Sampling Methodologies with Applications. Chapman & Hall/Crc, New York, 1-15 p.

PODWOJEWCKI P, GERMAIN N. (2005) Short-termeffects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cangahua) in Ecuador. Eur J Soil Sci, 56: 39–51.

PODWOJEWSKI P, POULENARD J, ZAMBRANA T, HOFSTEDE R (2002) Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the paÂramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). Soil Use Manage 18: 45-55.

PODWOJEWSKI, PASCAL (1999) Los Suelos De Las Altas Tierras Andinas: Los Páramos del Ecuador. Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo, SECS, Quito, Ecuador, 16 p.

PASCAL P, POULENARD J (2006) Paramos Soils. 1239-1242 pp. *In:* LAL R (ed) *Encyclopedia of Soil Science.* CRC Press Taylor & Francis Group, New York, EU.

PORTA J, LÓPEZ-ACEVEDO M, ROQUERO C. (2003) Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa, Madrid, España, 251-270 pp.

POST W.M (2006) Organic Matter: Global Distribution in World Ecosystems, 1216-1221 pp. *In:* LAL R (ed) Encyclopedia of Soil Science. Cambridge University Press, New York, EU.

POULENARD J (2000) Les sols de páramo de l'Équateur sur couverture pyroclastique: diversité, genèse et propriétés physiques. Université Henri Poincaré, CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), IRD (Institut de Recherche Pour le Développement), Nancy, France.

POULENARD J, PODWOJEWSKI P, JANEAU J.L, COLLINET J (2001) Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. Catena 45: 185-207.

PRATT W, FIGUEROA J, FLORES B (1997) Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 3°00' and 4°00'S. World Bank Mining Development and environmental Control Project, Quito, Ecuador, 58 p.

PROMAS/IAMGOLD (2009) Elaboración de la línea base en hidrología de los páramos de Quimsacocha y su área de influencia. Reporte técnico. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 68p.

QUICHIMBO P (2008) Caracterización y evaluación de los sistemas productivos de la microcuenca del río tabacay y la función del componente bosque (artificial) dentro de este contexto. Universidad de Cuenca, Tesis de pregrado, Cuenca, Ecuador 82 p.

QUIDEAU S (2006) Organic Matter Accumulation, 1172-1175 pp. *In*: LAL R (ed) Encyclopedia of Soil Science. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, EU.

RAMÓN G (2008) Conocimiento y prácticas ancestrales, 11-20 pp. *In*: MENA VÁSCONEZ *et al.* (eds) *Gente y Ambiente de Páramo:* Realidades y Perspectivas en el Ecuador. EcoCiencia-Abya Yala, Quito. Ecuador.

ROBARGE, WAYNE (2008) Acidity, 10-21 pp. *In*: CHESWORTH W (ed) Encyclopedia of Soil Science, Springer. Dordrecht, The Netherlands.

RÖMHELD V, MIROSLAV N (2007) Iron, 329-350 pp. *In*: BARKER A, PILBEAM D (eds) Handbook of Plant Nutrition. CRC Press. Taylor & Francis Group, New York, EU.

SANCHEZ, CHARLES (2006) Phosphorus, 51-90 pp. *In:* BARKER A, PILBEAM D (eds) Handbook of plant nutrition. CRC Press. Taylor & Francis Group, New York, US.

SCHAETZL, RANDALL J, ANDERSON S (2005) SOILS: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 347-461 pp.

SEMOKA J (2008) Nitrogen cycle, 491-494 pp. In: CHESWORTH W (ed) Encyclopedia of Soil Science. Springer, Dordrecht, The Netherlands.

SADAO S, DAHLGREN R, NANZYO M (1993) Genesis Of Volcanic Ash Soils. 37-61 pp. *In:* SADAO S, NANZYO M, DAHLGREN R (eds) Volcanish Ash Soil: Genesis, properties and utilization. Elsevier Science Publishers B.V, Amsterdam, The Netherlands.

SMECK, NEIL E, BURRAS C.L (2006) Soils in Time and Space, 1648-1652 pp. *In:* LAL R (ed) Encyclopedia of Soil Science. Cambridge University Press, New York, EU.

SPARKS, DONALD L (2003) Environmental Soil Chemistry. Second Edition. Academic Press, California, US, 157-205 pp.

URBANO T, PEDRO (1998) Tratado de Fitotecnia General. Mundi-Prensa, Madrid, España, 411-424 pp.

VAN DAM, J.C, STRICKER J.N.M, DROOGERS P (1992) Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments. Soil Sci Soc Am J 56(4): 1042-1050.

VAN RANST E, VERLOO M, DEMEYER A, PAUWELS J.M (1999) Manual for the Soil Chemistry and Fertility Laboratory. University of Gent, Gent, Belgium.

VAN REEUWIJK L.P (2002) Procedures for soil analysis. Sixth Edition. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen, The Netherlands, 360 p.

VUILLE M, RAYMOND S BRADLEY, KEIMIG F (2000) Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. J Climate 14: 2520-2535.

ZAPATA R (2002) Química de los procesos pedogenéticos del suelo. UNAL-Medellín, Medellín, Colombia, 88 p.

ZEHETNER F, MILLER W, WEST L (2003) Pedogenesis of Volcanic Ash Soils in Andean Ecuador. Soil Sci Soc Am J 67: 1797–1809.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

PROPIEDADES FÍSICAS E HIDROLÓGICAS DE SUELOS VOLCÁNICOS AFECTADOS POR INCENDIOS RECIENTES EN PATAGONIA, ARGENTINA

Morales D.[1, 2] ✉, La Manna L.[1, 2] y Rostagno M.[2, 3]

[1]Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico y Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
[3]Unidad de Investigación Ecología Terrestre, Centro Nacional Patagónico.

✉: dmorales@ciefap.org.ar

Palabras claves:

Austrocedrus chilensis
Fuego
Hidrofobicidad
Humedad equivalente
Materia orgánica

RESUMEN

Los incendios forestales ocasionan importantes impactos sobre el suelo ya que pueden consumir gran parte de la cobertura vegetal y materia orgánica, alterando su fertilidad física y régimen hidrológico. En este trabajo evaluamos algunas propiedades de los suelos de origen volcánico afectados por incendios recientes. Se seleccionaron dos áreas de estudio, correspondientes a bosques de Austrocedrus chilensis, ubicadas en las provincias de Chubut y Río Negro, Argentina, afectadas por incendios ocurridos en el 2008 y 2009, respectivamente. En cada sector se identificaron dos niveles de disturbio por fuego y un área control. Se determinó la tasa de infiltración y se tomaron muestras compuestas del suelo mineral a dos profundidades (0-2.5 cm y 2.5-5 cm) y se evaluó densidad aparente (DA), humedad equivalente (HE), textura, hidrofobicidad y materia orgánica (MO). El paso del fuego produjo una fuerte disminución en los contenidos de MO y HE en los suelos con un alto nivel de disturbio. El fuego aumentó la repelencia al agua, principalmente en los suelos afectados por el incendio más reciente, en los que se detectó una mayor hidrofobicidad en las muestras de 2,5 a 5 cm. Los máximos valores se registraron en los suelos con un alto nivel de disturbio correspondiendo a extremadamente hidrofóbicos. Contrariamente a lo esperado, el fuego no afectó significativamente la DA, infiltración y la textura de los suelos. La evaluación de las modificaciones en el suelo permite interpretar el impacto del fuego sobre la calidad de los suelos y la posterior recuperación de la vegetación.

PHYSICAL AND HYDROLOGICAL PROPERTIES OF VOLCANIC SOILS AFFECTED BY RECENT WILDFIRES IN PATAGONIA

Keywords:

Austrocedrus chilensis
Fire
Available water capacity
Hydrophobicity
Organic matter

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 154-161

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

Wildfire cause major impacts on the soil due the loss of vegetation cover and organic matter, altering physical and hydrological soil properties. We evaluated some properties of volcanic soils affected by recent fires. Two study sites with Austrocedrus chilensis forests were selected in Chubut and Río Negro provinces, Argentina, which were affected by fires in February 2008 and January 2009, respectively. In each site, two levels of disturbance by fire were identified and unburned soil was used as control. Infiltration rate was determined and samples of the mineral soil at two depths (0-2.5 cm and 2.5-5 cm) were randomly taken for bulk density (BD), available water capacity (AWC), texture, hydrophobicity and organic matter (OM) determinations. The results showed, one year after fire, decrease in OM and AWC in burned soils with high level of disturbance by fire. Hydrophobicity greatly varied, but tended to increase at 2.5-5 cm, mainly in the most recent wildfire. The maximum values were observed in the burned soil with high level of disturbance by fire, being extremely hydrophobic. The wildfire did not significantly affect the texture, bulk density and infiltration rate of soils. The evaluation of changes in physical and hydrological soils properties is useful to assess the impact of fire on soil quality and the subsequent recovery of vegetation. These changes may be very variable according to soil and climatic conditions and characteristics of fire.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

En la Región Andino Patagónica, la frecuencia e incidencia de incendios forestales han generado importantes daños sobre los bosques de la región. *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Sern & Bizarri, especie endémica de estos bosques, es una de las especies más afectadas por el fuego. En Argentina, se distribuye entre los 37°7' y 43°44' de latitud sur (Pastorino *et al.* 2006), abarcando una extensión de 141.000 ha (Bran *et al.* 2002).

El suelo es uno de los recursos más afectados luego del paso del fuego, éste puede consumir gran parte de la cobertura vegetal y mantillo orgánico, provocando importantes cambios en el suelo (DeBano 1990, Pritchett 1986).

Los impactos del fuego en el suelo pueden ser muy variables, dependiendo de la severidad y comportamiento del incendio, del contenido de humedad y del tipo de suelo (Certini 2005).

La disminución del contenido de materia orgánica a consecuencia del fuego afecta los procesos físicos e hidrológicos del suelo, ya que ésta actúa como cementante de las partículas, ocasionando una pérdida de la estructura. Esto a su vez genera cambios en la distribución del tamaño de poros y en la densidad aparente. La textura, fuertemente asociada a la estructura, también puede ser afectada por el fuego, principalmente en incendios de alta severidad (Ketterings *et al.* 2000). Todas estas modificaciones repercuten en la capacidad de retención de agua e infiltración del suelo, con el consecuente incremento de escorrentía y riesgo de erosión (Neary *et al.* 1999, DeBano 1990, Kennard & Gholz 2001).

La hidrofobicidad es otra de las variables que puede ser alterada por los incendios y afectar el comportamiento hidrológico del suelo. Esta propiedad es generada por la vaporización de sustancias orgánicas que, luego de condensadas, forman una capa repelente al agua (DeBano 1981). Diversos estudios establecen la asociación entre este fenómeno y la disminución en la tasa de infiltración, con un consecuente aumento del riesgo de erosión (DeBano 1990, Doerr *et al.* 2000, Shakesby & Doerr 2006).

En la región Andino Patagónica, los depósitos piroclásticos post glaciales constituyen los materiales originarios de la mayoría de los suelos de la región, incluyendo cenizas volcánicas, capas de lapilli, o bien depósitos de origen glacial contaminados con arenas volcánicas (Laya 1977, Ferrer 1981, Apcarian & Irisarri 1993). Estos suelos se caracterizan por la presencia de alófano. Esta arcilla amorfa les otorga a los suelos una buena fertilidad edáfica y aptitud forestal dado que presentan un alto porcentaje de materia orgánica, principalmente en el horizonte superficial, una elevada capacidad de intercambio catiónico y una gran capacidad de retención hídrica por su alta porosidad y baja densidad aparente (Irisarri & Mendia 1997). Podría esperarse que los impactos del fuego sean menos marcados en estos suelos; sin embargo algunos estudios realizados en bosques quemados de esta región evidenciaron importantes modificaciones edáficas como consecuencia del fuego (Alauzis *et al.* 2004, Kitzberger *et al.* 2005, Urretavizcaya 2010, La Manna & Barrotaveña 2011, Longo *et al.* 2011)

La evaluación de estas modificaciones permite interpretar el impacto del fuego sobre la calidad de los suelos y la posterior recuperación de la vegetación. El objetivo de este trabajo fue evaluar las características fisicoquímicas e hidrológicas de suelos forestales afectados por incendios recientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Se seleccionaron dos áreas de estudio correspondientes a bosques de *A. chilensis* en Argentina. Una de ellas se ubicó en el sudoeste de la provincia de Río Negro, dentro del área afectada por un incendio ocurrido en enero de 2009 en cercanías de la localidad de El Bolsón (41°51'34.2"S, 71°25'12.4"O), cuya superficie afectada fue aproximadamente 1900ha (SAyDS 2009). La otra área de estudio se ubicó en el noroeste de la provincia del Chubut, en cercanías del Parque Nacional Los Alerces (42°58'40.36"S, 71°30'53.04"O). El incendio se denominó La Colisión y ocurrió en febrero del 2008 afectando 6.000 ha aproximadamente (CIEFAP *et al.* 2008) (Figura 1).

En ambas áreas de estudio las precipitaciones son cercanas a 900mm (Cordon *et al.* 1993) concentradas principalmente en época de otoño e invierno. Los suelos son de origen volcánico clasificados como Humic Udivitrands.

La vegetación de esta área de estudio corresponde principalmente a un bosque *de A. chilensis* junto algunas especies representativas del sotobosque como *Maytenus chubutensis* (Speg.) Lourt., O'Don. et Sleum., *Lomatia hirsuta*(Lam.) Diels ex J.F. Macbr., *Schinus patagonicus* (Phil.) I. M. Johnst. y *Aristotelia maqui* (Mol.) Stuntz.

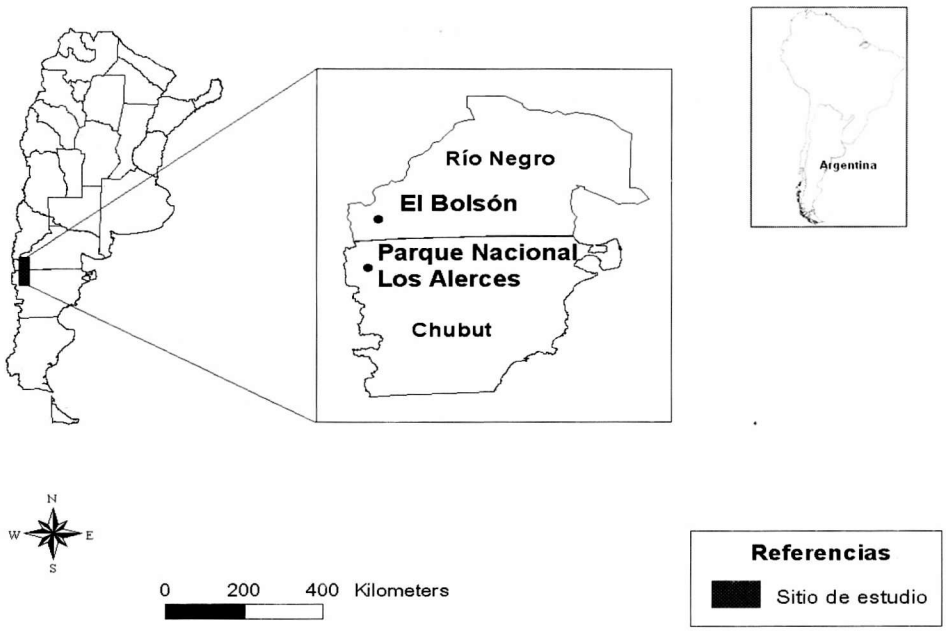


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de estudio

Diseño de muestreo

En cada área de estudio se seleccionó una ladera afectada por fuego con distintos niveles de disturbio (alto y bajo) y un sector no afectado por fuego (control). El nivel de disturbio fue definido de acuerdo a la presencia o no de mantillo orgánico remanente, color del suelo superficial, cobertura vegetal y árboles sobrevivientes (DeBano *et al.* 1998, Fisher & Binkley 2000).

En cada tratamiento se seleccionó un área de aproximadamente 200 m^2. Dentro de ella se evaluó la tasa de infiltración mediante un infiltrómetro de disco a tensión (Gil 2006) y se tomaron tres muestras compuestas a dos profundidades: de 0 a 2.5 cm y de 2.5 a 5 cm. La profundidad de las muestras fue establecida a partir del criterio de que las alteraciones producidas por los incendios son más evidentes en los primeros centímetros por estar directamente expuestos al calentamiento (DeBano 1990). Las muestras de suelos fueron secadas al aire y tamizadas por malla de 2 mm.

Se evaluó materia orgánica (MO) mediante el método de pérdida por ignición, Davies (1974), humedad equivalente (HE) mediante el método de Richards (1956), textura por el método del Hidrómetro Bouyoucos (1927), densidad aparente (DA) mediante muestras de suelo inalterado extraída con sacabocados e hidrofobicidad del suelo empleando soluciones acuosas con alcohol etílico en distintas proporciones MacDonald & Huffman (2004). Para su interpretación se utilizó la clasificación propuesta por Doerr *et al.* (1998) (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación del grado de repelencia al agua según el porcentaje de etanol.

Clase	Grado de repelencia	% Etanol
1	Muy hidrofílico	0
2	Hidrofílico	3
3	Ligeramente hidrofóbico	5
4	Moderadamente hidrofóbico	8.5
5	Fuertemente hidrofóbico	13
6	Muy fuertemente hidrofóbico	24
7	Extremadamente hidrofóbico	36

Extraída y modificada Doerr *et al.* (1998)

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante análisis de la varianza (ANOVA). Aquellas variables que no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad se analizaron mediante la prueba no paramétrica de Kruskall-Wallis y contrastes de a pares mediante la prueba de Comparación de Rangos Medios (Ramsey & Schafer 1997). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa InfoStat Statistical Package (Di Rienzo *et al.* 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los incendios forestales analizados produjeron variaciones en los contenidos de MO, HE e hidrofobicidad según los distintos niveles de disturbio. No se observaron diferencias significativas en los valores de DA, tasa de infiltración y textura.

Materia orgánica

El fuego provocó una disminución significativa del horizonte orgánico. Este cambio fue más notable en el incendio más reciente donde la pérdida fue total en los suelos con alto nivel de disturbio (Tabla 2).

El contenido de MO disminuyó en los suelos con una alta incidencia del fuego. De acuerdo a los valores de referencia de la región, todos los suelos presentaron valores altos de MO (La Manna *et al.* 2011). Los suelos con alto y bajo nivel de disturbio presentaron valores de MO que oscilaron entre 8.5 y 15%, mientras que los suelos control superaron en la mayoría de las muestras analizadas el 17%. En el incendio La Colisión las diferencias fueron más notables que en el incendio ocurrido en El Bolsón. (Figura 2a, 2b).

Tabla 2. Valores medios de espesor de mantillo orgánico. Letras distintas indican diferencias significativas ($p<0.05$).

	Mantillo orgánico (cm)		
	Nivel de disturbio		
Sitio	Alto	Bajo	Control
La Colisión	0.15(±0.08)a	1.3(±0.25)b	3.1(±0.48)c
El Bolsón	0 a	1.5(±0.30)a	3.75(±0.43)b

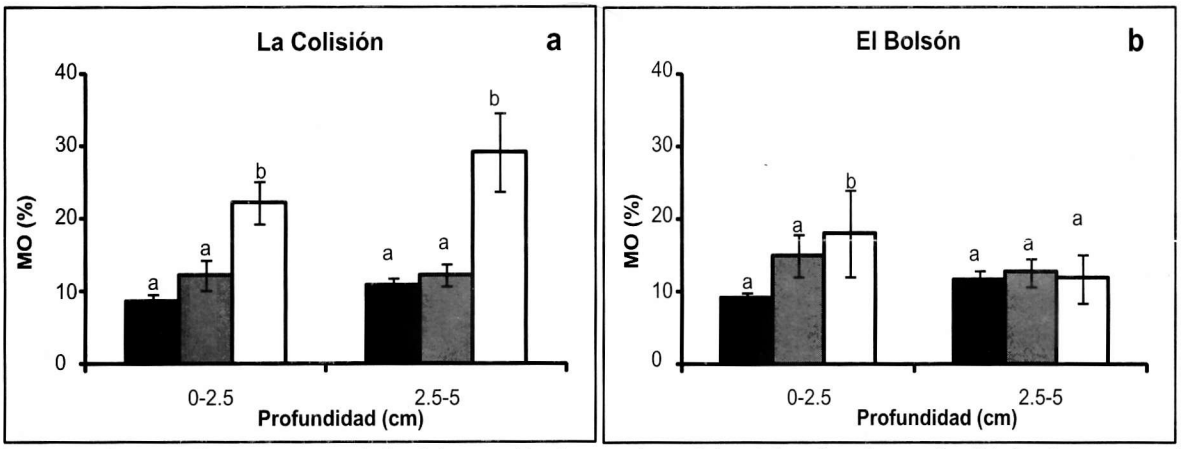


Figura 2. Valores medios y errores estándar del contenido de materia orgánica del suelo a dos profundidades de acuerdo a los distintos niveles de disturbio para La Colisión (a) y El Bolsón (b). Letras distintas indican diferencias significativas ($p< 0.05$). Referencias: niveles de disturbio ■ alto ■ bajo □ control.

La materia orgánica fue afectada en los primeros 5cm. En los suelos quemados, el porcentaje de MO fue significativamente menor con respecto a los suelos control. Normalmente el contenido de MO decrece después del fuego debido a pérdidas por combustión (Cochrane 2009). Dependiendo de la severidad del fuego, la materia orgánica puede sufrir diversos procesos como volatilización, carbonización o incluso una oxidación completa (Certini 2005). Las transformaciones y modificaciones más importantes de la materia orgánica ocurren en un rango de 220-460ºC (Giovannini *et al.* 1990).

Diversos trabajos han evidenciado la pérdida de materia orgánica luego de los incendios (Hernández *et al.* 1997, Litton & Santelices 2003, Urretavizcaya 2010). Sin embargo, una revisión de diversos estudios realizada por Johnson & Curtis (2001) les permitió concluir que existiría un efecto positivo a largo plazo de los incendios forestales, reflejado en un incremento en el contenido de MO del suelo. Este incremento significativo en el contenido de MO fue atribuido a una combinación de factores, incluyendo la incorporación al suelo mineral de los materiales orgánicos no quemados, a la transformación de la materia orgánica fresca a formas más estables y a la colonización de áreas quemadas por plantas fijadoras de nitrógeno.

Humedad equivalente

La HE se redujo significativamente en los suelos afectados por fuego respecto a los suelos control, exceptuando el horizonte de 0-2.5cm de El Bolsón (Figura 3a, 3b). En el incendio La Colisión, la disminución de HE fue más evidente, coincidiendo con la mayor pérdida de MO. En los suelos con alto

nivel de disturbio, la pérdida de retención hídrica, respecto al suelo control, varió entre 57% y 60%, mientras que en los suelos con bajo nivel de disturbio osciló entre 44% y 47%.

La destrucción de la vegetación y de la capa de mantillo altera sustancialmente las propiedades hidrológicas del suelo. Estas alteraciones en la materia orgánica disminuyen la intercepción de las precipitaciones y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y pueden condicionar el establecimiento y supervivencia de la vegetación, necesaria para la estabilización de los suelos, lo que puede resultar en un aumento de erosión, principalmente en los periodos secos (Neary *et al.* 1999).

Hidrofobicidad

Otra de las variables que influyen en el contenido de humedad del suelo es la hidrofobicidad. En nuestro estudio, si bien la repelencia al agua varió ampliamente en ambos incendios, tendió a incrementarse, como consecuencia del fuego, en el horizonte subsuperficial (Figura 4).

En el incendio más reciente, la hidrofobicidad fue significativamente mayor en los suelos con alto nivel de disturbio por fuego en las muestras de mayor profundidad (2.5 a 5 cm). Los mayores valores de hidrofobicidad alcanzados correspondieron al grado extremadamente hidrofóbicos (Figura 4a, 4b).

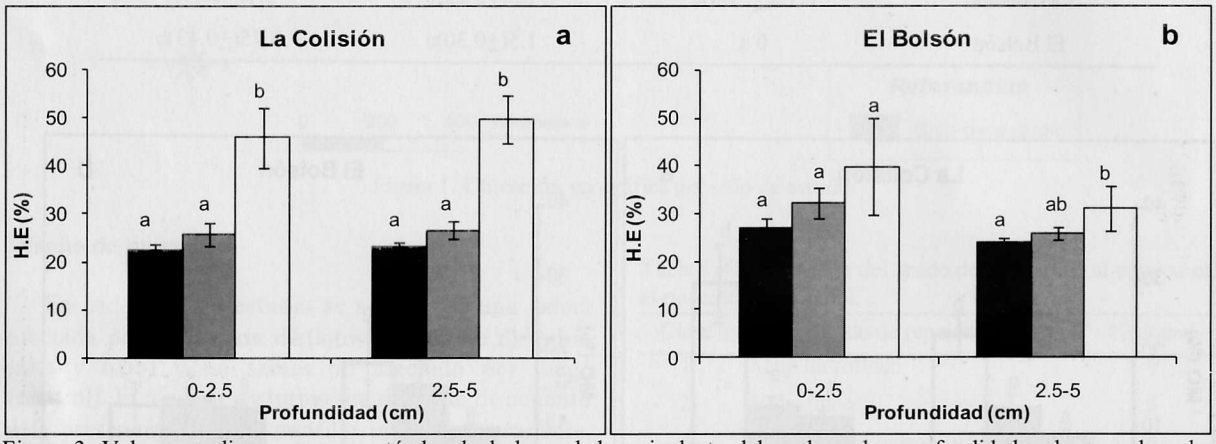


Figura 3. Valores medios y errores estándar de la humedad equivalente del suelo a dos profundidades de acuerdo a los distintos niveles de disturbio para La Colisión (a) y El Bolsón (b). Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Referencias: niveles de disturbio ■ alto ■ bajo □ control.

En contraste, en el incendio La Colisión, los suelos control de mayor profundidad mostraron una elevada repelencia al agua, siendo significativamente mayor respecto a los suelos afectados por fuego. La hidrofobicidad de los suelos control varió desde no hidrofóbicos hasta muy fuertemente hidrofóbicos. En los suelos afectados, si bien no se evidenciaron diferencias significativas entre ellos, pudo observarse una tendencia de mayor hidrofobicidad en las muestras de 2.5 a 5 cm (Figura 4d).

Según estudios previos, la repelencia al agua puede ser altamente variable tras los incendios forestales (DeBano *et al.* 1970). No todos los incendios son capaces de generar una capa hidrofóbica en el suelo ya que dependen de la capa del mantillo orgánico, de la intensidad del incendio, del periodo prolongado de calor intenso, de la textura y de la humedad del suelo, pudiendo ocasionar una máxima hidrofobicidad en la época seca y mínima o desaparecer durante la estación húmeda (DeBano 1981). A su vez, como la distribución de la ceniza producto de la quema no es homogénea, es común encontrar que las características que se vean afectadas por la adición de la ceniza también sean variables.

De acuerdo a nuestros resultados, la formación de una capa repelente luego de ocurrido el incendio, tuvo lugar principalmente por debajo de la capa más superficial. Después de que el fuego ha pasado, continua el movimiento del calor hacia abajo, a través del suelo, pudiendo volatilizar las sustancias hidrofóbicas que se encuentran en su interior, lo que resulta en la formación de una capa repelente al agua por debajo y paralela a la superficie del suelo en el área quemada (DeBano 2000).

Por otra parte, aún en los suelos no afectados por fuego también se evidenció una alta repelencia al agua, lo cual podría estar asociado a las características intrínsecas del material original de estos suelos (Jaramillo 2004). Los suelos que tienen poros grandes, tales como los suelos arenosos son más susceptibles a la formación de capas hidrofóbicas ya que transmiten el calor con mayor facilidad que aquellos con texturas más finas (USDA 2000). En la Región Patagónica, la mayoría de los suelos volcánicos presentan una alta

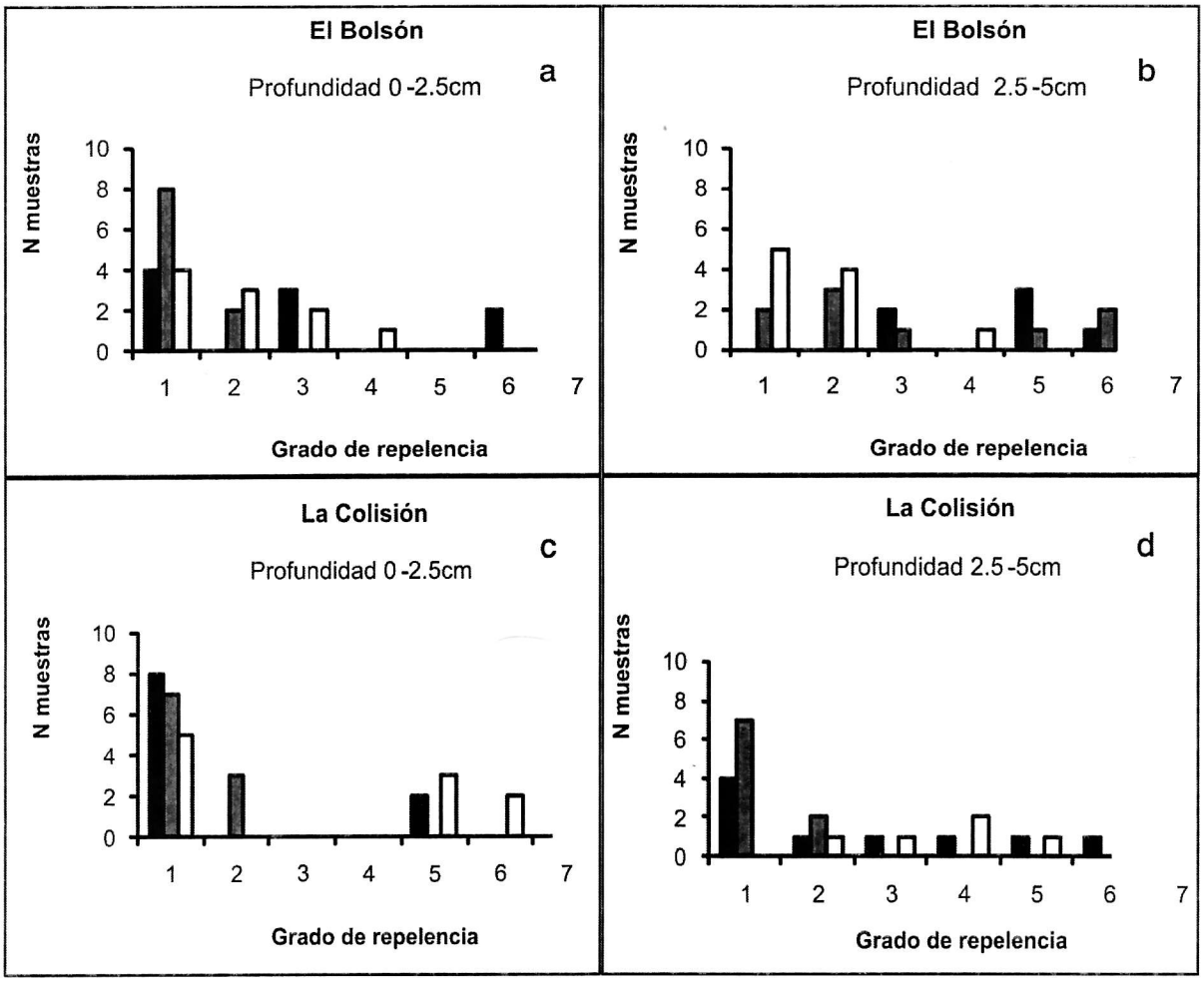


Figura 4. Grado de repelencia al agua según los distintos niveles de disturbio y profundidad en La Colisión y El Bolsón. Referencias: niveles de disturbio ■ alto ■ bajo □ control. Los valores del grado de repelencia se explicitan en la tabla 1.

macro-porosidad (Irisarri & Mendia 1997), por lo que quizás éste sea también un factor que contribuya a la formación de una capa hidrófoba en los suelos.

Tasa de infiltración

En nuestro estudio, a pesar que se observó la formación de una capa repelente al agua en los suelos, la tasa de infiltración no fue afectada significativamente luego del paso del fuego. Se observó una amplia variación en la tasa de infiltración. En los suelos afectados por fuego los valores variaron desde 0.9 cm h^{-1} hasta 10 cm h^{-1}, mientras que en los suelos de control los valores oscilaron entre 1.1 cm h^{-1} y 8.5 cm h^{-1}.

Algunos autores encontraron un comportamiento similar. Molina Terren (1993) menciona que una de las causas por las cuales no se observaron cambios en la tasa de infiltración en suelos quemados, fue debida a que las intensidades de fuego y consumo de combustibles no fueron elevados dado el alto contenido de agua en el mantillo orgánico del suelo. Estudios realizados en España tampoco evidenciaron diferencias en la tasa de infiltración en suelos afectados por incendios respecto a los suelos control (González-Pelayo *et al.* 2010).

Sin embargo, trabajos previos realizados en bosques de *A. chilensis* evidenciaron una disminución en la tasa de infiltración en los suelos afectados por fuego a partir de ensayos de lluvia simulada (Morales *et al.* 2010).

Textura

El fuego no afectó significativamente el tamaño de partículas de los suelos estudiados.

Los suelos presentaron textura franco arenosa, y esta textura se mantuvo en los suelos quemados con contenidos medios de arena de 58%, limo 36% y arcilla 6%. En los suelos control los contenidos

medios fueron: fracción arena 61%, limo 32% y arcilla 6%.

Similar resultado fue reportado por Arocena & Opio (2003). Esto podría estar asociado a que la intensidad y severidad del incendio no fueron tan elevadas. Las modificaciones en la textura han sido evidenciadas en algunos estudios cuando el suelo es sometido a temperaturas superiores a los 500°C en un largo periodo de tiempo, produciéndose la pérdida de grupos OH de las arcillas (Giovannini *et al.* 1988, Ketterings *et al.* 2000). En otros casos, los cambios en la textura ocasionados por el fuego resultan de forma indirecta, a partir de una eliminación selectiva de la fracción más fina del suelo por escurrimiento, dejando el suelo erosionado con una textura más gruesa (Shakesby 2011).

Densidad aparente

A pesar de que se observó una significativa pérdida del contenido de MO en los suelos afectados por fuego, esta disminución no se reflejó en la densidad aparente. Todos los suelos presentaron valores bajos de densidad aparente, con una media de 0.51 g cm^{-3} en el incendio ocurrido en el 2008 y de 0.61 g cm^{-3} en el incendio 2009. De acuerdo a los valores de referencia de la Región Andino Patagónica, aún en los suelos quemados, los valores de MO fueron adecuados, lo cual junto a la presencia de alófano, explicaría la baja densidad aparente de estos suelos (Irisarri & Mendia 1997).

CONCLUSIONES

Los impactos de los incendios recientes sobre las propiedades físicas e hidrológicas de los suelos volcánicos analizados fueron muy variables. Si bien el fuego provocó una disminución en los contenidos de MO, ésta se mantuvo en niveles altos, de acuerdo a los valores de referencia para estos suelos. Igualmente produjo una disminución en la humedad equivalente y un aumento en la hidrofobicidad, principalmente debajo de la capa del suelo superficial. Contrariamente a lo esperado, el fuego no afectó de manera significativa la textura, densidad aparente e infiltración de los suelos.

El conocimiento de estas modificaciones en los suelos, producidas por los incendios, es imprescindible para determinar los riesgos de erosión, pudiendo ser muy variables de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas y las características del incendio.

Agradecimientos. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto Picto FoncyT-agencia N° 36860.

REFERENCIAS

ALAUZIS M, MAZZARINO M, RAFFAELE E, ROSELLI L (2004) Wildfires in NW Patagonia: long term effects on a *Nothofagus* forest soil. Forest Ecology and Management.192: 131-142.

APCARIAN A, IRISARRI J (1993) Caracterización mineralógica de suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas en las provincias de Neuquén y Río Negro (R.A.). Actas II Jornadas de Vulcanología, Medio ambiente y Defensa Civil. Zapala, Neuquén. 23 p.

AROCENA J, OPIO C (2003) Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. Geoderma 113: 1–16.

BOUYOUCOS G (1927) The Hydrometer as new method for the mechanical analysis of soils. Soil Science 23:343-353.

BRAN D, PÉREZ A, BARRIOS D, PASTORINO M, AYEZA J (2002) Eco-región valdiviana: distribución actual de los bosques de "ciprés de la cordillera" (*Austrocedrus chilensis*) –Escala 1:250000. INTA, APN, FVSA. Bariloche.

CERTINI G (2005) Effects of fire on properties of forest soils: a reviews. Oecologia. 143: 1-10.

CIEFAP, DGByP, FIRE PARADOX, MIAG ESQUEL, PNLA (2008) Informe de base para la restauración post-fuego "Incendio La Colisión", PN Los Alerces, Esquel y Trevelin. 24p.

COCHRANE M (2009) Tropical fire ecology: climate change, land use, and ecosystem dynamics. Springer-Praxis Books in Environmental Sciences. Germany. 645 p.

CORDON V, FORQUERA J, GASTIAZORO J (1993) Estudio microclimático del área cordillerana del sudoeste de la Provincia de Río Negro. Universidad Nacional del Comahue. Cinco Saltos, Neuquén. 17 p.

DAVIES B (1974) Loss-on ignition as an estimate of soil organic matter. Soil Science Proceedings. 38, 150.

DeBANO L (1981) Water repellent soils: a state of the art. Gen. Tech. Rep. PSW-46. Berkeley, Calif.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn. 21 p

DeBANO L (1990) The effect of fire on soil properties. Symposium on Management and Productivity of Western-Montane Forest Soil, Boise, ID.

DeBANO L (2000) The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. Journal of Hydrology. 231–232: 195–206.

DeBANO L, NEARY D, FFOLLIOTT P (1998) Fire's effects on ecosystems. John Wiley y Sons, New York, New York, USA. 333p.

DI RIENZO J, CASANOVES F, BALZARINI M, GONZALEZ L, TABLADA M, ROBLEDO C (2010) InfoStat versión. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar.

DOERR S, SHAKESBY R, WALSH R (1998) Spatial variability of soil water repellency in fire-prone eucalyptus and pine forest, Portugal. Soil Science, 163:313-324.

DOERR S, SHAKESBY R, WALSH R (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. Earth-Science 51:33–65.

FERRER J (1981) Geografía y propiedades de los suelos de la Patagonia. Relatorio. Actas Primeras Jornadas de Suelos de Patagonia. Neuquén y San Carlos de Bariloche.

FISHER R, BINKLEY D (2000) Ecology and management of forest soils. Wiley, New York.489 pp.

GIL R (2006) Permeámetro de disco. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Boletín N° 418. Buenos Aires.

GIOVANNINIG, LUCCHESI S, GIACHETTI M (1988) Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. Soil Science, 146: 255-262.

GIOVANNINI G, LUCCHESI S, GIACHETTI M (1990) Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth, Soil Sci. 149 (1990) 344–350.

GONZÁLEZ-PELAYO O, ANDREU V, GIMENO-GARCÍA E, CAMPO J, RUBIO J (2010) Effects of fire and vegetation cover on hydrological characteristics of a Mediterranean shrubland soil. Hydrological Processes 24: 1504–1513.

HERNÁNDEZ T, GARCÍA C, REINHARDT I (1997) Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. Biology and Fertility of soils. 25: 109-116.

IRISARRI J, MENDÍA J (1997) Relaciones suelo-paisaje en la evaluación de la potencialidad forestal de la Región Central Andino Patagónica, Argentina. Bosque 18(1): 21-30.

JARAMILLO D (2004) Repelencia al agua en suelos con énfasis en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional Colombia sede Medellín. 204p.

JOHNSON D, CURTIS P (2001) Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. Forest Ecology and Management. 140: 227–238.

KENNARD D, GHOLZ H (2001) Effects of high- and low-intensity fires on soil properties and plant growth in a Bolivian dry forest. Plant and Soil. 234: 119- 129.

KETTERINGS Q, BIGHAM J, LAPERCHE V (2000) Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. Soil Sci. Soc. Am. J. 64:1108-1117.

KITZBERGER T, RAFFAELE E, HEINEMANN K, MAZZARINO M (2005) Effects of fire severity in a north Patagonian subalpine forest. Journal of Vegetation Science. 16:5-12.

LAYA H (1977) Edafogénesis y paleosuelos de la formación típica Río Pireco (Holoceno). Revista de la Asociación Geológica Argentina 32 (1): 6-23.

LA MANNA L, BARROTAVEÑA C (2011) Propiedades químicas del suelo en bosques de *Nothofagus antarctica* y *Austrocedrus chilensis* afectados por fuego. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo 43 (1):41-55.

LA MANNA L, BUDUBA C, IRISARRI J, FERRARI J, CREMONA M (2011) Los nutrientes del suelo en la Región Andino Patagónica: una aproximación a la interpretación de datos analíticos. Patagonia Forestal XVII (3): 7-8.

LITTON C, SANTELICES R (2003) Effect of wildfire on soil physical and chemical properties in a *Nothofagus glauca* forest , Chile. Revista Chilena de Historia Natural 76: 529-542.

LONGO M, URCELAY C, NOUHRA E (2011) Long term effects of fire on ectomycorrhizas and soil properties in *Nothofagus pumilio* forests in Argentina. Forest Ecology and Management. 262 (3): 348-354.

MACDONALD L, HUFFMAN E (2004)Post-fire soil water repellency: persistence and soil moisture thresholds. Soil Science Society of American Journal. 68: 1729-1734.

MOLINA TERREN D (1993) Efectos del fuego controlado en la velocidad de infiltración del agua en suelos forestales: Un caso de estudio en la costa norte de California. Investigación Agraria Sistema Recursos forestales. 2:2.

MORALES D, ROSTAGNO C, LA MANNA L (2010) Impacto del fuego sobre el comportamiento hidrológico del suelo en un bosque de ciprés. Patagonia Forestal, XVI (2):23-24.

NEARY D, KLOPATEK C, DEBANO L, FFOLLIOUTT P (1999) Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. Forest Ecology and Management 122: 51-71.

PASTORINO M, FARIÑA M, BRAN D, GALLO L (2006) Extremos geográficos de la distribución natural de Austrocedrus chilensis (Cupressaceae).Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 41: 307-311.

PRITCHETT W (1986) Suelos Forestales: propiedades, conservación y mejoramiento. Editorial Limusa, México D.C., México. 634 p.

RAMSEY F, SCHAFER D (1997) The Statistical Sleuth: a course in methods of data analysis. Duxbury Press, Belmond, USA. 742 p.

RICHARDS L (1956) Sample retainers for measuring water retention by soil. Soil Science Society of America Proceedings 20:301-303.

SAYDS (2009) Informe Áreas afectadas por incendios en la Región Andino Patagónica Provincias de Río Negro y Tierra del Fuego.

SHAKESBY R (2011) Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. Earth Science Reviews 105, 71-100.

SHAKESBY R, DOERR S (2006) Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. Earth-Science 74: 269–307.

URRETAVIZCAYA F (2010) Propiedades de suelos en bosques quemados de *Austrocedrus chilensis* en Patagonia, Argentina. Bosque. 31(2): 140-149.

USDA (2000) Preocupación acerca del recurso de calidad de suelos: Hidrofobicidad. Instituto de Calidad de Suelos del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de EE.UU. Washington. 2p.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

DENSIDADE, POROSIDADE E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO ASSOCIADO A TEMPOS DE IMPLANTAÇÃO DIFERENCIADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Roberta Jeske Kunde[1] ✉, Cláudia Liane Rodrigues de Lima[2], Renata Pinto Albert Alves[3], Clenio Nailto Pillon[4], Sérgio Delmar dos Anjos e Silva[4]

[1]Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS
[2]Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS
[3]Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS
[4]Pesquisador da Embrapa Clima Temperado, Pelotas-RS

✉: roberta_kunde@hotmail.com

Palavras-chaves:

Qualidade física
Estrutura do solo
Atributos físicos
Uso do solo
Saccharum officinarum

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade física, a partir da densidade, da porosidade e da resistência à penetração de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul, RS. As avaliações foram realizadas em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar há 1, 3 e 5 anos, em uma área experimental pertencente à Destilaria Grandespe em Salto do Jacuí, RS. Como sistema de referência adotou-se uma mata nativa. Foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0.00 a 0.05 m, 0.05 a 0.10 m e 0.10 a 0.20 m. Em todas as camadas os menores valores de densidade foram observados na mata nativa. Considerando, os diferentes tempos de implantação da cultura na camada de 0.05 a 0.20 m, os maiores valores de densidade foram verificados no solo cultivado há 5 anos. Os maiores valores de porosidade em todas as camadas foram encontrados no solo sob mata nativa e há 1 ano de implantação da cultura. Em todas as camadas, foram observados os maiores valores de resistência à penetração no solo cultivado há 5 anos, sendo estes superiores à 2 MPa que é considerado limitante ao desenvolvimento das raízes plantas. Os resultados sugerem que a densidade, a porosidade e a resistência à penetração podem ser utilizadas para orientar práticas de manejo adequadas, visando à manutenção de uma qualidade física do solo adequada ao crescimento de raízes e à produtividade agrícola.

BULK DENSITY, POROSTY AND PENETRATION RESISTANCE OF AN OXISOL ASSOCIATED WITH DIFFERENT TIMES OF IMPLANTATION OF SUGARCANE

Keywords:

Physical quality
Soil structure
Physical attributes
Land use
Saccharum officinarum

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 162-165

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the physical quality, from the density, porosity and penetration resistance of an Oxisol cultivated with sugarcane in Rio Grande do Sul. The evaluations were conducted in an Oxisol cultivated with sugarcane for 1, 3 and 5 years in an experimental area belongs to the Distillery Grandespe, Salto do Jacuí, RS. As reference system we adopted a native forest. Undisturbed samples were collected in layers from 0.00 to 0.05 m, 0.05 to 0.10 m and 0.10 to 0.20 m. In all layers, the lowest values of density were observed in the native forest. Considering the different times of crop implantation in the layer from 0.05 to 0.20 m the highest values of density were observed in the soil cultivated for 5 years. The highest values of values of porosity in all layers were found in the soil under native forest and 1 year of crop implantation. In all layers, were observed the highest values of penetration resistance in soil cultivated for 5 years, which were higher than the 2 MPa which is considered limitation to the development of plants roots. The results suggest that the density, porosity and penetration resistance can be used to guide appropriate management practices, in order to maintain a physical quality of soil suitable for root growth and agricultural productivity.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUÇÃO

Com o aumento na demanda por energia renovável e, menos poluente em relação à utilização do petróleo, a cultura canavieira (*Saccharum* spp,) têm assumido importância na matriz energética nacional e internacional (Assunção *et al.* 2010). Entretanto, têm-se observado impactos na qualidade do solo, decorrentes do manejo para implantação e desenvolvimento desta cultura (Severiano *et al.* 2009).

No manejo da cultura da cana-de-açúcar, a colheita atualmente é realizada com queima e com a cultura crua, podendo ser manual ou mecânica. O conjunto de procedimentos envolvidos na colheita pode influenciar na produção e na longevidade da cultura, nos atributos do solo, no ambiente e na saúde pública (Souza *et al.* 2006). A identificação dos impactos decorrentes da colheita sobre a qualidade de solos apresenta relevância na adoção adequada de manejos que visem principalmente à minimização da degradação física.

Além disso, o intenso preparo para o plantio da cana-de-açúcar tem refletido em alterações na estrutura do solo, principalmente na camada superficial (Cerri *et al.* 1991, Centurion *et al.* 2007). Similarmente, alterações na qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar têm sido verificadas por Severiano *et al.* (2010), por Pacheco & Cantalice (2011) e por Baquero *et al.* (2012).

Escassos são os trabalhos que avaliam a qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul (RS). Em virtude disso, o objetivo deste estudo visa avaliar a qualidade física, a partir da densidade, da porosidade e da resistência à penetração de um Latossolo cultivado em diferentes tempos de implantação de cana-de-açúcar no RS.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em áreas experimentais na Destilaria Grandespe, em Salto do Jacuí (RS), em um Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos *et al.* 2006) de textura argilosa até a profundidade de 0.20 m, sendo os teores de argila, silte e areia descritos na tabela 1. O solo é cultivado com cana-de-açúcar em diferentes tempos de implantação (1, 3 e 5 anos). Como sistema de referência utilizou-se uma mata nativa com características de solo e relevo similares às demais áreas avaliadas.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado em um sistema de manejo convencional de implantação da cana-de-açúcar (duas gradagens e uma subsolagem). A adubação utilizada é de 500 Kg de NPK (5-25-25), sendo 350 Kg desta adubação efetuada na linha de plantio e 150 Kg à lanço. Em cada área foram avaliadas 15 trincheiras aleatoriamente alocadas, na linha de plantio para a coleta de amostras indeformadas, nas camadas de 0.00 a 0.05 m, de 0.05 a 0.10 m e de 0.10 a 0.20 m.

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 0,030 m de diâmetro e 0,048 m de altura, para a determinação da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e resistência à penetração (Rp). A Ds foi determinada segundo Embrapa (1997) e a Rp foi quantificada utilizando-se um penetrógrafo eletrônico de bancada com haste e cone de 3 mm de diâmetro, ângulo do cone de 45° e velocidade de penetração constante de 10 mm min^{-1}. Anteriormente, as análises de Rp, as amostras foram equilibradas a um potencial de -10 KPa.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, e quando diferenças significativas foram observadas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 1. Teores de areia, silte e argila (g Kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar em diferentes tempos de implantação e camadas.

Sistemas de uso	Areia	Silte	Argila
	0.00 a 0.05 m		
1 ano	318.3	228.4	453.3
3 anos	239.0	254.6	506.4
5 anos	356.6	179.0	464.4
Mata nativa	285.8	235.9	478.3
	0.05 a 0.10 m		
1 ano	310.7	228.9	460.4
3 anos	234.6	272.2	494.8
5 anos	310.6	211.4	472.6
Mata nativa	265.6	267.8	466.5
	0.10 a 0.20 m		
1 ano	321.9	188.8	490.1
3 anos	221.6	266.0	512.4
5 anos	318.0	208.3	473.7
Mata nativa	258.9	269.6	471.6

Tabela 2. Densidade do solo (Ds, Mg m^{-3}), macroporosidade (Ma, %), microporosidade (Mi, %), porosidade total (Pt, %) e resistência à penetração (Rp, MPa) de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar com diferentes tempos de implantação e camadas.

Sistema	Ds	Ma	Mi	Pt	Rp
		0.00-0.05 m			
1 ano	1.26a	22.92a	32.36b	55.34a	2.00 ab
3 anos	1.31a	17.35a	35.33ab	52.69a b	1.47 bc
5 anos	1.35a	10.41b	38.82a	49.24b	3.10 a
Mata nativa	0.87b	22.96a	32.70b	55.67a	0.81 c
		0.05- 0.10 m			
1 ano	1.28c	19.91a	32.93b	52.84b	1.79 b
3 anos	1.43b	10.10b	37.57a	47.67c	2.73 b
5 anos	1.54a	6.26b	38.10a	44.37c	5.99 a
Mata nativa	1.00d	23.27a	35.42b	58.70a	1.05 b
		0.10-0.20 m			
1 ano	1.34c	15.15a	35.75a	50.90b	2.49 b
3 anos	1.47b	8.94b	37.82a	46.77c	3.21 b
5 anos	1.61a	5.77b	38.08a	43.85c	8.82 a
Mata nativa	1.14d	17.43a	37.67a	55.11a	1.78 b

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores de Ds, Ma, Mi, Pt e Rp. Nas três camadas avaliadas, a mata nativa apresentou os menores valores de Ds. Segundo Bertol *et al.* (2004), a menor Ds obtida na mata nativa pode ser explicada pela maior quantidade de matéria orgânica e ausência do tráfego de máquinas agrícolas.

Considerando, os diferentes tempos de implantação da cultura não foram verificadas diferenças significativas para este parâmetro na camada de 0.00 a 0.05 m. Nas camadas de 0.05 a 0.10 m e de 0.10 a 0.20 m, os maiores e menores valores de Ds foram, respectivamente, encontrados nas áreas de 5 e de 1 ano de implantação da cultura. Esses resultados corroboram com Baquero *et al.* (2012) que observaram os maiores valores de Ds em um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em comparação à mata nativa.

Souza *et al.* (2009), estudando um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar, obtiveram valores médios de Ds de 1.38 Mg m^{-3} nas camadas compreendidas entre 0.00 a 0.20 m, em áreas cultivadas há 5 anos. Neste estudo, os valores médios de Ds na área cultivada com cana-de-açúcar há 5 anos, foram superiores aos encontrados por este autor.

O aumento da Ds no cultivo de cana-de-açúcar implicará em prejuízos no desenvolvimento do sistema radicular (Mota *et al.* 2011). Além disso, aumentos na Ds resultam em menor porosidade do solo, principalmente associada à Ma. Esse comportamento foi observado em todas as camadas analisadas.

Na camada de 0.00 a 0.05 m os menores valores de Ma foram encontrados na área de 5 anos. Entretanto, nas camadas compreendidas entre 0.05 a 0.20 m, os menores valores foram obtidos nas áreas de 3 e 5 anos. Os menores valores de Ma refletiram em maiores valores de Mi (Tabela 2).

Para garantir a difusão do ar no solo e, uma aeração adequada ao desenvolvimento das plantas, o volume de macroporos não deve ser inferior a 10% do volume total do solo (Ferreira, 2010). Observa-se que nas camadas de 0.05 a 0.10 e de 0.10 a 0.20 m, a Ma foi inferior a 10%, não sendo adequado para o desenvolvimento de plantas.

Os maiores valores de Pt, na camada de 0.00 a 0.05 m foram encontrados no solo sob mata nativa e há 1 ano de implantação da cultura. Nas demais camadas, os sistemas de uso diminuíram a Pt, sendo encontrado um valor superior na mata nativa.

Na camada de 0.00 a 0.05 m, a área com 5 anos apresentou valor médio superior de Rp, quando comparada à área de 3 anos, não diferindo estatisticamente da área de 1 ano. Nas demais camadas (0.05 a 0.20 m) os maiores valores de Rp foram encontrados na área de 5 anos (Tabela 2).

Em todas as camadas, o solo sob cana-de-açúcar há 5 anos apresentou valor acima do considerado limitante para o desenvolvimento das plantas (2 MPa), sugerido por Taylor *et al.* (1966). Principalmente, na camada de 0.10 a 0.20 m e, considerando o valor sugerido pelos autores mencionados acima, indicou-se o maior efeito do tempo de implantação da cana-de-açúcar sobre os valores de Rp em comparação a área de referência (Tabela 2). Estes resultados podem ser atribuídos, entre outros fatores, ao maior tempo de exposição da área às pressões exercidas pelas máquinas agrícolas utilizadas nas operações de preparo do solo e no plantio da cultura (Ralisch *et al.* 2008).

Tavares Filho *et al.* (2010) e Baquero *et al.* (2012) também encontraram maiores valores de Rp nos solos cultivados com cana-de-açúcar em comparação à mata nativa, sendo estes superiores aos limitantes ao pleno desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

Os resultados deste estudo sugerem que a densidade, a porosidade e a resistência do solo à penetração podem ser utilizadas para orientar práticas de manejo adequadas, visando à manutenção de uma qualidade física do solo adequada ao crescimento de raízes e à produtividade agrícola.

Agradecimentos. Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de mestrado à primeira autora e terceira co-autora, à Destilaria Grandespe por conceder as áreas experimentais para efetuas a coleta de solo e à Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e à Embrapa Clima Temperado pela infra-estrutura disponibilizada para a realização das análises laboratoriais.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO A, SANTOS LC, ROCHA MR, REIS, AJS, TEIXEIRA, RA, LIMA FSO (2010) Efeito de indutores de resistência sobre Meloidogyne incognita em cana-de-açúcar (Saccharum spp.). R Nem Bras 34:49-56.

BERTOL I, ALBUQUERQUE JA, LEITE D, ZOLDAN JUNIOR WA (2004) Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. R Bras Ci Solo 28:155-163.

BAQUERO JE, RALISCH R, MEDINA CC, FILHO JT, GUIMARÃES MF (2012) Soil Physical Properties and Sugarcane Root Growth in a Red Oxisol. R Bras Ci Solo 36:63-70.

CENTURION JF, FREDDI OS, ARATANI RG, METZNER AFM, BEUTLER NA, ANDRIOLI I (2007) Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. R Bras Ci Solo 31:199-209.

CERRI CC, FELLER C, CHAUVEL A (1991) Evolução das principais propriedades de um latossolo vermelho escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinqüenta anos com cana-de-açúcar. R Série Pedológica 26:37-50.

EMBRAPA (1997) Manual de Métodos de Análises de Solo. Embrapa, Rio de Janeiro, 80 p.

FERREIRA MM (2010) Caracterização Física do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.1-27.

MOTA MS, CREMON C, MAPELI NC, SILVA WM, MAGALHÃES WA, CREMON T (2011) Qualidade e atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em diferentes sistemas de manejo. R Agrarian 12:105-112.

PACHECO EP, CANTALICE JRB (2011) Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e da matéria orgânica sobre a compressibilidade e a resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. R Bras Ci Solo 35:417-428.

RALISCH R, MIRANDA TM, OKUMURA RS, BARBOSA GMC, GUIMARÃES MF, SCOPEL E, BALBINO LC (2008) Resistência a penetração de um latossolo vermelho amarelo do cerrado sob diferentes sistemas de manejo. R Bras Eng Agríc Ambient 12:381-384.

SANTOS HG, JACOMINE PKT, ANJOS LHC, OLIVEIRA VA, OLIVEIRA JB, COELHO MR, LUMBRERAS JF, CUNHA TJF (2006) Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 306 p.

SEVERIANO EC, OLIVEIRA GC, CURI N, DIAS JUNIOR M (2009) Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). R Bras Ci Solo 33:159-168.

SEVERIANO EC, OLIVEIRA GC, DIAS JUNIOR MS, CASTRO MB, OLIVEIRA LFC, COSTA KAP (2010) Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I-Modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. Eng Agríc 30:404-413.

SOUZA ZM, BEUTLER NA, PRADO RM, BENTO MJC (2006) Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. Científica 34:31-38.

SOUZA ZM, MARQUES JUNIOR J, PEREIRA GT (2009) Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. Braz Arch Biol Technol 52:305-316.

TAVARES FILHO J, BARBOSA GMC, RIBON AA (2010) Physical properties of dystrophic Red Latosol (oxisol) under different agricultural uses. R Bras Ci Solo 34:925-933.

TAYLOR HM, ROBERSON GM, PARKER JÚNIOR JJ (1966) Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. Soil Sci 102:18-22.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

IMPACTOS DAS OPERAÇÕES MECANIZADAS DA COLHEITA FLORESTAL SOBRE A ESTRUTURA DOS HORIZONTES BA E Bt DE UM ARGISSOLO AMARELO†

Maria Luiza de Carvalho Andrade[1] ✉, Moacir de Souza Dias Junior[2] & Ricardo Previdente Martins[3]

[1]Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Departamento de Ciência do Solo – Universidade Federal de Lavras - Caixa
[2]Departamento de Ciência do Solo. UFLA. Bolsista CNPq e Pesquisador Mineiro FAPEMIG – Universidade Federal de Lavras – Caixa
[3]Divisão de Tecnologia Florestal – UNF/BA

✉: malucandrade@hotmail.com

Palavras chaves:

Pressão de pré-consolidação
Compactação
Eucalipto

RESUMO

A principal fonte de degradação da estrutura do solo na exploração florestal é o tráfego das máquinas, que pode causar compactação do solo. Os objetivos deste estudo foram: a) gerar os modelos de capacidade de suporte de carga para os horizontes BA e Bt de um Argissolo Amarelo (PA) e b) determinar através do uso desses modelos a suscetibilidade à compactação dos horizontes BA e Bt e a compactação promovida pelas operações de colheita florestal. Este estudo foi realizado em áreas da Suzano Papel e Celulose. Dois modais de colheita florestal foram avaliados: 1) Harvester e Forwarder e 2) Feller Buncher e Skidder. A amostragem foi realizada no topo dos horizontes BA e Bt e consistiu de: a) 15 amostras indeformadas para obter os modelos de capacidade de suporte de carga; b) 15 amostras indeformadas por horizontes e por máquina para o Harvester e Feller Buncher; c) 3 amostras indeformadas por horizonte e para cada intensidade de tráfego do Forwarder e Skidder na condição de tráfego fora do resíduo e d) 2 amostras indeformadas por horizonte para cada intensidade de tráfego do Forwarder na condição de tráfego sobre resíduo. Essas amostras foram usadas no ensaio de compressão uniaxial. O horizonte Bt apresentou maior capacidade de suporte de carga do que o horizonte BA, sendo, portanto, mais resistente à compactação. As operações realizadas com o Feller Buncher promoveram maior compactação do que as realizadas com o Harvester em ambos os horizontes. O Forwarder quando trafegou sobre resíduo promoveu menor compactação do que quando o tráfego foi realizado fora do resíduo e do que o Skidder

IMPACTS OF THE MECHANIZED FOREST HARVEST OPERATIONS ON THE STRUCTURE OF THE BA AND Bt HORIZONS OF A YELOW ARGISOL

Keywords:

Preconsolidation
Pressure
Compaction
Eucalyptus

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 166-172

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The main source of soil structure degradation in forestry is the traffic of machines, which can cause soil compaction. Os objetivos deste estudo foram: a) gerar os modelos de capacidade de suporte de carga para os horizontes BA e Bt de um Argissolo Amarelo (PA) e b) determinar através do uso desses modelos a suscetibilidade à compactação dos horizontes BA e Bt e a compactação promovida pelas operações de colheita florestal. The objectives of this study were: a) to generate the load bearing capacity models for the BA and Bt horizons of a Yellow Argisol (PA) and b) to determine the susceptibility to compaction of the BA and Bt horizons and the compaction promoted by the forest harvest operations. This study was conducted in the areas of Suzano Papel e Celulose. Two forest harvest modes were evaluated: 1) Harvester and Forwarder and 2) Feller Buncher and Skidder. The sampling was carried out at the top of the BA and Bt horizons and consisted of: a) 15 undisturbed soil samples to obtain the load bearing capacity models, b) 15 undisturbed soil samples by horizons and machine for the Harvester and Feller Buncher c) 3 undisturbed soil samples by horizon and for each traffic intensity of the Forwarder and Skidder for the condition of traffic outside of the residue and d) 2 undisturbed soil samples by horizon for each traffic intensity of the Forwarder for the condition of traffic on the residue. These samples were used in the uniaxial compression test. The Bt horizon showed higher load bearing capacity than the BA horizon, being therefore more resistant to compaction. The operations realized with the Feller Buncher promoted greater compaction than those performed with the Harvester in both horizons. The operations performed with the Forwarder over the residue promoted smaller compaction than when the traffic was carried outside of the residue and the Skidder.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

† Projeto financiado pela Suzano Papel e Celulose

INTRODUÇÃO

No contexto brasileiro o setor de papel e celulose tem grande importância na economia, mantendo em 2010 o saldo comercial positivo da ordem de US$ 4,9 bilhões. O setor possui 2.2 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais, emprega direta e indiretamente mais de 600 mil trabalhadores e é composto por 222 empresas com atividade em 18 estados brasileiros (BRACELPA 2010). O estado de São Paulo é o principal produtor de madeira em tora para a produção de papel e celulose, e sua produção em 2010 foi de 17.212.783 m³ seguido pela Bahia com 14.707.593 m³ (IBGE 2010).

Os plantios com os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* são a base do setor florestal brasileiro. O estabelecimento de novos plantios para atender à demanda futura dos projetos industriais do setor de papel e celulose foi o principal responsável pelo crescimento, em 2011, de 2.5% em área de plantio de *Eucalyptus* com relação ao ano de 2010, totalizando uma área de 4.873.952 hectares (ABRAF 2012).

Devido à sua importância e à crescente demanda, o setor florestal necessita de estratégias diferenciadas em todos os seus segmentos para atender às exigências de mercado, fazendo com que as empresas envolvidas com a exploração de recursos naturais adaptem suas atividades de maneira condizente ao desenvolvimento sustentável.

Em áreas florestadas, em razão do tráfego das máquinas de corte, limpeza da árvore e escoamento da produção, a compactação do solo ocorre principalmente durante as operações de colheita (Dias Junior *et al.* 2003) sendo esta, portanto, uma das limitações para que o desenvolvimento florestal sustentável seja atingido, já que as operações da colheita envolvem o tráfego intenso e pesado de máquinas sobre o solo podendo causar compactação, devido provavelmente, a não haver um controle da umidade do solo ou de sua capacidade de suporte de carga no momento de realização destas operações

A compactação do solo pode limitar a adsorção e, ou, a absorção de nutrientes, a infiltração e a redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular (Grohmann & Queiroz Neto 1966, Alvarenga *et al.* 1983, Smucker & Erickson 1989, Bicki & Siemens 1991), podendo causar, a queda na produtividade do eucalipto (Dedecek & Gava 2005).

Apesar, de várias pesquisas já terem demonstrado os efeitos do manejo nas propriedades físicas do solo (Barnes *et al.* 1971, Gupta *et al.* 1985, Larson *et al.* 1989, Soane & Van Ouwerkerk 1994, Dias Junior e Pierce 1996), existe uma carência de estudos que quantifiquem os níveis de pressões que podem ser aplicadas aos solos sem que haja degradação de sua estrutura. Desse modo, a utilização dos modelos de capacidade de suporte de carga dos solos é muito importante, para que danos à sua estrutura possam ser evitados (Dias Junior 1994, Dias Junior & Pierce 1996), já que podem indicar a máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes condições de umidade, sem sofrer compactação adicional.

Este estudo teve como hipótese: a suscetibilidade à compactação e a compactação causada pelas operações de colheita florestal podem ser determinadas através dos modelos de capacidade de suporte de carga e das pressões de pré-consolidação determinadas após as operações de colheita florestal. Os objetivos deste estudo foram: a) gerar os modelos de capacidade de suporte de carga para os horizontes BA e Bt de um Argissolo Amarelo (PA) e b) determinar através do uso desses modelos a suscetibilidade à compactação dos horizontes BA e Bt e a compactação promovida pelas operações de colheita florestal.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em áreas comerciais da empresa Suzano Papel e Celulose, situadas na Unidade Teixeira de Freitas, na região do extremo sul do Estado da Bahia.

O solo da área foi classificado como Argissolo Amarelo (PA). Amostras deformadas provenientes do excesso de solo das partes superiores e inferiores dos anéis de amostragem foram submetidas às seguintes análises de caracterização física: textura (Day, 1986) e densidade de partículas Dp (Blake & Hartge, 1986). Estes resultados são apresentados no Quadro 1.

Para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo, 15 amostras indeformadas foram coletadas com anel volumétrico de 6,40 cm de diâmetro interno por 2,54 cm de altura utilizando o amostrador de Uhland, antes das operações de colheita florestal, no topo do horizonte BA e no topo do horizonte Bt. Essas amostras foram coletadas nas entrelinhas de plantio e antes das operações de colheita florestal, não apresentando, portanto, nenhuma influência do tráfego das máquinas utilizadas na colheita florestal. Para preservar a integridade das amostras indeformadas desde o momento da coleta e o da realização do ensaio de compressão uniaxial no laboratório, todas as amostras foram cuidadosamente envoltas em filme plástico e parafinadas no campo.

Quadro 1. Granulometria, Classe textural e Densidade de Partículas (Dp) dos horizontes BA e Bt de um Argissolo Amarelo (PA)

Horizonte	Areia	Silte	Argila	Classe textural	Dp
cm	———	$g\,kg^{-1}$	———		$Mg\,m^{-3}$
BA	820(1)	10	170	Areia Franca	2.57(1)
Bt	660	50	290	Franco arenoso	2.57

(1) Média de 3 repetições

As simulações das diferentes umidades foram feitas utilizando as amostras indeformadas que foram inicialmente saturadas em uma bandeja com água até 2/3 da altura da amostra, por 24 horas, e em seguida foram submetidas ao potencial matricial de - 2 kPa na mesa de tensão e após atingir o equilíbrio as umidades gravimétricas foram determinadas pelo método da estufa (Gardner 1986) em duas amostras de cada horizonte. Os valores de umidades gravimétricas foram multiplicados pelas respectivas densidades do solo (Blake & Hartge 1986) obtendo-se desta forma os maiores valores de umidades volumétricas. As amostras restantes foram colocadas dentro de um dessecador para secarem ao longo do tempo no laboratório obtendo-se assim a faixa de umidade volumétrica de 0.03 a 0.36 $m^3\ m^{-3}$.

Após a obtenção das umidades desejadas, as amostras indeformadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando consolidômetros da marca da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload, cuja aplicação das pressões foi feita através de ar comprimido. As pressões aplicadas a cada amostra obedeceu à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa de acordo com a metodologia proposta por Bowles (1986). Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (Taylor 1948). Somente após esta condição ter sido alcançada é que se aplicou uma nova pressão. Após a realização dos ensaios de compressão uniaxial, as pressões de preconsolidação foram obtidas de acordo com Dias Junior & Pierce (1995), nas curvas de compressão do solo. A seguir, as pressões de preconsolidação (σ_p) foram representadas em função das umidades volumétricas (θ) simuladas em laboratório e através do uso do software Sigma Plot (Jandel Scientific, San Rafael, CA, USA), foram obtidas as equações matemáticas que correspondem aos modelos de capacidade de suporte de carga, $\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$ (Araujo-Junior *et al.* 2011) onde σ_p = pressão de pré-consolidação (kPa), θ = a umidade volumétrica ($m^3\ m^{-3}$) e as letras "a" e "b" representam os parâmetros empíricos de ajuste do modelo e os intervalos de confiança a 95% obtidos automaticamente através da opção "intervalo de confiança a 95% da população" disponível no software Sigma Plot.

A comparação entre os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA e Bt foi feita utilizando-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989). Para obtenção dos modelos lineares a partir do modelo exponencial [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$], aplicou-se o logaritmo nos valores de pressão de pré-consolidação, resultando em uma equação do tipo $\log \sigma_p = a + b\theta$. O teste de homogeneidade de modelos lineares compara primeiro as variâncias residuais dos dois modelos, e se essas variâncias forem homogêneas pelo teste F, comparam-se então os coeficientes lineares (a) e os coeficientes angulares (b). Se os coeficientes lineares e angulares não forem significativos, pelo teste F, os valores de pressões de pré-consolidação e umidades volumétricas são agrupados e uma nova equação é ajustada a esses valores. Entretanto, se os coeficientes lineares (a) e/ou angulares (b) diferem significativamente os valores de pressões de pré-consolidação e umidades volumétricas não são agrupados. Outra condição na qual os valores de pressões de pré-consolidação e umidades volumétricas não são agrupados ocorre quando as variâncias residuais dos dois modelos não forem homogêneas.

Para avaliar a compactação causada pelas operações de derruba das árvores de eucalipto usando o Havester e o Feller Buncher sobre a estrutura dos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo, 15 amostras indeformadas foram coletadas com anel volumétrico de 6.40 cm de diâmetro interno por 2.54 cm de altura utilizando o amostrador de Uhland, durante as operações mecanizadas da colheita florestal, no topo do horizonte BA e no topo do horizonte Bt. Para avaliar a compactação promovida por diferentes intensidades de tráfego das máquinas de baldeio da madeira, Forwarder e Skidder na condição fora do resíduo, 3 amostras indeformadas foram coletadas, em cada horizonte para cada intensidade de tráfego, e, finalmente, para avaliar o efeito do resíduo na compactação do solo, 2 amostras indeformadas foram coletadas, em cada horizonte para cada intensidade de tráfego do Forwarder.

Estas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial conforme descrito anteriormente, com a umidade na qual as operações foram realizadas. A seguir, as pressões de preconsolidação foram obtidas para cada condição especificada anteriormente. As pressões de preconsolidação foram então representadas nos modelos de capacidade de suporte de carga do Argissolo Amarelo, e utilizando os critérios apresentados na figura 1, os impactos das operações de colheita e baldeio sobre a estrutura dos horizontes BA e Bt do PA foram determinados. As regiões "a", "b" e "c" representam: (a) região onde já ocorreu a compactação do solo, (b) região onde não ocorre a compactação do solo. Esta região indica as amostras que poderão sofrer compactação nas próximas operações de colheita, se as pressões aplicadas forem maiores do que as pressões de preconsolidação do limite superior de confiança e (c) região onde não ocorre a compactação do solo.

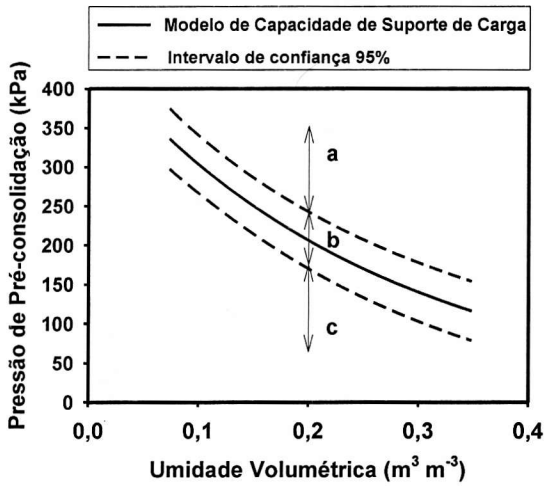


Figura 1. Critérios utilizados na determinação dos impactos das operações de colheita florestal sobre a estrutura dos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo (PA) através do uso da pressão de pré-consolidação determinada após as operações da colheita florestal no.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros estimados "a" e "b" do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$], dos horizontes BA e Bt, foram iguais a 2.67 a 2.98 e a -3.24 a -4.22, respectivamente. Os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0.89 a 0.98, sendo estes, significativos a 1 % pelo teste t - Student (Figura 2).

Os modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo (PA) diferiram estatisticamente indicando diferentes capacidades de suporte de cargas (Figura 2 e Quadro 2). O horizonte Bt apresentou maior capacidade de suporte de carga do que o horizonte BA, sendo, portanto, mais resistente à compactação e mais restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular, enquanto que o horizonte BA é mais suscetível à compactação e menos restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular (Figura 2).

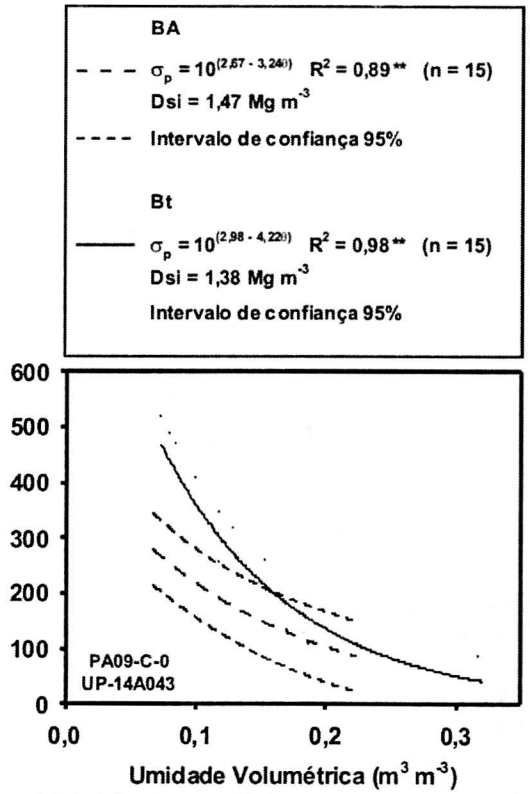


Figura 2. Modelos de capacidade de suporte de carga para os horizontes BA e Bt com os intervalos de confiança para o Argissolo Amarelo (PA).

As operações de corte das árvores com o Feller Buncher promoveram compactação em 60% das amostras coletadas no horizonte BA e em 47% das amostras coletadas no horizonte Bt. As operações de corte das árvores com o Harvester promoveram compactação em 47% das amostras coletadas no horizonte BA e em 33% das amostras coletadas no horizonte Bt (Quadro 3). Observa-se que as operações com o Feller Buncher promoveram maior compactação do que as operações realizadas com o Harvester tanto no horizonte BA quanto no Bt (Quadro 3).

Para a condição de tráfego fora do resíduo observa-se que os horizontes BA e Bt sofreram compactação em 67% das amostras para o número de passadas 3 e 6. Para o número de passadas igual a 12 o horizonte BA sofreu maior compactação (100%) do que o horizonte Bt (67%) e para o número de passadas igual a 16 a compactação ocorreu em 100% das amostras coletadas nos horizontes BA e Bt (Quadro 4).

Quadro 2. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga dos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo (PA) de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Classe de Solo	Horizonte	F	F Coeficiente angular, a	F Coeficiente linear, b
PA	BA x Bt	H	*	*

F: teste de significância de acordo com Snedecor & Cochran (1989); H: homogêneo; *: Significativo a 5%

Quadro 3. Porcentagem de amostras compactadas pelas operações realizadas com Harvester e Feller Buncher nos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo (PA) de acordo com os critérios apresentados na figura 1.

Equipamento	% de compactação no Horizonte BA	% de compactação no Horizonte Bt
Feller Buncher	60	47
Harvester	47	33

Quadro 4. Porcentagem de amostras compactadas pelas diferentes intensidades de tráfego do Skidder e do Forwarder na condição fora de resíduo e do Forwarder sobre resíduo nos horizontes BA e Bt do Argissolo Amarelo (PA) de acordo com os critérios apresentados na figura 1.

Equipamento	Tráfego	3 passadas	6 passadas	12 passadas	16 passadas
		Horizonte BA			
		% de amostras compactadas			
Forwarder	Fora do resíduo	67	67	100	100
	Sobre o resíduo	0	0	50	100
Skidder	___	40	60	100	100
		Horizonte Bt			
Forwarder	Fora do resíduo	67	67	67	100
	Sobre o resíduo	0	0	0	100
Skidder	___	0	40	60	60

A presença do resíduo promoveu distribuição das pressões aplicadas pelo Forwarder e devido a isso a compactação foi menor no horizonte BA e no Bt para o número de passadas menores do que 12 quando comparado com a condição fora do resíduo (Quadro 4). Silva *et al* (2007) também observaram que os resíduos florestais minimizaram a compactação causada pelo Forwarder.

Para o número de passadas igual a 16 o resíduo não foi eficiente na distribuição das pressões e a porcentagem das amostras compactadas para a condição de tráfego fora e sobre os resíduos foram iguais a 100% (Quadro 4).

As intensidades de tráfego iguais a 12 e 16 passadas para a condição de tráfego fora do resíduo foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no Bt. Já para a condição de tráfego sobre resíduo a intensidade igual a 16 foi identificada como sendo a que causou maior compactação.

No Quadro 4 observa-se, ainda, que o horizonte BA sofreu maior compactação do que o horizonte Bt em todas as intensidades de tráfego do Skidder. Esses resultados podem ser explicados devido à maior suscetibilidade à compactação do horizonte BA (Figura 2). As intensidades de tráfego iguais a 12 e 16 foram identificadas como sendo as que promoveram maior compactação do solo tanto no horizonte BA quanto no Bt.

CONCLUSÕES

O horizonte Bt apresentou maior capacidade de suporte de carga do que o horizonte BA, sendo, portanto, mais resistente à compactação e mais restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular.

As operações realizadas com o Feller Buncher promoveram maior compactação do que as realizadas com o Harvester em ambos os horizontes.

O Forwarder quando trafegou sobre resíduo promoveu menor compactação do que quando o tráfego foi realizado fora do resíduo e ou com o Skidder.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG, à CAPES e à SUZANO PAPEL E CELULOSE, pelo apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

ABRAF – Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas. Anuário estatístico da ABRAF (2012) Brasília, 2012.

ALVARENGA, R. C. *et al.* (1983) Armazenamento de água em um Podzólico Vermelho-Amarelo sob pastagem e cultivo anual. Ciência e Prática, v. 7, p. 48-57.

ARAUJO-JUNIOR CF, DIAS JUNIOR MS, GUIMARÃES PTG & ALCÂNTARA EN (2011) Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. R. Bras. Ci. Solo, 35:115-131.

BARNES KK, CARLETON WM, TAYLOR HM, THROCKMORTON RI & VANDENBERG GE (1971) Compaction of agricultural soils. St. Joseph, ASAE, 471 p. (Monogr).

BICKI TJ, SIEMENS JC (1991) Crop response to wheel traffic soil compaction. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, v. 34, p. 909-913.

BLAKE GR & HARTGE KH (1986) Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, p. 377 - 382.

BOWLES JE (1986) Engineering properties of soils and their measurements. Third edition. McGraw-Hill. 218 p.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel (2010) Relatório estatístico da BRACELPA. São Paulo, 2000-2010.

DAY PR (1986) Particle fraction and particle size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA. Madison, WI, p. 545 - 567.

DEDECEK RA & GAVA JL (2005) Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. Revista Árvore. Viçosa. MG , v.29, n.3, p.383 - 390.

DIAS JUNIOR M de S (1994) Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 114 p. (Tese de Doutorado).

DIAS JUNIOR M de S & PIERCE FJ (1995) A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. Soil Technol., Amsterdam, 8: 139 - 151.

DIAS JUNIOR M de S & PIERCE FJ (1996) Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 20: 175 - 182.

DIAS JUNIOR MS, LEITE FP, WINTER ME, PIRES JVG (2003) Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um Latossolo Amarelo cultivado com eucalipto na Região de Peçanha - MG. Revista Árvore. Viçosa. MG, v.27, n.3, p.343 - 349.

GARDNER WH (1986) Water content. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison. American Society Agronomy, p. 493 - 544. (ASA. Agronomy Monograph, 9).

GROHMANN F & QUEIROZ NETO JP (1996) Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. Bragantia, Campinas, 25: 421 - 431.

GUPTA SC, HADAS A, VOORHEES WB, WOLF D, LARSON WE & SHNEIDER EC (1985) Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils. Bet Dagan, Israel, Research Report, Binational Agric. Res. Development, University of Minnesota. 178 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) Prod. Extr. Veg. e Silvic. Rio de Janeiro, v.25.

LARSON WE, BLAKE GR, ALLMARAS RR, VOORHEES WB & GUPTA SC (1989) Mechanics and

related processes in structured agricultural soils. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers. 273 p. (NATO Applied Science, 172).

SILVA AR, DIAS JUNIOR MS, LEITE FP (2007) Camada e Resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois Latossolos. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.42, n.1, p.89-93, jan.

SNEDECOR GW & COCHRAN WG (1989) Statistical methods. 8.ed. Ames, Iowa State University Press, 503p.

SMUCKER AJM & ERICKSON AE (1989) Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON WE, BLAKE GR, ALLMARAS RR, VOORHEES WB & GUPTA SC (eds.) Mechanics related process in structured agricultural soils. NATO Applied Science, The Netherlands, v. 172, p. 205 - 221.

SOANE BD & VAN OUWERKERK C (1994) Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier, 660 p.

TAYLOR DW (1948) Fundamentals of soil mechanics. New York: Wiley, 700p.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

ABONAMIENTO ORGÁNICO Y RIEGO SUPLEMENTARIO EN EL CULTIVO DE QUINUA

Roberto Miranda[1] ✉, Henry Mendoza[2], Edwin Yucra[3]

[1]Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía – Proyecto QuinAgua.
[2]Becario – Proyecto QuinAgua, Facultad de Agronomía.
[3]Universidad Mayor de San Andrés - Facultad de Agronomía.

✉: robertomicasa@gmail.com

Palabras claves:

Chenopodium quinoa
Riego Suplementario
Abonamiento orgánico
Eficiencia de uso del nitrógeno
Bolivia

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la productividad de la quinua (Chenoodium quinoa Willd) bajo la aplicación de estiércol fresco de oveja en diferentes épocas y riego suplementario. El estudio fue realizado en el Altiplano Central semiárido de Bolivia. El diseño estadístico, fue un modelo tri-factorial en parcelas subdivididas con tres repeticiones. El factor A épocas de aplicación de abono orgánico al suelo (mayo, julio y septiembre), factor B: riego deficitario (condiciones sin riego y riego deficitario en la etapa de floración y grano lechoso) y factor C: niveles de estiércol (0, 15 y 30 Mg. ha^{-1}). Cada unidad experimental tuvo un área de 60 m^2, la distancia entre surcos y plantas fue de 0.5 metros, haciendo un total de 40000 plantas hectárea. Los rendimientos para aplicaciones de estiércol en el mes de mayo, julio y septiembre fueron: 1214, 1412 y 929 kg ha^{-1} respectivamente, siendo que la segunda época de aplicación de estiércol, presentó el mayor rendimiento. Respecto a riego, hubo mayor rendimiento en los tratamientos donde se aplicó una lámina de agua de 69 mm al momento de la floración y grano lechoso. La aplicación de abono de 15 y 30 Mg. ha^{-1}, fueron superiores en un 50% en relación al tratamiento al que no se aplicó estiércol. Por cada tonelada de quinua producida, la planta requiere 19 kg de nitrógeno en el grano y la eficiencia de uso del nitrógeno fue de 53 kg de grano por cada kg de nitrógeno extraído por el grano.

ORGANIC FERTILIZATION AND DEFICIT IRRIGATION IN THE CULTIVATION OF QUINOA

Keywords:

Chenopodium quinoa
Deficit irrigation
Organic composting
Nitrogen utilization efficiency
Bolivia

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 173-180

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the productivity of quinoa under the application of fresh sheep manure at different times and supplementary irrigation. The study was conducted in the semiarid Central Plateau of Bolivia. The statistical design was a three-factor model in split plots with three replications. Factor A times of application of organic fertilizer to the soil (May, July and September), factor B: deficit irrigation (conditions without irrigation and deficit irrigation during flowering and milky state) and factor C: manure levels (0, 15 and 30 Mg. ha-1). Each experimental unit had an area of 60 m2; the distance between rows and plants was 0.5 meters, doing a total of 40000 plants ha-1. Yields for manure applications in month of May, July and September were: 1214, 1412 and 929 kg ha^{-1} respectively, the second season of manure application, had the highest yield. Regarding irrigation, there was the highest yields in the treatments where was applied a water sheet of 69 mm at the time of flowering and milky state. The application of fertilizer of 15 and 30 Mg. ha^{-1} were higher by 50% compared to treatment was not applied manure. Per ton of produced quinoa, the plant requires 19 kg of nitrogen in the grain, while the efficiency of nitrogen use was 53 kg of grain per kg of nitrogen removed by the grain.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

El Altiplano Boliviano es una región importante de la zona andina de América del Sur, y es considerada una de las áreas agrícolas más altas de la Tierra, ya que se encuentra por encima de los 3800 m.s.n.m. (García *et al.* 2004). En este ecosistema se producen cultivos de altura entre los que se encuentra la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd), cultivo que en los últimos años ha ganado importancia en el mercado internacional, debido a sus cualidades nutritivas como el nivel de proteína, presencia de aminoácidos y vitaminas (Bhargava *et al.* 2003a, Repo-Carrasco 2003).

Las cualidades nutritivas, de este cultivo, además de los precios de exportación (3000 $us/t de grano), ha generado que los productores locales del Altiplano Central y Sur de Bolivia intensifiquen su cultivo, llegando a convertirla en un monocultivo en zonas adyacentes al salar de Uyuni y extendiendo su cultivo al Altiplano Central. Por otro lado, los suelos de estas zonas presentan bajos contenidos de materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno (Orsag *et al.* 2011, FAUTAPO 2008). Así mismo, las prácticas inadecuadas del suelo provocan el detrimento de la materia y por tanto de la productividad (Arrieche-Luna y Ruiz-Dager 2010).

Los productores locales utilizan estiércol fresco de ganado ovino a fin de aumentar la productividad, esta actividad es realizada en dos momentos: al finalizar la época de lluvias (febrero) o al momento de la siembra (septiembre, octubre o noviembre). Según Hervé *et al.* (2006), los nutrientes del estiércol aplicado en un cultivo son deficitarios el primer año, siendo efectivos solo a partir del segundo año. La cantidad aplicada de estiércol en regiones del Altiplano Sur y Central, varía de 2 a 6 t ha^{-1} y se encuentra en función del acceso del productor a este insumo.

Estudios realizados durante la gestión 2007 y 2008 en el Altiplano Sur con aplicaciones de 2, 4, 6, 8 y 12 t ha^{-1} de estiércol no mostraron diferencias significativas en el rendimiento de grano de la quinua (Condori 2007, Huanca 2008), por lo que en el presente estudio los niveles de abonamiento orgánico fueron incrementados a valores de 15 y 30 t ha^{-1}. Trabajos realizados por FAUTAPO (2008), mencionan que, para obtener un rendimiento de 2566 kg de grano por hectárea, la quinua necesita 283 kg de nitrógeno, 48 kg de fósforo y 598 kg de potasio por hectárea. Según Schulte *et al.* (2005), el rendimiento de la quinua alcanza hasta 3500 kg ha^{-1} cuando son aplicados 120 kg ha^{-1} de nitrógeno. Murillo (2006), en un trabajo realizado en el Altiplano Norte, al aplicar 80 kg ha^{-1} de nitrógeno durante la siembra de la quinua complementado con riego alcanzó rendimientos por encima de los 2000 kg ha^{-1}. De la misma manera De la Torre y Herrera (2003), en Chile, encontraron rendimientos de 5000 kg ha^{-1} cuando combinaron la fertilización nitrogenada con riego por goteo. La asimilación de los nutrientes contenidos en los abonos orgánicos, depende de una serie de factores como la temperatura, humedad, actividad microbiana entre otros (Morales *et al.* 2001). Estos trabajos, sugieren que para obtener adecuados rendimientos, además de contar con condiciones ambientales favorables, es necesario garantizar niveles adecuados de nitrógeno y humedad del suelo.

El uso de residuos orgánicos como abono se constituye en una estrategia para reciclar los nutrientes (Cayuela *et al.* 2009). En este sentido, el manejo adecuado del estiércol en los predios rurales, presenta ventajas como el mejoramiento de la fertilidad y calidad del suelo, así como la sostenibilidad de los ecosistemas y el medio ambiente. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que gran parte de las sustancias nutritivas de los fertilizantes orgánicos, como el estiércol, se hace asimilable para las plantas sólo a medida que ocurre la mineralización (Yagodin *et al.* 1986).

La mineralización es un proceso biológico de descomposición de los compuestos que integran la materia orgánica. Esta descomposición es causada por microrganismos heterotróficos, lo que determina la formación de compuestos minerales solubles nitratos, o gases como el dióxido de carbono, siendo la descomposición e inmovilización procesos clave en el ciclo del nitrógeno, en el sistema suelo-planta (Videla *et al.* 2005, Rezende y Araujo 2007).

Respecto al riego, según Geerts (2008), el riego completo no es una opción en zonas con recursos hídricos limitados, como es el caso del Altiplano central y sur de Bolivia, que presenta precipitaciones por debajo de los 400 mm anuales, elevada evapotranspiración (García *et al.* 2004) y suelos con problemas de acumulación de sales (Herve *et al.* 2002), siendo una alternativa el riego deficitario, estratégico o llamado también suplementario, por tanto, podría ser valioso investigar esta técnica para estabilizar la producción de quinua e incrementar la productividad de agua en el árido Altiplano Boliviano (Geerts 2008).

El objetivo del presente estudio fue determinar la productividad del cultivo de la quinua y la eficiencia de uso del nitrógeno, al aplicar estiércol ovino fresco al suelo en tres épocas antes de la siembra, en condiciones de riego suplementario y tres niveles de abonamiento orgánico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue llevado a cabo en la gestión 2009-2010 en la Estación experimental de Patacamaya de la

Facultad de agronomía y ubicado en el Altiplano semiárido de Bolivia. Geográficamente se encuentra a 17° 16′ de Latitud Sur y 76°57′de Longitud Oeste, y una Altitud de 3810 msnm. Las precipitaciones pluviales, se limitan a los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, llegando hasta los 400 mm anuales. La temperatura varía en forma extrema, presentando la mayor variación térmica en los meses de mayo, junio, julio y agosto, registrándose valores que oscilan entre los 10°C bajo cero en las noches, hasta 15°C durante el día (García *et al.* 2006).

Los suelos, según el sistema de clasificación de la soil taxonomy (Soil Survey Staff 2006) son denominados xerothents. Las características del suelo se muestran en la tabla 1. El estiércol de oveja, utilizado en el ensayo provino de una comunidad vecina y sus características son mostradas en la tabla 2.

Tabla 1. Características físicas y químicas del suelo de Patacamaya- Altiplano Central de Bolivia.

Ho	Prof.	A.	ar	L	Tex.	pH: agua	Ca	Mg	K	Na	TBI	CTC	MO	Nt	P
	cm.	%				1:5	Cmol (+) kg^{-1} suelo						%		$mgkg^{-1}$
Ap	0 - 15	59	25	16	FaA	5.65	2.92	0.79	0.61	0.18	4.50	4.62	0.72	0.06	40.74
Bt	15 -48	32	64	4	A	6.34	10.08	3.10	0.89	0.50	14.57	14.69	0.83	0.10	7.87
C	> 48	22	76	2	A	7.29	17.65	4.47	1.60	1.28	25.00	25.00	0.60	0.07	6.76

A: Arena; ar: arcilla; L: Limo; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; K: Potasio; Na: Sódio; TBI: Total de Bases de Cambio; MO: Matéria Orgánica; Nt: Nitrógeno Total; P: Fósforo.

Tabla 2. Características químicas del estiércol ovino.

MO	C.O.T	Nt	P_2O_5	K_20	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+}	C/N
				%				
37.80	21.94	0.95	0.25	0.90	0.72	0.18	0.07	23.10

MO: materia orgánica; COT: carbono orgánico total; Nt: nitrógeno total; P_2O_5: fósforo; K_20: potássio; Ca: Calcio; Mg: Magnesio; Na: Sódio; C/N: relación carbono nitrógeno.

Tabla 3. Tratamientos utilizados en el experimento

Código	Tratamiento.
T1: MA-SR-00	Mayo, Sin Riego, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T2: MA-SR-15	Mayo, Sin Riego, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T3: MA-SR-30	Mayo, Sin Riego, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol
T4: MA-RS-00	Mayo, Riego Suplementario, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T5: MA-RS-15	Mayo, Riego Suplementario, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T6: MA-RS-30	Mayo, Riego Suplementario, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol
T7: JU-SR-00	Julio, Sin Riego, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T8: JU-SR-15	Julio, Sin Riego, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T9: JU-SR-30	Julio, Sin Riego, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol
T10: JU-RS-00	Julio, Riego suplementario, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T11: JU-RS-15	Julio, Riego Suplementario, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T12: JU-RS-30	Julio, Riego Suplementario, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol
T13: SE-SR-00	Septiembre, Sin Riego, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T14: SE-SR-15	Septiembre, Sin Riego, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T15: SE-SR-30	Septiembre, Sin Riego, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol
T16: SE-RS-00	Septiembre, Riego suplementario, nivel de 0 t ha^{-1} de estiércol
T17: SE-RS-15	Septiembre, Riego Suplementario, nivel de 15 t ha^{-1} de estiércol
T18: SE-RS-30	Septiembre, Riego Suplementario, nivel de 30 t ha^{-1} de estiércol

El diseño experimental utilizado fue un modelo trifactorial con tres repeticiones. El factor A constituido por la época de aplicación del estiércol fresco (mayo: primera aplicación, julio: segunda aplicación, septiembre: tercera aplicación). El factor B constituido por el manejo de riego (Sin Riego y Riego Suplementario). El tercer factor estuvo conformado por el nivel de estiércol aplicado al suelo (0, 15 y 30 t ha^{-1}). Los tratamientos se muestran en la tabla 3.

La siembra fue el 20 de octubre del año 2009. Fue realizado un primer riego en todas las parcelas antes de la siembra, hasta que la humedad alcanzo valores cercanos a la capacidad de campo (25% de humedad), para ello se aplicó una lámina de agua de 30 mm. Posteriormente se realizaron riegos en las parcelas sometidas al tratamiento con riego suplementario. En estos tratamientos fueron aplicados 36.9 mm en la etapa de floración y 30 mm en la etapa de grano lechoso, haciendo un total de 67 mm. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 60 m^2, con una densidad de 40 000 plantas ha^{-1}. La distancia entre surcos y plantas fue de 0.5 metros. La variedad de quinua utilizada fue la denominada "blanquita".

La altura de planta fue medida con una regla desde la base de la planta hasta el ápice de la misma, las evaluaciones fueron realizadas en ocho plantas por parcela a los 10, 23, 36, 50, 63, 78, 94, 109, 124 y 136 días después de la siembra. El rendimiento fue evaluado colectando las plantas que se encontraban en dos metros cuadrados, para luego ponderarlos en kg ha^{-1}.

Para la determinación de la materia seca, las plantas fueron colectadas de un metro cuadrado luego de la cosecha y separadas en grano, tallo y hojas, no se determinó la materia seca de las raíces. Posteriormente, estos órganos de la planta fueron limpiados de los residuos del suelo, secadas en una estufa a 65°C y pesadas en una balanza de precisión. Los resultados son expresados en kg ha^{-1}.

El índice de cosecha fue determinado por la relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) de granos y la materia seca total (grano, tallo y hojas) (kg ha^{-1}), no fue considerada la raíz ni las hojas caídas.

Se determinó el contenido de nitrógeno total en porcentaje de los granos, para ello, muestras de grano fueron enviadas a los laboratorios del Instituto Boliviano de tecnología y Energía Nuclear (IBTEN) para su determinación a través del método Kjeldahl. No fue determinado el contenido de nitrógeno, según las épocas, por esa razón, para la interpretación, solo de esta variable se consideró como un diseño bifactorial.

La eficiencia de uso del nitrógeno fue determinado dividiendo el rendimiento de los granos, entre el contenido de nitrógeno en la misma, expresado en kg de grano por kg de $nitrógeno^{-1}$ (Moll *et al.* 1982), mientras que el Requerimiento de Nitrógeno, se obtuvo dividiendo contenido de nitrógeno en el grano (kg ha^{-1}) entre el rendimiento de grano (t ha^{-1}) y expresado en kg de nitrógeno por cada tonelada de grano producido.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza y las medias de los tratamientos fueron comparados utilizando el test de Tukey al 5% de error, para ello fue utilizado el software SAS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Altura, rendimiento, materia seca e índice de cosecha de la quinua.

La altura, rendimiento, materia seca e índice de cosecha del cultivo de la quinua es presentado en la tabla 4. La aplicación de estiércol fresco al suelo en el mes de mayo produjo mayor desarrollo de la altura de la planta de quinua, en relación a la aplicación en los meses de julio y septiembre. Esta situación se asume a la mayor descomposición del estiércol.

Respecto al riego suplementario, una lámina de 69 mm en el momento de la floración y grano lechoso produjo mayor altura al igual que la aplicación de estiércol por encima de 15 t ha^{-1}. Pese a los datos de mayor altura para la aplicación de estiércol en el mes de mayo, el cultivo de quinua presentó mayor rendimiento para la segunda época (julio) de aplicación de este insumo orgánico.

Para el factor riego y nivel de abonamiento orgánico los rendimientos fueron mayores al aplicar riego suplementario y estiércol por encima de las 15 t ha^{-1}. Asimismo se produjo mayor materia seca para los tratamientos donde se aplicó el estiércol en los meses de mayo y julio superando en un 40 y 48% respectivamente a la producción de biomasa comparada al incorporar el estiércol un mes antes de la siembra de la quinua. La producción de biomasa también fue estadísticamente superior con la aplicación de riego suplementario. En cuanto a los niveles de abonamiento orgánico, la mayor producción de biomasa corresponde a la aplicación de 30 t ha^{-1} de estiércol (22% más que la biomasa del testigo y 13% más que el tratamiento con aplicación de 15 t ha^{-1} de estiércol).

El índice de cosecha no registró diferencias entre épocas de aplicación de estiércol ovino, pero si fue estadísticamente diferente con la aplicación de riego suplementario y por encima de los 15 t ha^{-1} de aplicación de estiércol.

Tabla 4. Altura, rendimiento, producción de materia seca e índice de cosecha por época de aplicación de estiércol, riego y nivel de abono utilizado.

Época de aplicación	Altura	Rendimiento	Materia seca	IC
	cm	kgha^{-1}	kgha^{-1}	
Mayo	117.4 ± 12.8 a	1214 ± 642 ba	4089 ± 1287 a	0.29 ± 0.090 a
Julio	108.8 ± 12.4 b	1412 ± 661 a	3874 ± 1235 a	0.35 ± 0.109 a
Septiembre	98.1 ± 11.2 c	929 ± 456 b	2761 ± 771 b	0.32 ± 0.103 a
Riego				
Sin Riego	104.6 ± 12.9 a	960 ± 602 b	3087 ± 1026 b	0.29 ± 0.090 b
Riego Suplementario	111.3 ± 15.2 b	1410 ± 553 a	4063 ± 1275 a	0.34 ± 0.105 a
Nivel de estiércol (t ha^{-1})				
0	100.0 ± 15.2 b	899 ± 621 b	3229 ± 1513 b	0.26 ± 0.088 b
15	109.8 ± 12.1 a	1331 ± 639 a	3536 ± 968 ba	0.36 ± 0.105 a
30	114.0 ± 12.4 a	1324 ± 509 a	3960 ± 1158 a	0.33 ± 0.089 a
CV	9.55	36.7	21.9	24.8

Letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las evaluaciones promedio, según test de tukey ($p < 0.05$).

Tabla 5. Contenido de nitrógeno total en los granos de quinua bajo la aplicación de riego y 15 y 30 t ha^{-1} de estiércol ovino.

Factor	Nt en el grano
	%
Riego	
Riego Suplementario	1.800 ± 0.263 a
Sin riego	1.783 ± 0.089 a
Abonamiento t ha^{-1}	
15	1.800 ± 0.126 a
30	1.783 ± 0.248 a
CV	12.27

Letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las evaluaciones promedio, según test de tukey ($p < 0.05$).

Tabla 6. Extracción de nitrógeno en el cultivo de la quinua según su rendimiento.

Época	Rendimiento grano	N - grano	Extracción de N
	kgha^{-1}	%	kg ha^{-1}
Mayo	1214 ± 642.4 ba	2.0 ± 0.13 a	24.7 ± 13.96 a
Julio	1412 ± 661.0 a	1.8 ± 0.21 b	25.7 ± 13.06 a
Septiembre	929 ± 455.6 b	1.8 ± 0.18 b	16.4 ± 7.05 b
Riego			
Sin Riego	960 ± 601.9 b	1.9 ± 0.09 a	17.7 ± 10.70 a
Riego Supl.	1410 ± 552.9 a	1.9 ± 0.25 b	26.9 ± 12.20 b
Nivel abonamiento t ha^{-1}			
0	879 ± 621.3 b	2.1 ± 0.08 a	18.10 ± 13.52 a
15	1464 ± 638.5 a	1.8 ± 0.11 b	24.00 ± 12.35 a
30	1406 ± 508.5 a	1.8 ± 0.22 b	24.00 ± 10.79 a
CV	36.71	--	37.7

Letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las evaluaciones promedio, según test de tukey ($p < 0.05$).

Contenido de nitrógeno total en los granos de quinua

En cuanto al nitrógeno total en los granos de la quinua no hubo diferencias significativas entre los diferentes tratamientos riego y niveles de abonamiento orgánico (Tabla 5). Los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre las aplicaciones de 15 y 30 t ha^{-1} de estiércol, sin embargo parece existir un aumento de nitrógeno total en los granos a los que no se aplicó riego, no obstante estos datos no son suficientes para aseverar esta situación. Según Gonzales (1999) cuando hay ocurrencia de estrés hídrico, la planta puede acumular solutos, aminoácidos y proteínas para combatir a la sequia y periodos fríos. Los valores encontrados de 1.6% para casi todos los tratamientos son ligeramente más bajos en relación a los encontrados por Huanca (2008) en el altiplano central donde aplicó 0, 5 y 10 t ha^{-1} de estiércol de ovino en condiciones de riego suplementario encontrando valores de aproximadamente 2%, pero sin encontrar diferencias entre sus tratamientos.

En Alemania Shulte *et al.* (2005), aplicaron niveles de 0, 80 y 120 kg de nitrógeno disponible en el cultivo de la quinua, encontrando valores de 2.06%, 2.18% y 2.34% de nitrógeno total en los granos, no habiendo diferencias estadísticas, sin embargo encontró diferencias al comparar la cosecha del año de 1994 con el año de 1995 (2.09% y 2.30% respectivamente), de la misma manera encontró diferencias estadísticas al comparar dos variedades "Faro" y "Cochabamba".

La tabla 6, muestra la extracción de nitrógeno para un determinado rendimiento. En ella es posible observar una relación positiva entre estas dos variables. Así para producir más de 1200 kg ha^{-1} de grano de quinua, este acumula aproximadamente 24 kg ha^{-1} de nitrógeno. Tomando en cuenta esta relación, para producir materias seca de 3000 a 4000 kg ha^{-1}, se necesitaría cubrir con 100 a 150 kg de nitrógeno por hectárea (datos no mostrados).

Tomando en cuenta que los suelos poseen bajos contenidos de nitrógeno (0.06% de nitrógeno total), la capacidad de ofrecer este nutriente al cultivo de la quinua se constituye en una limitación, de ahí la respuesta del rendimiento ante los mayores aportes de estiércol.

Requerimiento de nitrógeno y eficiencia de uso del nitrógeno

No se presentaron diferencias significativas en el requerimiento de nitrógeno y la eficiencia de uso del nitrógeno en las épocas de aplicación del estiércol y aplicación de riego, pero si hubo diferencias con el nivel de abonamiento orgánico por encima de las 15 t ha^{-1} aplicados al suelo, lo que hace suponer que estos parámetros son más sensibles al estiércol aplicado (Tabla 7).

Tabla 7. Extracción de nitrógeno en el cultivo de la quinua según su rendimiento.

	Requerimiento de N	Eficiencia de Uso del N
Época	**kg N t grano^{-1}**	**kg grano kg N^{-1}**
mayo	20.0 ± 1.33 a	50.2 ± 3.25 a
Julio	18.2 ± 2.11 a	55.6 ± 6.47 a
Septiembre	18.3 ± 1.84 a	55.0 ± 5.31 a
Riego		
Sin Riego	19.0 ± 2.59 a	53.7 ± 7.53 a
Riego Suplementario	18.7 ± 0.97 a	53.5 ± 2.85 a
Nível de abonamiento t ha^{-1}		
0	20.6 ± 0.82 a	48.6 ± 1.96 b
15	18.0 ± 1.12 b	55.9 ± 3.49 a
30	18.0 ± 2.22 b	56.3 ± 6.57 a
CV	1.2	1.2

Letras diferentes (a, b) indican diferencias significativas entre las evaluaciones promedio, según test de tukey ($p < 0.05$).

Como promedio, por cada tonelada de grano producido se requiere 19 kg de nitrógeno, mientras que la eficiencia del uso del nitrógeno mostró que por cada kilogramo de nitrógeno, el cultivo de la quinua produce 53.6 kg de grano. Alvarez (2006) encontró que la eficiencia de uso del nitrógeno para el trigo fue de 33 kg de grano kg de nitrógeno, mientras que Kolchinski y Suchuch (2003) encontraron valores de 43 a 49 kg grano por kg de nitrógeno para la avena blanca. Estos resultados muestran aparentemente que la quinua presenta una elevada eficiencia de uso del nitrógeno, sin embargo será necesario realizar otros estudios para validar estos resultados.

CONCLUSIONES

La mayor productividad del grano de quinua, fue obtenida cuando se aplicó al suelo el estiércol en el mes de julio (1400 kg de grano ha^{-1}), 4 meses antes de la siembra, mientras que el menor rendimiento se produjo en el tratamiento donde se aplicó el estiércol en el mes de septiembre, un mes antes de la siembra del cultivo de la quinua.

La aplicación de una lámina de 67 mm en la etapa de floración y grano lechoso incrementó el rendimiento en un 45 % con respecto al tratamiento al que no se aplicó riego suplementario.

El rendimiento de la quinua respondió adecuadamente a la aplicación de 15 t ha^{-1} de estiércol, llegando a 1300 kg de grano ha^{-1}, no habiendo diferencia con la aplicación de 30 t ha^{-1} de estiércol. Las diferentes condiciones de manejo, no incidieron en el porcentaje de nitrógeno acumulado en el grano, la misma se encontró entre 1.7 a 1.8%.

La eficiencia de uso del nitrógeno en la quinua fue de 50 a 55 kg de grano por cada kg de nitrógeno acumulado en el grano, presentándose diferencias, solo ante las aplicaciones de abono orgánico.

Agradecimientos. Al proyecto QuinAgua de la Facultad de Agronomía y al convenio de la Universidad Católica de Leuven de Bélgica, por el apoyo financiero.

REFERENCIAS

ALVAREZ R (2006) Materia Orgánica. Valor Agronómico y dinámica en suelos Pampeanos. Argentina. Ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, 206p.

ARRIECHE-LUNA E, RUIZ-DAGER M (2010) Influence of inorganic and organic fertilization on microbial biomass carbon and maize in two soil of contrasting pH. Agrociencia, n. 249-260.

BHARGAVA A, SHUKLA S, OHRI D (2003a) Genetic variability and heritability of selected traits during different cuttings of vegetable Chenopodium. Ind. J. Genet. Plant Breed. 63 (4), 359–360.

CAYUELA ML, SINICCO ABT, MONDINI BC (2009) Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil. Applied soil ecology 41: 118-127.

CONDORI O (2007) Evaluación participativa del riego deficitario y de fertilización orgánica sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (*Chenopodium Quinoa* Willd) en el Altiplano Sur. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 121 p.

DELATORRE J, HERRERA J (2003) Current use of Quinoa in Chile. Food Reviews International, v. 19, n. 1, p. 155 – 165. 2003.

FAUTAPO (2008) Estudio de suelos del área productora de quinua Real Altiplano sur boliviano. Sucre – Bolivia, 153p.

GARCÍA M, RAES D, ALLEN R, HERBAS C (2004) Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agric. Forest Meteorol. 125, 67-82.

GARCÍA M, TABOADA C, YUCRA E (2006) Evaluación de las tendencias del Balance Hídrico como indicador del cambio climático. Ministerio de Planificación del Desarrollo, Reino de los Países Bajos, La Paz. 42 p.

GEERTS S, GARCIA M, CUSICANQUI J, TABOADA C, MIRANDA R, YUCRA E, RAES D (2008) Revisión Bibliográfica de los últimos avances en el conocimiento de la quinua (Chenopodium quinoa Wild). QUINAGUA, Consejo Interuniversitario Flamenco VLIR, La Paz Bolivia, 30p.

HERVE D, LEDEZMA. R, ORSAG V (2002) Limitantes y manejo de los suelos salinos y/o sódicos en el Altiplano Boliviano. Institut de recherche pour le development, CONDESAN, La Paz Bolivia, 263p.

HERVÉ D, MITA D, COÛTEAUX MM (2006) Construcción de un balance de nitrógeno en cultivos de papa bajo rotación con largo descanso. Revista de Ecología en Bolivia. 41(3): 133:153.

GONZALES JA. (1999) Eco fisiología y morfología del estrés debido a factores adversos. En el I curso internacional sobre sobre fisiología de la resistencia a sequia en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). Centro Internacional de la papa, Perú, 101p.

HUANCA R (2008) Evaluación de diferentes niveles de abono orgánico y riego deficitario sobre el desarrollo y rendimiento de quinua (Chenopodium quinoa Willd) en el Altiplano Central. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 147 p.

KOLCHINSKI EM y SCHUCH LOB (2003) Eficiência no uso do nitrogênio por cultivares de aveia branca de acordo com a adubação nitrogenada. R. Bras. Ci. Solo, 27:1033-1038.

MOLL RH, KAMPRATH EJ, JACKSON WA. (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. J. 74:562-564

MORALES I, RUIZ C, AMURRIO P (2001) Efecto de la incorporación de diferentes niveles de estiércol y estudio de su mineralización en suelos de suka kollus y pampa con cultivos de papa. Instituto de Ecología. pp 68 – 73. En: Dorado, L. & S. Laguna (eds.) Memorias del Primer Congreso Boliviano de la Ciencia del Suelo en Bolivia. La Paz, Bolívia.

MURILLO R (2006) Comportamiento del nitrógeno proveniente de fertilizantes minerales en el cultivo de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo condiciones de riego y secano. Tesis de licenciatura. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz Bolivia, 132 p.

ORSAG V, CASTRO E, LEON ML, PACOSACA O, MAMANI F (2011) Evaluación de la fertilidad de los suelos en la zona intersalar. Producción sostenible de quinua. DANIDA, PIEB. La Paz Bolivia, 174p.

REPO-CARRASCO R, ESPINOZA C, JACOBSEN SE (2003) Nutritional value and use of the Andean crops quinoa (Chenopodium quinoa) and kañiiwa (Chenopodium pallidicaule). Food Rev. Int. 19 (1–2), 179–189.

REZENDE PC, ARAUJO C (2007) Adubação nitrogenada de hortaliças. Princípios e praticas como o tomateiro. Editora UFV, Brasil, 148 p.

SCHULTE G, KAUL H, KRUSE M, AUTFHAMMER W (2005) Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudo cereals amaranth, quinoa, and buckwheat under different nitrogen utilization. European Journal of Agronomy. 22: 95-100.

SOIL SURVEY STAFF (2006) Keys to soil taxonomy. United States Departament of agriculture, Natural Resources Conservation Service. Tenth edition. 341p.

VIDELA C, PAZOS A, TRIVELIN PC, ECHEVERRIA HE, STUDDERT GA (2005) Mineralización bruta de Nitrógeno bajo labranza convencional, siembra directa y pastura. Ci. Suelo 23 (2): 133 -144.

YAGODIN BA, PETERBURGSKI A, ASÁROV J, DIOMIN V, PLESHKOV B, RESHÉTNIKOVA N (1986) Sistema de empleo de fertilizantes. Editorial Mir Moscú, Moscú, 363 p.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

RESPUESTA DEL CAFÉ A LA FERTILIZACIÓN CON AZUFRE

Siavosh Sadeghian Khalajabadi ✉, Hernán González Osorio

Centro Nacional de Investigaciones de Café – CENICAFÉ

✉: Siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

Palabras claves:

Coffea arabica
Sulfato de amonio
Yeso
Azufre elemental

RESUMEN

Habitualmente se asume que los suelos de la zona cafetera central de Colombia por su génesis y niveles relativamente altos de materia orgánica, se encuentran abastecidos con azufre (S); pese a ello, buena parte de este elemento se encuentra en formas que pueden no ser aprovechadas por los cultivos, razón por la cual se hace necesario incluirlo en los planes de fertilización. En esta investigación, desarrollada en las fincas El Amparo (Fredonia – Antioquia), La Cristalina (Chinchiná – Caldas) y San Alberto (Buenavista – Quindío), se determinó la respuesta del café a la fertilización con S, y su relación con la concentración foliar de este elemento. Los tratamientos consistieron en dos dosis (50 y 100 kg ha^{-1} año^{-1} de S), suministrados a través de tres fuentes (azufre elemental–SE, Yeso y SAM); además de un testigo sin S. En La Cristalina no hubo efecto de los tratamientos en la producción; en El Amparo se presentó respuesta con las dosis suministradas sólo en una de las cosechas (año 2004), mientras que en San Alberto la aplicación de S contribuyó a incrementar la producción en los años 2003 y 2006. Las dosis óptimas estuvieron entre 60 y 70 kg ha^{-1} año^{-1}, independientemente de la fuente empleada. En el tratamiento testigo la concentración más alta de S foliar se registró en La Cristalina (0.17%), seguido por El Amparo (0.15%) y San Alberto (0.14%), y las máximas producciones se obtuvieron con valores entre 0.17% y 0.22%.

RESPONSE OF COFFEE TO SULPHUR FERTILIZATION

Keywords:

Coffea Arabica
Ammonium sulfate
Gypsum
Elemental sulfur

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 181-185

ISSN 0562-5351

ABSTRACT

Due to relatively high levels of organic matter and the genesis of soils in the Colombian Coffee Zone, it is commonly assumed that these soils have sulphur (S) abundant; nevertheless, a significant amount of S in these soils is found in such forms that crops cannot take full advantage of it, it is then necessary to include S in fertilization plans. This research, held in the farms El Amparo (Fredonia – Antioquia), La Cristalina (Chinchiná – Caldas) and San Alberto (Buenavista – Quindío), determined the response of coffee to S fertilization and their relationships with the leaves concentration of this element. Treatments consisted in two rates as follow 50 and 100 kg S ha^{-1} year^{-1}, supplied through three fertilizer sources (Elemental Sulfur – SE, gypsum and SAM); additionally an a control without S. The effect on yields was found in La Cristalina. El Amparo showed a response to applied doses just in one harvest, in 2004, whereas in San Alberto, the usage of S contributed to increase yields in 2003 and 2006. Optimal doses oscillated between 60 and 70 kg S ha^{-1} year^{-1}, and independently to the source used. In the control treatment the highest concentration of foliar S was registered in La Cristalina (0.17%), followed by El Amparo (0.15%) and San Alberto (0.14%), and the maximum yields were to be found for values that fluctuated between 0.17% and 0.22%.

Recibido: Julio 15
Revisado: Octubre 15
Aceptado: Noviembre 15

INTRODUCCIÓN

El S es un elemento esencial para las plantas; este se absorbe desde la solución del suelo como ion sulfato y luego de incorporarse a las proteínas como la Cisteína, la Metionina y la Cistina, inicia su participación en numerosos procesos metabólicos como la activación de enzimas y la síntesis de aminoácidos (Hawkesford y De Kok 2006). Su concentración en los tejidos vegetales en muchos casos es similar a la del fósforo, aunque varía según la especie y el órgano de la planta (Scherer 2001). En café, se ha establecido que el nivel de suficiencia del elemento en las hojas corresponde al 0.20% (Martínez *et al.* 2003), mientras que concentraciones por debajo de 0.10% se asocian con bajas producciones (Sampaio *et al.* 1999).

Se ha estimado que del total de suelos cultivados en América latina, más del 50% presentan deficiencias en S aprovechable (Malavolta y Paulino 1987). En Colombia, se reportan bajos niveles en el 27% de las áreas cultivadas de los valles interandinos, el 68% en las regiones de clima medio y el 80% de los suelos de origen volcánico (Guerrero 1996). Un estudio desarrollado en la zona cafetera colombiana, mostró que el 70% de los suelos, la mayor parte originados a partir de cenizas volcánicas, contenían menos de 10 mg kg^{-1} (González *et al.* 2003). Bajo estas circunstancias, ha surgido el interés por incluir dicho nutrimento en los planes de fertilización. Para condiciones de Brasil, dosis entre 20 y 75 kg ha^{-1} han contribuido con el aumento en la producción de café (Freitas *et al.* 1972, Malavolta 1986). En el país, Machado (1958) no encontró respuesta a la aplicación de S elemental en plantaciones de porte alto; en tanto que, Sadeghian *et al.* (2006), reportan efecto positivo con el uso de sulfato de amonio (SAM) y Kieserita como fuentes del elemento en café Variedad Colombia. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta del café en producción al suministro de diferentes dosis y fuentes de S, y su relación con la concentración del elemento en el tejido foliar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en tres fincas de la zona cafetera central de Colombia, cuya ubicación y características de los suelos se consignan en la Tabla 1. En cada localidad se evaluaron siete tratamientos, consistentes en dos dosis de S (50 y 100 kg ha^{-1} $año^{-1}$), suministrados a través de tres fuentes (sulfato de amonio – SAM, azufre elemental – SE y sulfato de calcio – yeso); además de un testigo sin este elemento. El diseño experimental fue bloques completos al azar en arreglo factorial 3 (fuentes) x 2 (dosis) + 1 (testigo). La fertilización con N, P, K y Mg se definió según el análisis de suelo y se fraccionó en dos aplicaciones por año. Se registró la producción de café cereza en cada pase de cosecha y se totalizó por año; así mismo, se determinó la concentración foliar de S en el tercer par de hojas durante 7 oportunidades en El Amparo, 11 veces en La Cristalina y 15 en San Alberto. En El Amparo y San Alberto el experimento tuvo una duración de cinco años (2002 y 2006) y en La Cristalina tres (2002 a 2004).

Tabla 1. Ubicación y características de los suelos evaluados al iniciar la investigación.

	Finca		
Ubicación/Propiedad	El Amparo	La Cristalina	San Alberto
Departamento	Antioquia	Caldas	Quindío
Municipio	Venecia	Chinchiná	Buenavista
pH	4.6	5.2	5.1
P (mg kg^{-1})	4	23	19
MO (%)	74	102	74
K ($cmol_c$ kg^{-1})	0.62	0.22	0.12
Ca ($cmol_c$ kg^{-1})	2.1	3.4	2.1
Mg ($cmol_c$ kg^{-1})	1.1	0.9	0.2
Al ($cmol_c$ kg^{-1})	6.2	0.5	0.7
S (mg kg^{-1})	3	6	3
Clasificación textural	Arcilloso	Franco	Franco arcilloso arenoso

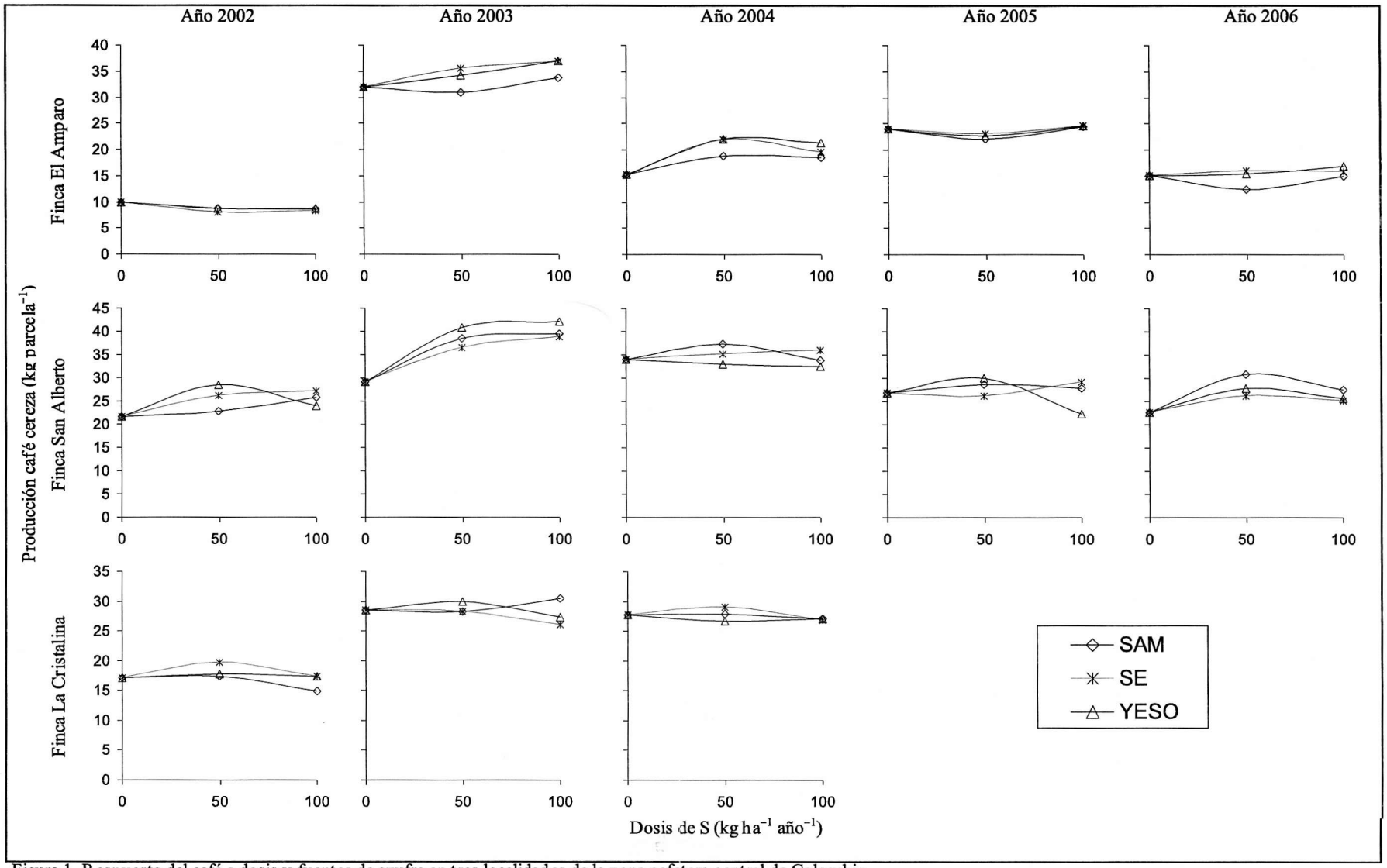


Figura 1. Respuesta del café a dosis y fuentes de azufre en tres localidades de la zona cafetera central de Colombia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta en producción

En la Figura 1 se presentó el efecto de las dosis y fuentes de S sobre la producción de café cereza a través de tiempo para cada una de las localidades. En la finca La Cristalina no se registró efecto de los tratamientos durante los tres años de evaluación. En El Amparo sólo se encontró respuesta a las dosis suministradas en el año 2004 ($p<0.05$), sin que hubiera diferencias entre las fuentes; en este sentido, el comportamiento de la respuesta se ajustó a un modelo cuadrático, cuyo punto de inflexión (dosis óptima biológica) se calculó en 66 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de S (Figura 2). En esta localidad, pese a que los promedios registrados entre las fuentes fueron estadísticamente iguales, el menor valor se obtuvo al emplear SAM. Cabe resaltar que el incremento porcentual de la producción, al aplicar los 66 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de S, equivale al 40% de la producción del tratamiento Testigo para este año en particular. En San Alberto se presentó efecto de las dosis en los años 2003 y 2006, lo cual se reflejó en el acumulado de los cinco años de evaluación (Figura 2); sin embargo, el comportamiento de las tres fuentes fue estadísticamente similar; en este sentido, las dosis de S para alcanzar las máximas producciones, fueron las siguientes: año 2003, 85 kg ha^{-1} $año^{-1}$, año 2006, 61 kg ha^{-1} $año^{-1}$, y el promedio 2002 a 2006, 68 kg ha^{-1} $año^{-1}$. En general, los anteriores valores son superiores a los encontrados por Sadeghian *et al.* (2006); quiénes obtuvieron las máximas producciones con dosis más bajas (24 kg ha^{-1} $año^{-1}$), empleando como fuente SAM o Kieserita. Estas diferencias pueden estar asociadas con las dosis empleadas, pues en esta investigación el rango entre las cantidades suministradas es relativamente mayor frente a las aplicadas por dichos autores (0, 24, 48 y 72 kg ha^{-1} $año^{-1}$). Cabe resaltar que actualmente para las condiciones de Colombia se sugiere aplicar entre 50 y 60 kg ha^{-1} $año^{-1}$ de S cuando los contenidos de éste en el suelo son menores a 6 mg kg^{-1} y entre 25 y 30 kg ha^{-1} $año^{-1}$ para valores entre 6 y 12 mg kg^{-1} (Sadeghian 2008).

Azufre foliar

En ninguna de las oportunidades en las que se valoró la concentración de S en las hojas, el análisis de varianza mostró efecto de la fuente o de la interacción dosis x fuente; sólo se halló respuesta a las dosis aplicadas, lo cual sugiere que en general las variaciones en el contenido de este elemento siguen un patrón similar para las tres fuentes. La concentración promedio en el tratamiento Testigo fue 0.146% en San Alberto, 0.153% en El Amparo y 0.167% en La Cristalina; estos valores, a pesar de no ser muy disímiles, guardan una estrecha relación con respecto a la respuesta obtenida en la producción, y sugieren que un nivel adecuado de S puede ser mayor a 0.17%, tal como se presentó en la finca La Cristalina, donde no hubo respuesta a los tratamientos.

En la Figura 3 se pueden observar las variaciones de S foliar en función de las dosis aplicadas, independiente de la fuente. Tanto para San Alberto como El Amparo, sitios en los cuales hubo respuesta al suministro de S, el comportamiento de la respuesta se ajusta a una tendencia de tipo cuadrático, y aunque en La Cristalina no se presentó efecto de los tratamientos sobre la producción, hubo un comportamiento similar a lo anterior, pero de menor magnitud.

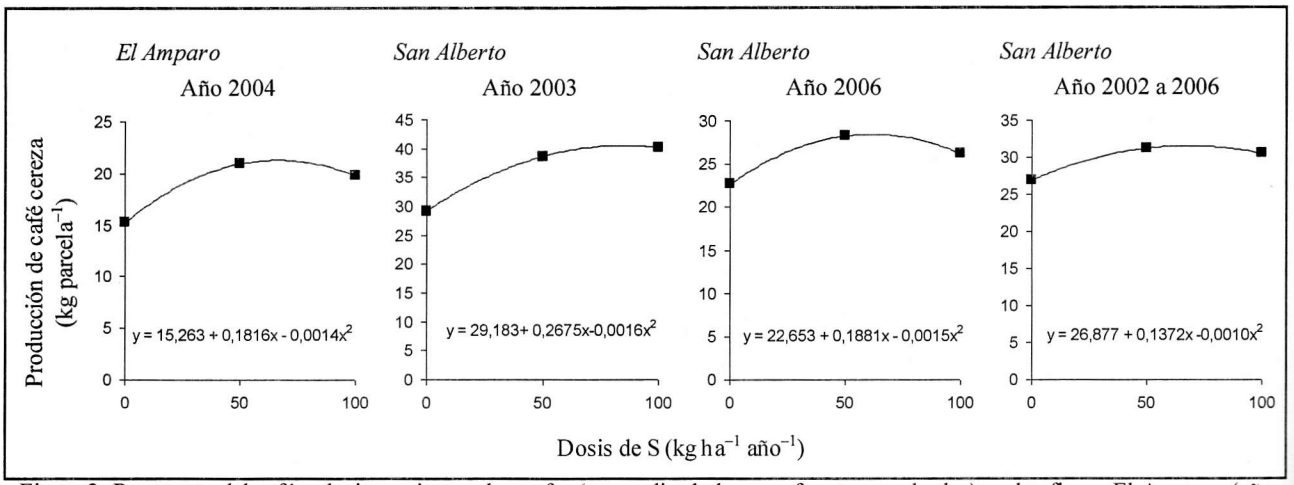


Figura 2. Respuesta del café a dosis crecientes de azufre (promedio de las tres fuentes empleadas) en las fincas El Amparo (año 2004) y San Alberto (años 2003, 2006 y acumulado 2002 a 2006).

Para los años en los que se detectó respuesta en producción, los máximos rendimientos alcanzados estuvieron asociados con concentraciones foliares de S entre 0.17% y 0.22%. Para la finca San Alberto, en donde fue más consistente el efecto de los tratamientos a través de tiempo, el rango adecuado estuvo comprendido entre 0.16 y 0.22%, valores asociados al 95 y 100% de la producción, respectivamente.

De acuerdo con los reportes de Malavolta (1993) y Álvarez *et al.* (2007) el rango adecuado de S foliar para los cafés arábigo se encuentra entre 0.15 y 0.20%. El límite inferior del anterior rango, es decir 0.15%, es menor a lo hallado en este estudio (0.16 a 0.17%) y corresponde a aquellas concentraciones para las cuales se presentaron respuesta a la fertilización. En cuanto al límite superior se refiere (0.20%), éste se encuentra dentro del rango óptimo.

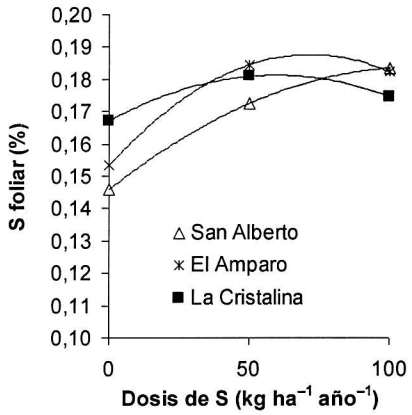


Figura 3. Concentración foliar de S en café, en respuesta a dosis crecientes de este nutriente en tres localidades. Los datos corresponden al promedio de las evaluaciones realizadas en cada sitio durante todo el experimento

CONCLUSIONES

Para las condiciones de este estudio, las dosis requeridas de azufre (S) por el cultivo de café estuvieron entre 60 y 70 kg ha^{-1} $año^{-1}$, independientemente de la fuente empleada.

Los máximos rendimientos alcanzados se asociaron con concentraciones foliares de S entre 0.17% y 0.22%.

REFERENCIAS

ALVAREZ VVH, ROSCOE R, KURIHARA CH, PEREIRA NF (2007) X – Enxofre. In: Fertilidade do solo. SBCS, Viçosa. NOVAIS RF, ÁLVAREZ VVH, BARROS NF, FONTES RLF, CANTARITTI RB, NEVES JC (ed.). p.595-644.

FREITAS LMM, GOMES FP, LOTT WL (1972) Effects of sulfur fertilizer on coffee. EDITADO EN: New York (Estados Unidos), IRI Research Institute. 24 p.

GONZALEZ OH, SADEGHIAN KS, MEJIA MB (2003) Caracterización del azufre en algunos suelos de la zona cafetera colombiana. Cenicafé (Colombia) 54(3):226-233.

GUERRERO RR (1996) Respuestas de los cultivos a la fertilización con azufre en la agricultura colombiana. IFA–PPI Conferencia regional para latino América y el Caribe. Monómeros colombo – venezolanos S.A., Colombia. 9p.

HAWKESFORD MJ, De KOK LJ (2006) Managing sulphur metabolism in plants. Plant, Cell and Environment (Inglaterra) 29(3):382–395.

MACHADO SA (1958) Algunos resultados experimentales con fertilizantes en cafetos. Cenicafé (Colombia) 9(7–8):157–198.

MALAVOLTA E (1986) Efeitos de doses e fontes de enxofre em culturas de interesse economico. IV. Cafe. EDITADO EN: Sao Paulo (Brasil), Centro de Pesquisa e Promocao de Sulfato de amonio. 41 p.

MALAVOLTA E (1993) Nutrição mineral e adubação do cafeeiro, colheitas econômica máximas. Editora Agronômica Ceres, São Paulo. 210 p.

MALAVOLTA E, PAULINO VT (1987) Sulphur balance in central in south América; International conference Sulphur 87. Houston, British Sulphur Corpotration, p 88–96.

MARTÍNEZ PHE, SOUZA BR, BAYONA AJ, VANEGAS AVH, SANZ M (2003) Coffee–tree Floral Analysis as a Mean of Nutritional Diagnosis. Journal of plant nutrition 26 (7): 1467–1482.

SADEGHIAN KS (2008) Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. Boletín Técnico No. 32. Chinchiná : CENICAFE. 43 p.

SADEGHIAN KS, HERNANDEZ GE, ROSS M, GUERRERO RR (2006) Fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. *In:* CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 13. Bogotá (Colombia), Octubre 4-6. Memorias. EDITADO EN : Bogotá (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. 7 p.

SAMPAIO E, FAQUIN V, GONTIJO P (1999) Relaçôes entre teores foliares de nutrirntes e produçâo do cafeeiro (Coffea arabica L.) sumetido a doses de calcário e gesso. Ciência e Agrotecnologia., Lavras, 23 (4): 857–864.

SCHERER HW (2001) Sulphur in crop production. European Journal of Agronomy. 14: 81–111.

ARTÍCULO CORTO

Sociedad Colombiana
de la Ciencia del Suelo

MONITOREO DEL pH Y FÓSFORO SOLUBLE EN LA RIZOSFERA DE ARBOLES DE AGUACATE EN EL NORTE Y ORIENTE ANTIOQUEÑO

Sandra Serna, Beatriz Montoya y Walter Osorio ✉

Universidad Nacional de Colombia
Calle 59A No. 63-20
050034 Medellín
Colombia

✉:nwosorio@unal.edu.co

Palabras claves:

Persea americana
Rizosfera
Fertilidad del suelo
Fosfato

RESUMEN

En Colombia los cultivos de aguacate (Persea americana Mill.) usualmente se establecen en suelos ácidos y con baja disponibilidad de nutrientes, lo cual obliga a los productores a aplicar una alta cantidad de enmiendas (fertilizantes y cales). Lo anterior incrementa los costos de producción y si se hace sin un adecuado control de las dosis y un monitoreo del cambio en los parámetros del suelo puede crear desbalances nutricionales en las plantas cultivadas. El presente estudio se estableció con el objetivo de monitorear el pH y la concentración de P en la solución del suelo rizosférico de arboles de aguacate cv. Hass en el Norte y Oriente de Antioquia, Colombia. Para tal fin se realizaron muestreos en diferentes huertos de aguacate de tres a cinco años de edad. En estos se tomaron muestras del suelo rizosférico de arboles que presentaban en apariencia un adecuado o deficiente desarrollo (pobre crecimiento, clorosis, síntomas de enfermedades). Los resultados indican que el pH del suelo fluctúo entre 5.0-7.0 y 3.9-7.1, respectivamente. De igual forma, el nivel de P disponible estuvo entre 0.01-1.78 y 0.02-1.13 mg L^{-1}. Este rango de fluctuación tan amplio en ambas variables indica la alta diversidad de dosis de cal y fertilizantes fosfóricos; en algunos casos estas dosis resultan insuficientes y en otros casos son excesivas. Sin embargo, no se halló una relación significativa entre el estado de la planta (buen vs. mal crecimiento) con los parámetros pH y P disponible.

MONITORING SOIL pH AND SOLUBLE P IN THE RHIZOSPHERE OF AVOCADO TREES AT THE NORTHERN AND EASTERN ANTIOQUIA

Keywords:

Persea americana
Rhizosphere
Soil fertility
Phosphate
Soil pH

ABSTRACT

In Colombia, avocado (Persea americana Mill.) trees are usually cultivated in acidic and infertile soils, which force to farmers to apply lime and fertilizers. As a result of the lack of criteria for an appropriate soil management in this crop, it is common to observe the establishment of uncontrolled fertilization programs characterized for recurrent high rates of soluble fertilizer and lime. In addition to the increase in production costs, this may produce imbalance on plant nutrition, slow plant development, and susceptibility to plant pathogens. For this reason, it is necessary to observe the changes in soil fertility status of intensive crops. The objective of this study was to monitor soil pH and soluble P in the rhizosphere of avocado trees at the Northern and Eastern Antioquia, Colombia. With this purpose, rhizosphere samples were collected from 3-5 year old orchards of avocado cv. Hass with adequate and improper performance (poor development, chlorotic, unhealthy). Soil pH ranged from 5.0 to 7.0 and from 3.9 to 7.1, respectively. Similarly, soluble P fluctuated from 0.01 to 1.78 and 0.02 to1.13 mg L^{-1}, respectively. These results indicated that in some cases the rates of lime and fertilizers are insufficient, while in other cases these are excessive. The results are discussed in terms of induced nutritional disorders (micronutrient deficiency) and biological imbalance with rhizosphere microorganisms, particularly arbuscular mycorrhizal fungi.

SUELOS ECUATORIALES
42 (2): 186-190

ISSN 0562-5351

Recibido: Agosto 2011
Revisado: Julio 2012
Aceptado: Octubre 2012

INTRODUCCIÓN

En Colombia el aguacate es un cultivo que en años recientes ha despertado un gran interés, el Ministerio de Agricultura ha propuesto aumentar el área cultivada desde 16220 ha registradas en el año 2010 a 29600 ha en el año 2020 (FAO 2006, MADR 2007). Así mismo, se planea incrementar el rendimiento medio anual de 11.2 t ha^{-1} a 13.54 t ha^{-1}. Lo anterior representa un incremento del 45% en área y del 17% en el rendimiento (MADR 2007). Si bien todo lo que produce el país se consume internamente, se espera con el tiempo exportar al mercado Europeo y Norteamericano, pero la fruta y el proceso de producción deben satisfacer estándares internacionales de Buenas Prácticas Agrícolas y Certificación de Calidad (ASOHOFRUCOL-FNFH 2005, FONTAGRO 2006). Buena parte del éxito en la producción de esta especie se apoya en un adecuado manejo de la fertilidad del suelo (Osorio 2012). Desafortunadamente, se ha investigado muy poco sobre este tema y aún no hay una clara certeza sobre los niveles de fertilizantes y enmiendas que se deben aplicar al cultivo en las diferentes condiciones de suelo existentes (Bernal y Díaz 2006).

En Antioquia se han establecido huertos en aguacate grandes extensiones de las subregiones del Norte y el Oriente Antioqueño (INFOAGRO 2006). En general, estos suelos se han formado a partir de cenizas volcánicas o sobre materiales del batolito antioqueño en regímenes de alta pluviosidad y de baja temperatura, con un intenso lavado de bases intercambiables y con una baja tasa de descomposición de la materia orgánica (IGAC 1988). En consecuencia, la fertilidad natural de estos suelos es muy baja, se caracterizan por una extremada acidez (pH < 5.0), altos niveles de aluminio intercambiable (> 1 $cmol_c$ kg^{-1}), y baja disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno, fósforo (P), calcio, magnesio y boro (Zapata 1998). Dado su origen, la fracción coloidal está compuesta por alófana, caolinita, gibista, goetita y complejo húmicos-alofánicos, lo cual favorece la alta fijación de P (Fox y Kamprath 1970, Juo y Fox 1977, Havlin *et al.* 1999). En consecuencia, este elemento se encuentra en muy baja concentración en la solución del suelo (0.001-0.02 mg L^{-1}) y el nivel extraído con el método de Bray-II es comúnmente muy bajo (< 10 mg kg^{-1}) (Osorio 2012).

Para corregir la extrema acidez del suelo y la baja disponibilidad de P se aplican cal y fertilizantes fosfóricos solubles. Pero debido a la falta de criterios claros sobre como fertilizar estos cultivos los agricultores resultan aplicando cantidades deficientes o, en muchos casos, excesivas de estos materiales. Estas aplicaciones se han vuelto recurrentes y la falta de monitoreo en la condiciones del suelo ha ocasionado que en los suelos se generen desbalances nutricionales, tanto por defecto como por exceso. Como es de esperarse, esto ha generado inconsistencia en los rendimientos ya que con frecuencia las plantas pueden tener desbalances nutricionales, caracterizados por bajo crecimiento, clorosis, retraso en la floración, excesiva caída de flores y frutos.

El objetivo de este trabajo fue monitorear el pH y la concentración de P en la solución del suelo rizosférico de arboles de aguacate (*Persea americana* Mill. cv. Hass) en la región del Norte y Oriente Antioqueño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de muestreo

Los muestreos de suelos se realizaron en árboles de huertos productivos de aguacate de la variedad "Hass" ubicadas en las regiones del Norte y Oriente Antiqueño (Colombia). En cada lote se seleccionaron al azar árboles de buen desempeño (sanos y vigorosos) y otros con reducido crecimiento (pequeños, cloróticos y en algunos casos enfermos). De cada árbol se tomaron de cuatro sitios un total de 200 g de suelo rizosférico a una profundidad de 0-10 cm. Las muestras se empacaron en bolsas de plástico posteriormente se trasportaron al Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Medición de pH y P soluble del suelo

Para la medición del pH de cada una de las muestras se transfirieron 10 g de suelo (base seca) a tubos plásticos de centrífuga de 50 cm^3 de capacidad, luego se adicionaron 20 cm^3 de agua destilada y la suspensión se agitó con varillas de vidrio durante 1 minuto. Luego de 30 min de reposo se midió el pH en el sobrenadante con un electrodo selectivo.

Para la determinación de P soluble del suelo de cada muestra se tomaron 3 g (base seca) y se transfirieron a tubos de centrífuga. Luego se adicionó 30 cm^3 de $CaCl_2$ 0.01 *M* y dos gotas de tolueno para inhibir la actividad microbiana. Los tubos se agitaron horizontalmente en un agitador recíproco durante 1 hora. Posteriormente, los tubos se centrifugaron a 5000 rpm (2500 x *g*) por 15 min y el sobrenadante se paso a través de un papel filtro Whatman No. 1. La concentración de P fue determinada a través del método del azul de molibdato (Murphy y Riley 1962) con un espectrofotómetro Genesys-20 a una longitud de onda de 890 nm.

Manejo estadístico de los datos

Los datos fueron sometidos a análisis descriptivos, correlación y se organizaron en histogramas de frecuencia. Para lo anterior se utilizó el paquete estadístico Statgraphics- Centurion versión XV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

pH del suelo

Para la zona del Norte y Oriente Antioqueño se encontró que el pH del suelo rizosférico fluctuó entre 5.0-7.0 y 3.9-7.1, respectivamente (Figura 1).

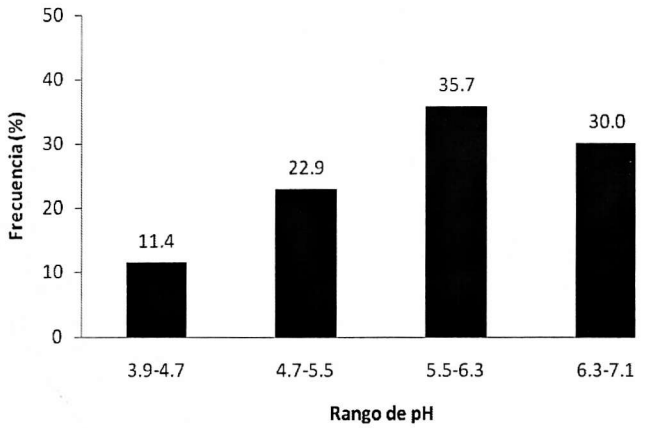


Figura 1. Histograma de frecuencia del pH en la solución del suelo de la rizosfera de huertos de aguacate del Norte y Oriente de Antioquia.

Estas fluctuaciones tan grandes del pH se deben a la variación en el manejo del suelo con cales, particularmente cal agrícola ($CaCO_3$). Las dosis aplicadas son muy variables, pero se reportan adiciones que van desde 1 hasta 10 kg de cal por árbol. Se ha reportado que el rango de pH del suelo adecuado para las plantas de aguacate es de 5.5-6.5 (Bernal y Díaz 2006), pero ciertamente se pueden encontrar huertos sanos y productivos a pH 5.5-6.0, por lo que este rango de pH puede ser deseable en el manejo de estos suelos (Barber 1995).

A pesar de lo anterior, nótese que una buena proporción de los suelos muestreados aún presentan valores de pH muy bajos y que se clasifican en la categoría de extremadamente y fuertemente ácidos (34.3%). Estos valores sugieren un uso insuficiente de cal y una condición marginal para el cultivo. A tales valores se pueden encontrar Al intercambiable y en la solución del suelo que pueden afectar a la planta y los microorganismos asociados a ella (Zapata 1998). En contraste, hay un 35.7% de suelos que están en un rango más adecuado (5.5-6.3), mientras que 30% de los suelos tienen pH >6.3. Se ha encontrado en suelos del oriente Antioqueño, comparables a los usados en este estudio, que cuando el pH del suelo está por encima de 6.2 la disponibilidad de algunos elementos menores (Fe, Mn, Cu y Zn) disminuye notoriamente (Barber 1995, Osorio 1997). Este problema es más grave cuando el suelo alcanza la neutralidad (pH ~7). Esto puede explicar la cada vez más frecuente presencia de síntomas visuales de deficiencia de elementos menores en huertos comerciales de aguacate.

P soluble

La concentración de P soluble en la rizosfera estuvo entre 0.01-1.78 y 0.02-1.13 mg L^{-1}, respectivamente (Figura 2). Estas concentraciones son muy variables, y en el caso de los valores altos sugiere una excesiva fertilización fosfórica. Para muchas especies se recomienda que una adecuada concentración de P en la solución del suelo está alrededor de 0.2 mg L^{-1} (Hue y Fox 2010). Este valor puede permitir interpretar que una buena parte de los suelos muestreados (51%) tiene concentraciones dentro de un rango bajo a adecuado (0.1-0.25 mg L^{-1}), o al menos manejable con adición de fertilizantes. Sin embargo, una proporción alta (47.2%) exhibe una concentración de P soluble en el suelo excesivamente alta (0.25-1.69 mg L^{-1}). Esto pone en evidencia la falta de control de la fertilización fosfórica de muchos de los agricultores y representa un sobrecosto innecesario para la producción.

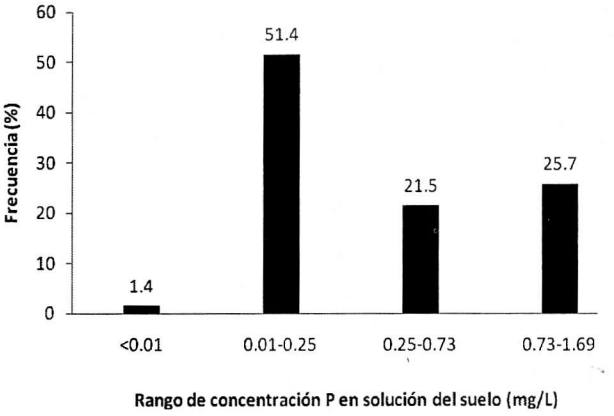


Figura 2. Histograma de frecuencia de la concentración de P soluble en la rizosfera de huertos de aguacate del Norte y Oriente de Antioquia.

Estos niveles tan altos de P son riesgosos porque pueden reducir la disponibilidad de algunos elementos para las plantas (Fe, Mn, Cu, Zn) y, adicionalmente, se aumentan los riesgos de generar contaminación de aguas (Barber 1995, Havlin *et al.* 1999).

Adicionalmente, esta condición excesiva de P disponible puede crear condiciones desfavorables para la planta si la asociación micorrizal se ha formado en la raíz, tal como se ha observado en estos huertos (datos no mostrados). Varios autores han reportado que la inoculación micorrizal en aguacate y en otras plantas produce beneficios en el crecimiento de las plantas cuando hay baja concentración de P soluble (Habte y Manjunath 1987. Bolan 1992. Allen 1996, Brudett *et al.* 1996, Smith y Read 1997, Miyasaka y Habte 2001, Habte y Osorio 2001,

Silvieira *et al.* 2003). Sin embargo, cuando el suelo presenta una alta concentración de P soluble ($\geq$ 0.2 mg L^{-1}) la inoculación micorrizal genera un efecto negativo (Montoya y Osorio 2009). Estos efectos favorables de la asociación micorrizal a bajas concentraciones de P y desfavorables a altas concentraciones se han reportado para otras especies tales como café, tomate de árbol, uchuva, granadilla, entre otras (González y Osorio 2008, Jaramillo y Osorio 2009).

El manejo integral de la fertilidad del suelo y la nutrición vegetal de cultivos intensivos debe ir acompañado de un monitoreo en la calidad del suelo. Esto puede permitir moderar la cantidad de cales y fertilizantes que se aplican, con la concomitante disminución de costos y el mantenimiento de los balances nutricionales de la planta. Adicionalmente a un esperado mejor desempeño nutricional vegetal se puede esperar el desarrollo de interacciones favorables con microorganismos rizosfericos benéficos tales como hongos micorrizales, microorganismos solubilizadores de fosfato, bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPR) y presumiblemente reducir el impacto negativo de fitopatogenos (Sreenivasa y Krishnaraj 1992, Omar 1998, Bashan y Holguín 1998, Barea *et al.* 2005a, b; Osorio y Habte 2009, Osorio 2011).

CONCLUSIONES

Se han detectado en la rizosfera de huertos de aguacate niveles de pH y P soluble muy variables, lo cual refleja que en muchos casos hay aplicaciones de cales y fertilizantes fosfóricos inadecuadas, tanto por defecto o por exceso. Con frecuencia los niveles de pH y P soluble (30 y 47%, respectivamente) son muy altos. Esto podría generar desbalances nutricionales y/o biológicos que desfavorecerían el desempeño de las plantas cultivadas de aguacate.

Agradecimientos. Este trabajo se realizó con el apoyo financiero de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia en el marco de las actividades del Grupo de Investigación en Microbiología del Suelo. Proyecto: "Desarrollo de estrategias biotecnológicas para incrementar el crecimiento, productividad y calidad del cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill) en Antioquia".

REFERENCIAS

ALLEN M (1996) The ecology of arbuscular mycorrhizas: a look back into the 20 th century and a peek into the 21th. Mycol Res 100: 769-782.

ASOHOFRUCOL-FNFH (2005) Convocatoria para el proyecto "Programa de desarrollo de proveedores: Implementación y certificación de buenas prácticas agrícolas en fincas productoras de frutales de clima frío exportables en el Departamento de Cundinamarca". Bogota.

BARBER S (1995) Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. Willey Interscience, New York, 398 p.

BAREA JM, AZCÓN R, AZCÓN-AGUILAR C (2005a) Interaction between mycorrhizal fungi and bacteria to improve plant nutrient cycling and soil structure, pp. 195-212. *In*: BUSTOT F, VARMA S (eds) Microorganisms in soil: roles in genesis and function). Springer-Verlag, Heidelberg.

BAREA JM, WERNER D, AZCÓN-AGUILAR C, AZCÓN R (2005b) Interaction of arbuscular mycorrhiza and nitrogen fixing simbiosis in sustainable agriculture. *In*: WERNER D, NEWTON WE (eds) Agriculture forestry, ecology and the environment. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

BASHAN Y, HOLGUIN G (1998) Proposal for the division of plant growth promoting rhizobacteria into two classifications: biocontrol – PGPB (plant growth promoting bacteria) and PGPB. Soil Biol Biochem 30: 1225-1228.

BERNAL J, DÍAZ C (2006) Tecnología para el cultivo del aguacate (Manual Técnico 5). CORPOICA. Rionegro, 241 p

BOLAN N (1991) A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. Plant Soil 134:189-293.

BRUNDETT M, BOUGHER N, DELL B, GROVE T, MALAJCZUK N (1996) Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture. Australian Centre for International Agricultural Research. Monograph 32, 374 p.

FAO (Organización de las Naciones Unidas por la Agricultura y la Alimentación). Departamento Económico y Social. Dirección Estadística. Documento en Línea, disponible en: http://www.fao.org/es/ess/topproduction.html?/ang=es consultado el 21 de febrero de 2007.

FONTAGRO (2006) Métodos no destructivos y marcadores moleculares para la determinación de fechas apropiadas de cosecha de cinco variedades de aguacate. Proyecto. FTG – 24/01.

FOX R, KAMPRATH E (1970) Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci Soc Am Proc 34:902-907.

GONZALEZ OA, OSORIO NW (2008) Determinación de la dependencia micorrizal del lulo. Acta Biol Colomb 13(2): 63-174.

HABTE M, MANJUNATH A (1987) Soil solution phosphorus status and mycorrhizal dependency in *Leucaena leucocephala*. Appl Environ Microbiol 53:797-801.

HABTE M, OSORIO NW (2001) Arbuscular Mycorrhizas: Producing and applying Arbuscular Mycorrhizal Inoculum. University of Hawaii, Honolulu, 47 p.

HAVLIN J, BEATON J, TISDALE SL, NELSON W (1999) Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

HUE NV, FOX R (2010) Predicting plant phosphorus requirements for Hawaii soils using a combination of phosphorus sorption isotherms and chemical extraction methods. Commun Soil Sci Plant Anal 41:133–143.

INFOAGRO (2006) El cultivo del aguacate. Documento en línea. disponible en http://www.infoagro.cons/frutas/frutas.tropicales/aguacate.htm . (Acceso: 26 de septiembre de 2007).

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (1988) Suelos y bosques de Colombia. IGAC. Subdirección Agrológica. Bogotá, 127 p.

JARAMILLO S, OSORIO NW (2009) Mycorrhizal dependency of coffee seedlings at three levels of soil solution phosphorus. Suelos Ecuat 39:143-147.

JUO ASR, FOX RL (1977) Phosphate sorption characteristics of some bench-mark soils of West Africa. Soil Sci 124:370-376.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR) (2007) Apuesta exportadora de gobierno. http://www.minagricultura.gov.co.

MIYASAKA S, HABTE M (2001) Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus uptake efficiency. Commun Soil Sci Plant Anal 32:1101-1147.

MONTOYA B, OSORIO NW (2009) Mycorrhizal dependency of avocado at different levels of soil solution phosphorus. Suelos Ecuat 39(1):100-106.

MURPHY J, RILEY JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta 27:31-36.

OMAR SA (1998) The role of rock-phosphate-solubilizing fungi and vesicular-arbuscular-mycorrhiza (VAM) in growth of wheat plants fertilized with rock phosphate. World J Microbiol Biotechnol 14:211-218.

OSORIO NW (1997) Evolución en el tiempo de características químicas de Andisoles cultivados con crisantemo (*Dedranthema grandiflora*) en el oriente antioqueño. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

OSORIO NW, HABTE M (2009) Strategies for utilizing arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing microorganisms for enhanced phosphate uptake and growth of plants in the soils of the tropics, pp 325-351. *In*: Khan MS (ed) Microbial strategies for crop improvement, Springer-Verlag, Berlin.

OSORIO NW (2011) Effectiveness of phosphate solubilizing microorganism in increasing plant phosphate uptake and growth in tropical soils, pp. 65-80. *In*: MAHESHWARI DK (ed) Bacteria in Agrobiology: Plant Nutrient management. Springer-Verlag, Berlin.

OSORIO NW (2012) Manejo de Nutrientes en Suelos del Trópico. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

SILVIEIRA SV, SOUSA PVD, KOLLER OC, SCHWARZ SF (2003) Elementos minerales y carbohidratos en plantones de aguacate "Carmen" inoculados con micorrizas arbusculares. Proc V World Avocado Congress, 415- 420 p.

SMITH S, READ D (1997) Mycorrhizal Symbiosis, 2ª Ed. Academic Press, London, 605 p.

SREENIVASA M, KRISHNARAJ M (1992) Synergistic interaction between VA mycorrhizal fungi and a phosphate solubilizing bacterium in chili. Zentralbl Mikrobiol 147:126-130.

ZAPATA R (1998) La acidez del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.