



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Parámetros productivos del caucho (*Hevea brasiliensis*) y su relación espacial con las propiedades físicas y químicas del suelo

I.A. Juan Pablo Fernández Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.
Bogotá, Colombia
2014

Parámetros productivos del caucho (*Hevea brasiliensis*) y su relación espacial con las propiedades físicas y químicas del suelo

I.A. Juan Pablo Fernández Rodríguez

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias Agrarias con Énfasis en Suelos y Aguas

Director:

Ph.D. M.Sc., In. Agr. Jesús Hernán Camacho Tamayo

Codirector:

Ph.D. (c), M.S., I. A. Jaime Humberto Bernal Riobo

Línea de Investigación:

Énfasis en suelos y aguas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Agronomía, Escuela de Posgrados.

Bogotá, Colombia

2014

Este trabajo está dedicado a:

A DIOS Todopoderoso,

A la Virgencita del Carmen,

Al Señor de los Milagros,

A mis padres Carmen Rosa y Jairo,

A mis hermanos Carlos y Paola,

*A mis amigos, que siempre me brindaron su
amor, cariño, empuje, fuerza y ánimo para poder
escalar un peldaño más en mi vida.*

Agradecimientos

Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por la financiación de la tesis, incluida en el marco del proyecto “Manejo Integrado del Cultivo de Caucho en Colombia”, llevado a cabo en conjunto por Corpoica y Mavalle S.A.

A los científicos, personal técnico y de campo del centro de investigación **CORPOICA – C.I. La Libertad** por su incondicional apoyo, colaboración y gentileza.

A las personas que se nombran a continuación que participaron y colaboraron directa e indirectamente con el desarrollo de la presente investigación:

Ing. Jesús Hernán Camacho Tamayo,

Ing. Jaime Humberto Berna Riobo,

Dr. José Orlando Arguello.

Resumen

La región de la Altillanura Colombiana, pese a presentar limitadas condiciones químicas del suelo, se ha convertido en una región con gran potencial agrícola, propicia para el establecimiento del cultivo del caucho. Los suelos de éste territorio, y en forma global, se caracterizan por presentar variabilidad espacial en sus diferentes atributos, concebidos gracias a la combinación de diferentes factores, procesos y propiedades que actúan a diferentes escalas e intensidades. El análisis de dicha variabilidad tuvo sus inicios en la aplicación de técnicas paramétricas y univariadas, teniendo como base un número reducido de muestras. La interpretación de resultados se limitaba por no explorar la dependencia conjunta entre las variables analizadas, subsanándose ello con el empleo de técnicas geoestadísticas y multivariadas. El uso de estas herramientas permite identificar zonas de manejo, logrando la toma de decisiones útiles para un desempeño por sitio específico, en éste caso, para el cultivo de caucho. El objetivo del estudio fue determinar la relación entre parámetros productivos del caucho (*Hevea brasiliensis*) con las propiedades físicas y químicas de un Oxisol (Inceptic Hapludox) de la Altillanura Colombiana, mediante análisis descriptivo, geoestadístico y multivariado, en el municipio de Puerto López (Meta), en los clones FX 3864 y RRIM 600. La mayoría de las variables analizadas presentaron tendencia a la distribución normal. El perímetro presentó baja variabilidad. La producción de látex en la época de mayor precipitación presentó una distribución aleatoria para los dos lotes. Los mapas de contorno presentaron disimilitud entre los lotes. El análisis de componentes principales (CP) permitió observar los distintos grupos formados por los parámetros productivos del caucho y las propiedades químicas y físicas del suelo. Las variables analizadas presentaron estructura de dependencia espacial.

Palabras clave: relación suelo-planta; variables regionalizadas; semivariograma; correlación espacial; datos composicionales; análisis multivariado; análisis clúster.

Abstract

The Colombian Altillanura region, while showing some soil chemical conditions limited, has become a region with high agricultural potential, suitable to the establishment of rubber cultivation. The soils of this territory, and as a whole, are characterized by spatial variability in their different attributes, designed by the combination of different factors, processes and properties that act at different scales and intensities. The analysis of such variability had its beginnings in the application of parametric and single variety of techniques based a small number of samples. The interpretation of results was limited by not exploring the joint dependence between the variables analyzed; supplement this with the use of geostatistical and multivariate techniques. The use of these tools enables the identification management areas and accomplish of taking useful decisions for site-specific performance, in this case, for rubber cultivation. The aim of the study is to determinate relationship between production parameters of rubber (*Hevea brasiliensis*) with physical and chemical properties of an Oxisol (Inceptic Hapludox) of Colombian Altillanura through descriptive analysis and multivariate geo-statistics, in the town of Puerto Lopez (Meta) in clones FX 3864 and RRIM600. Most of the analyzed variables showed normal distribution trend. The perimeter showed low variability. The production Latex in the period of greatest precipitation showed a random distribution for the two lots. The contour maps presented dissimilarity between batches. The principal component (PC) analysis allowed the observation of the different groups formed by the rubber production parameter and physical and chemical properties of the soil. The variables analyzed showed spatial dependence.

Keywords: soil-plant; regionalized variables; semi-variogram, spatial correlation, compositional data, multivariate analysis; cluster analysis.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Resumen | IX |
| Resumen | IX |
| Lista de figuras | XIII |
| Lista de tablas | XVV |
| Introducción | 1 |
| 1. Marco teórico | 3 |
| 1.1 Generalidades del cultivo de Caucho | 3 |
| 1.1.1 Origen..... | 3 |
| 1.1.2 Clasificación botánica y usos | 3 |
| 1.1.3 Clones | 4 |
| 1.1.4 Ecología del cultivo..... | 4 |
| 1.1.5 Fertilización y nutrientes | 5 |
| 1.1.6 Participación mundial en áreas sembradas en caucho | 5 |
| 1.1.7 Rendimiento en el mundo | 7 |
| 1.1.8 Producción mundial | 7 |
| 1.1.9 El caucho en Colombia..... | 9 |
| 1.2 Variabilidad espacial | 11 |
| 1.3 Análisis geoestadístico..... | 12 |
| 1.3.1 Semivariograma y Kriging..... | 13 |
| 1.4 Análisis de datos composicionales | 16 |
| 1.5 Análisis multivariado..... | 18 |
| 2. Objetivos | 21 |
| 2.1 Objetivo general | 21 |
| 2.2 Objetivos específicos | 21 |
| 3. Generalidades del área de estudio | 23 |
| 3.1 Geología y localización geográfica | 23 |
| 3.2 Zona de estudio y fisiografía | 23 |
| 3.3 Clima..... | 24 |
| 3.4 Vegetación | 25 |
| 3.5 Suelos | 25 |
| 3.6 Clasificación y descripción del perfil | 25 |
| 3.7 Etapas fenológicas, manejo integrado del cultivo y sistema de sangría..... | 28 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.7.1 | Etapa de vivero | 28 |
| 3.7.2 | Establecimiento y mantenimiento | 29 |
| 3.7.3 | Poda de formación | 29 |
| 3.7.4 | Control de malezas | 30 |
| 3.7.5 | Manejo integrado de enfermedades y plagas | 30 |
| 3.7.6 | Parámetros y sistema de sangría | 31 |
| 4. | Metodología..... | 33 |
| 4.1 | Muestreo..... | 33 |
| 4.2 | Análisis de laboratorio..... | 33 |
| 4.3 | Estadística descriptiva, geoestadística y análisis multivariado | 34 |
| 5. | Resultados y discusión | 35 |
| 5.1 | Estadística descriptiva | 35 |
| 5.2 | Análisis geoestadístico | 41 |
| 5.3 | Análisis de datos composicionales..... | 45 |
| 5.4 | Correlaciones..... | 48 |
| 5.5 | Mapas de contorno | 54 |
| | Figura 5-3: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y físicas del suelo analizadas para el lote 1 (Clon RRIM 600). | 56 |
| | Figura 5-4: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y propiedades físicas del suelo analizadas para el lote 2 (Clon FX 3864)..... | 63 |
| 5.6 | Análisis Multivariado | 70 |
| 5.6.1 | Análisis de componentes principales..... | 70 |
| 5.6.2 | Análisis de conglomerados ó clúster | 75 |
| 5.6.3 | Análisis de factores de componentes principales | 79 |
| 6. | Conclusiones | 89 |
| 6.1 | Conclusiones | 89 |
| 6.2 | Recomendaciones | 90 |
| | Anexos..... | 91 |
| | Bibliografía | 103 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 1-1: Localización de los núcleos caucheros en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). | 11 |
| Figura 3-1: Localización geográfica del área de estudio (coordenadas geográficas: WGS84). (Tomado de: Google Earth, 2012)..... | 24 |
| Figura 5-1. Distribución y ubicación de los datos de las propiedades físicas del suelo obtenidos en diagramas AFM para el lote 1 y para el lote 2. (A, B): clon RRIM 600, (C, D): clon FX 3864..... | 46 |
| Figura 5.2. Gráficos de dos dimensiones (<i>biplot</i>) de las propiedades físicas del suelo <i>clr</i> -transformados para el lote 1 y para el lote 2. (A, B): clon RRIM 600, (C, D): clon FX 3864..... | 47 |
| Figura 5-3: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y físicas del suelo analizadas para el lote 1 (Clon RRIM 600)..... | 56 |
| Figura 5-4: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y propiedades físicas del suelo analizadas para el lote 2 (Clon FX 3864)..... | 63 |
| Figura 5-5: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades químicas del suelo. | 76 |
| Figura 5-6: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades físicas del suelo..... | 77 |
| Figura 5-7: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades químicas del suelo..... | 78 |
| Figura 5-8: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades físicas del suelo..... | 79 |
| Figura 5-9: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades químicas del suelo, mediante rotación de Varimax. | 80 |
| Figura 5-10: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades físicas del suelo, mediante rotación de Varimax..... | 82 |
| Figura 5-11: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades químicas del suelo, mediante rotación de Varimax..... | 84 |

Figura 5-12: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades físicas del suelo, mediante rotación de Varimax.....86

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla 1-1: Área (hectáreas) cosechada de caucho natural en el mundo. FAO (2013). | 5 |
| Tabla 1-2: Principales países productores de caucho natural (kg·ha ⁻¹). FAO (2013). | 7 |
| Tabla 1-3: Producción mundial de caucho en ton (años 2005 a 2011). FAO (2013). | 8 |
| Tabla 1-4: Área (ha) de caucho sembrada a nivel departamental entre el año 2002 hasta 2008 (MADR, 2008). | 9 |
| Tabla 3-1: Descripción del perfil de suelo Inceptic Hapludox, calicata empresa Mavalle S.A., Puerto López (Meta). | 27 |
| Tabla 5-1: ANOVA no paramétrica resultante del análisis de los parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y de las propiedades químicas y físicas del suelo analizado. | 36 |
| Tabla 5-2: Estadística descriptiva para parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y para las propiedades químicas y físicas del suelo analizadas. | 37 |
| Tabla 5-3. Modelos ajustados de semivariogramas para los parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y para las propiedades químicas y físicas del suelo analizadas. | 42 |
| Tabla 5-4. Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon RRIM 600 y para las propiedades químicas del suelo analizadas. | 49 |
| Tabla 5-5. Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon FX 3864 y para las propiedades químicas del suelo analizadas. | 50 |
| Tabla 5-6: Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon RRIM 600 y para las propiedades físicas del suelo analizadas. | 51 |
| Tabla 5-7: Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon FX 3864 y para las propiedades físicas del suelo analizadas. | 52 |
| Tabla 5-8: Coeficientes de los seis primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 1 (clon RRIM 600) y propiedades químicas del suelo. | 71 |
| Tabla 5-9: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 1 (clon RRIM 600) y propiedades físicas del suelo. | 72 |
| Tabla 5-10: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 2 (clon FX 3864) y propiedades químicas del suelo. | 74 |
| Tabla 5-11: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 2 (clon FX 3864) y propiedades físicas del suelo. | 75 |

Introducción

La situación geográfica, la variedad de climas y relieves y otras condiciones naturales, hacen de Colombia un país con grandes oportunidades para el establecimiento y producción de diversos cultivos que como el caucho, a través del látex para la elaboración de subproductos industriales, ha tenido gran relevancia a nivel mundial. Sin embargo, actualmente la producción nacional sólo procede del caucho silvestre establecido en la Amazonía y de algunas plantaciones impulsadas en departamentos como Caquetá, Meta, Tolima, Caldas, Cundinamarca, Guaviare, Putumayo y Cauca (SENA, 2006).

Por tal motivo, entidades como CORPOICA, Mavalle, el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional (IBUN), el Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (Sinchi), Asoheca, SENA y asociaciones regionales de productores de caucho, han decidido, a través de programas de investigación, generar un “paquete tecnológico” que involucre desde los aspectos relacionados con la agronomía y tecnología del caucho hasta la obtención del producto final para su comercialización (SENA, 2006). Uno de los puntos relevantes en estos estudios ha de estar encaminada en la relación planta – suelo entendiéndose este último como un cuerpo natural, con su consabida variabilidad.

Considerada como un área con gran potencial agrícola pese a las conocidas limitaciones químicas del suelo, como la alta saturación de aluminio intercambiable (Al^{+3}) de hasta el 80%, baja saturación de bases, acidez extrema (pH entre 3.8 y 5.0) y contenido de materia orgánica bajo (Camacho-Tamayo *et al.* 2008), la Altillanura Colombiana, desde el municipio de Puerto López en el Meta hasta la desembocadura del río Orinoco, es una región propicia para la producción de caucho.

Los limitantes químicos del suelo pueden ser remediados mediante programas de enmienda y fertilización de los cultivos. Sin embargo, para ser eficientes en el manejo de insumos y minimizar los efectos sobre el ambiente, deben ser desarrollados bajo el concepto de agricultura de precisión. Ésta consiste en el manejo diferencial del suelo con conocimiento de la variabilidad espacial respecto a sus propiedades químicas y físicas (Mzuku *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2008; Moral *et al.*, 2011; Salamanca *et al.*, 2007; Luengas *et al.*, 2007; Özgöz, 2009; Sánchez *et al.*, 2011).

La variabilidad espacial de los suelos es la resultante de la combinación de diversos procesos (físicos, químicos, biológicos) que actúan a diferentes escalas e intensidades (Goovaerts, 2010; Millán *et al.*, 2012; Jaramillo, 2003) y, por supuesto, a la influencia de los factores formadores del suelo (Jenny, 1941; Iqbal *et al.*, 2005; Veronese Júnior *et al.*, 2006; Montezano *et al.*, 2006; Santra *et al.*, 2008; Cambardella *et al.*, 1994; Sağlam *et al.*, 2011). Para conocer adecuadamente la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, es necesaria la toma de gran cantidad de datos (Santi *et al.*, 2012). La identificación de las diferentes formas y segmentos del terreno ha demostrado ser una

herramienta eficaz para la comprensión de la variabilidad espacial (Urricariet *et al.*, 2011) siendo las propiedades químicas las de mayor fluctuación (Peña *et al.*, 2009).

La heterogeneidad en el suelo, en mayor o menor magnitud, afecta el manejo y las predicciones que se hagan sobre el comportamiento del mismo (Jaramillo, 2002; Sağlam *et al.*, 2011). Puesto que la similitud entre muestras cercanas es mayor que las tomadas a mayor distancia, la estadística paramétrica es una herramienta inadecuada para analizar las variables espacialmente dependientes debido a que asume que las observaciones medidas son independientes a pesar de la distribución en el espacio. Así, las técnicas como la Geoestadística y el Análisis Multivariado proporcionan una serie de herramientas útiles para la incorporación espacial y temporal de observaciones a través de la descripción y modelado de patrones para predecir el comportamiento del suelo o parámetros productivos de los cultivos en sitios no muestreados y evaluar la incertidumbre de dichas predicciones (Cambardella *et al.*, 1994; Camacho-Tamayo *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2008; Garzón *et al.*, 2010; Worsham *et al.*, 2010; Abu y Walgwi, 2011; Ramos *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2008; Peña *et al.*, 2009; Aishah *et al.*, 2010; Moral *et al.*, 2011; Motomiya *et al.*, 2011).

El objetivo general de este trabajo fue determinar la relación entre parámetros productivos del caucho (*Hevea brasiliensis*) con las propiedades físicas y químicas de un Oxisol (Inceptic Hapludox) de la Altillanura Colombiana, mediante análisis descriptivo, geoestadístico y multivariado en el municipio de Puerto López, Colombia, estableciendo y determinando su dependencia espacial mediante el uso de técnicas geoestadísticas y la variabilidad en algunos parámetros productivos del caucho, además de identificar sus posibles correlaciones.

1. Marco teórico

1.1 Generalidades del cultivo de Caucho

1.1.1 Origen

El caucho (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.), también llamado en otros países como hule, siringa o seringueira, es una planta originaria de la región amazónica (América Tropical) perteneciente a la familia *Euphorbiaceae* y productora de caucho natural por excelencia (IRSG, 1999). Esta planta nativa de la cuenca amazónica fue llevada al Lejano Oriente a mitad del siglo XIX donde se desarrolló y cultivó industrialmente con excelentes rendimientos. Aunque se puede encontrar de manera silvestre en países de Suramérica como Colombia, Perú, Bolivia, Brasil, Venezuela y Guyana (Torres, 1994) continúan siendo dependientes de las importaciones de esta importante materia prima industrial (Martínez y García, 2006a).

1.1.2 Clasificación botánica y usos

Las características botánicas del caucho fueron descritas por Fusee Hublet en 1775 (citado por EMBRAPA, 1998) con material colectado en la Guyana Francesa. Las descripciones se enfatizaron en clasificar género, especie y eventualmente variedades genéticas estables (Escobar, 2004).

Clase: Dicotiledónea

Orden: Euforbiales

Familia: Euforbiáceas

Género: *Hevea*

Especie: *brasiliensis*

El látex del caucho se sintetiza en los vasos del floema, sirviendo como materia prima básica para la elaboración de llantas radiales y de avión, calzado de goma, adhesivos y productos de la línea médica (preservativos, catéteres, guantes de goma, mamilas), entre otros productos (AGROCADENAS, 2005).

1.1.3 Clones

En Colombia, los clones introducidos se cultivan a pequeña y mediana escala. Gracias a su diversidad clonal, el caucho presenta gran adaptabilidad a diferentes ambientes, relativa tolerancia a plagas y enfermedades, resistencia a períodos de máximas lluvias y producción aceptable del rendimiento del látex en suelos con bajo contenido de nutrientes como los de la Orinoquía y Amazonía.

Los diferentes clones utilizados como materiales para el establecimiento de plantaciones comerciales, presentan diversas ventajas, de las cuales la principal es la uniformidad evidenciada por los individuos, puesto que todos los árboles proceden de clon análogo e idénticas condiciones ambientales; sin embargo, la gran desventaja radica en el empleo único de la injertación, que excluye la reproducción del sistema radicular y propone el problema de la compatibilidad entre el injerto y el portainjerto (Escobar, 2004; Gonçalves y Marques, 2008). La difusión del material clonal en el país se ha realizado mediante técnicas de injertación de yemas en clones como: IAN 170, IAN 873, FX 3864, RRIM 600, materiales poliploides inducidos artificialmente como IAN 6158-P4, FX 3864 P2, FX 3899-P1, que poseen corteza más gruesa, tamaño y número de los vasos laticíferos mayor (Escobar, 2004) y otros materiales vegetales que se encuentran depositados en colecciones clonales del Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), en el Centro de Investigaciones de Café (Cenicafé) y en empresas privadas como Mavalle S.A., entre otras (Quesada-Méndez *et al.*, 2011).

1.1.4 Ecología del cultivo

El cultivo requiere, para su normal desarrollo, una profundidad efectiva mínima de 1.5 m en el suelo para el anclaje de sus raíces, precipitación mayor a 2.000 mm al año con una época seca bien definida de mínimo tres meses en la cual los árboles se defolian y refolian; humedad relativa menor a 65% que permite ser “zona de escape al mal suramericano de las hojas” donde se lograría sembrar clones asiáticos de alta producción; temperatura media anual entre 20 a 30°C (óptima 25°C); presencia de vientos no fuertes (menores a 50 km h⁻¹). Dichas características se presentan en la región de la Orinoquia, siendo ésta apta y óptima para el establecimiento del caucho.

El cultivo del caucho puede alcanzar alta producción de látex con una adecuada selección de clones y un manejo integrado del cultivo ajustado a sus necesidades. CORPOICA ha generado modelos de sistemas agroforestales y de cultivo para la Orinoquia Colombiana, evaluando gran variedad de material genético para estas condiciones agroecológicas con el fin de implementar un sistema que vaya acorde a las necesidades propias de cada productor. La mayor parte de los cultivos de caucho en el país se encuentran cultivados en ésta región, la cual presentan suelos Oxisoles con texturas desde franco-arcillosas a franco-arenosas y arenosas, pH ácido, baja concentración de bases, materia orgánica y fósforo (Martínez y García, 2006b; SENA, 2006); se menciona además suelos Ultisoles e Inceptisoles, en los cuales pueden establecerse dicho cultivo.

1.1.5 Fertilización y nutrientes

De acuerdo al análisis de suelos se debe delinear un plan de fertilización que permita brindar los nutrientes indispensables para el crecimiento y desarrollo óptimo del cultivo. En la etapa no productiva (5 a 6 años) el caucho como muchas especies forestales, de gran cantidad de elementos como N, P, K, Ca y Mg que nuevamente, parte de ellos, se reciclan a través de la descomposición de las hojas defoliadas. La nutrición mineral se suministra al suelo en dos etapas: crecimiento y producción (Da Gama Bastos, 1994; Escobar, 2004; SENA, 2006; Martínez, 2007). En la fase de crecimiento el caucho requiere de estos elementos minerales de forma balanceada.

El fósforo (P), debido a su baja movilidad en el suelo, es suministrado al momento de la siembra, mientras los demás nutrientes son suministrados de la siguiente forma: la primera fertilización a los seis meses y así sucesivamente, en el mismo lapso de tiempo, hasta el quinto año. En la etapa de explotación, que inicia entre el 5 y 7 año de vida del cultivo, debido a que la velocidad de crecimiento disminuye, por ende las necesidades nutricionales se reducen (SENA, 2006).

Para corregir deficiencias de nutrientes como N, P y K, recomiendan fertilizar con fuentes simples como urea, superfosfato triple (SFT) y cloruro de potasio (KCl) en dosis calculadas a partir de los análisis químicos del suelo, tipo de clon, densidad de siembra y grado de tecnificación del cultivo (SENA, 2006; Martínez, 2007).

1.1.6 Participación mundial en áreas sembradas en caucho

En el año 2006, el continente asiático reportaba la mayor área plantada en caucho con 9.380.000 hectáreas correspondiente al 93% del cultivo a nivel global. El primer lugar lo ocupaba Indonesia con el 33% y Tailandia y Malasia que sumaban el 36,7% (MADR, 2008). En América Latina (Tabla 1-1), el primer lugar lo ocupa Brasil con 124.933 hectáreas sembradas en el año 2008, seguido de México con 13.977 hectáreas (FAO, 2013).

Tabla 1-1: Área (hectáreas) cosechada de caucho natural en el mundo. FAO (2013).

| PAÍS | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Bangladesh | 52.000 | 53.000 | 54.000 | 55.000 | 57.000 | 58.000 | 59.054 |
| Brasil | 112.396 | 106.897 | 114.842 | 124.933 | 128.900 | 124.946 | 134.947 |
| Brunei Darussalam | 4.000 | 3.600 | 3.666 | 3.792 | 4.043 | 4.135 | 4.270 |
| Camboya | 22.085 | 20.583 | 17.997 | 33.670 | 34.135 | 34.908 | 36.051 |
| Camerún | 55.000 | 58.000 | 45.000 | 53.000 | 52.000 | 53.000 | 54.000 |

Tabla 1-1. (Continuación...)

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| China | 464.800 | 477.000 | 476.000 | 517.150 | 536.500 | 576.960 | 597.770 |
| China, Continental | 464.800 | 477.000 | 476.000 | 517.150 | 536.500 | 576.960 | 597.770 |
| Côte d'Ivoire | 100.097 | 104.607 | 109.529 | 120.000 | 143.000 | 135.000 | 135.000 |
| Ecuador | 9.153 | 9.200 | 10.000 | 10.500 | 11.000 | 10.758 | 11.633 |
| Filipinas | 81.925 | 94.347 | 110.972 | 123.260 | 128.337 | 138.710 | 161.565 |
| Gabón | 14.785 | 15.451 | 12.000 | 12.000 | 12.000 | 12.000 | 12.000 |
| Ghana | 23.895 | 24.972 | 17.000 | 25.175 | 25.475 | 25.500 | 25.800 |
| Guatemala | 50.400 | 48.000 | 62.000 | 64.600 | 71.700 | 70.123 | 75.825 |
| Guinea | 7.500 | 8.000 | 10.000 | 10.500 | 10.625 | 10.500 | 10.500 |
| India | 447.000 | 454.000 | 459.000 | 463.000 | 468.000 | 477.000 | 485.665 |
| Indonesia | 3.279.391 | 2.725.858 | 2.775.546 | 3.424.217 | 3.435.270 | 3.445.121 | 3.456.100 |
| Liberia | 143.392 | 115.500 | 149.000 | 105.000 | 74.500 | 74.500 | 76.000 |
| Malasia | 1.237.000 | 1.251.000 | 1.248.000 | 1.247.000 | 1.058.000 | 1.081.953 | 1.117.392 |
| México | 12.669 | 12.039 | 13.977 | 14.221 | 15.078 | 15.866 | 17.315 |
| Myanmar | 91.100 | 108.100 | 123.000 | 138.400 | 144.252 | 166.705 | 198.364 |
| Nigeria | 339.500 | 354.797 | 340.000 | 340.000 | 345.000 | 345.000 | 345.000 |
| Papua Nueva Guinea | 10.800 | 11.000 | 14.400 | 15.800 | 15.000 | 15.000 | 15.000 |
| República Centroafricana | 2.467 | 2.578 | 2.699 | 1.200 | 1.214 | 1.214 | 1.214 |
| República Democrática del Congo | 44.017 | 27.108 | 53.207 | 50.700 | 51.304 | 52.400 | 52.400 |
| República Dominicana | 30 | 32 | 35 | 38 | 39 | 38 | 41 |
| Sri Lanka | 116.470 | 116.480 | 116.480 | 116.480 | 124.000 | 124.734 | 127.000 |

1.1.7 Rendimiento en el mundo

De acuerdo con la FAO (2013), el mayor rendimiento de látex en el mundo, en el año 2011, lo reportó México (2208,7 kg·ha⁻¹), seguido de India y Costa de Marfil. Se observa como los países Americanos presentan un rendimiento por encima de los países asiáticos con valores superiores a 1690,5 kg·ha⁻¹ (Tabla 1-2).

Tabla 1-2: Principales países productores de caucho natural (kg·ha⁻¹). FAO (2013).

| PAÍS | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Brasil | 922,7 | 986,3 | 970,1 | 967,8 | 985,1 | 1072,3 | 1219 |
| Camboya | 920,5 | 1039,2 | 995,9 | 940,8 | 1095,1 | 1123,3 | 1205,8 |
| Camerún | 1067,1 | 1064,4 | 1040,2 | 1009 | 1006,2 | 1035,2 | 1027,8 |
| China | 1105 | 1127,8 | 1236,1 | 1059,4 | 1153,5 | 1197,3 | 1256,1 |
| China, Continental | 1105 | 1127,8 | 1236,1 | 1059,4 | 1153,5 | 1197,3 | 1256,1 |
| Congo | 801,7 | 806,9 | 815,6 | 1088,2 | 1104,7 | 812,5 | 875 |
| Côte d'Ivoire | 1699,2 | 1704,1 | 1721,3 | 1691,7 | 1465,2 | 1741,1 | 1768,3 |
| Ecuador | 1474,9 | 1478,3 | 1400 | 1428,6 | 1400 | 1497,4 | 1690,5 |
| Filipinas | 1271,4 | 1229,6 | 1201,6 | 1100,5 | 1005,3 | 940,3 | 869,6 |
| Gabón | 727,2 | 731,9 | 1000 | 1142,5 | 1086,3 | 1139,1 | 1139,1 |
| Guatemala | 1131 | 1145,8 | 1129 | 1130 | 1129,7 | 1208,3 | 1364,1 |
| Guinea | 1333,3 | 1312,5 | 1350 | 1323,8 | 1280 | 1333,3 | 1428,6 |
| India | 1795,6 | 1878,6 | 1798,1 | 1867,2 | 1776,5 | 1807,1 | 1835,3 |
| Indonesia | 692,5 | 967,5 | 992,7 | 803,5 | 710,4 | 793,8 | 893,6 |
| Liberia | 774,1 | 809,5 | 810,7 | 807,6 | 798,7 | 833,6 | 828,9 |
| Malasia | 910,3 | 1026,1 | 961,2 | 860 | 810 | 830,9 | 892 |
| México | 1954,1 | 2005,6 | 1982,5 | 2047,1 | 2108,6 | 2023 | 2208,7 |
| República Centroafricana | 546,8 | 550,4 | 398,7 | 1024,2 | 1103,8 | 1157,3 | 1157,3 |
| Sri Lanka | 895,9 | 937 | 1009,2 | 1109,5 | 1096,8 | 1226,5 | 1245,7 |
| Tailandia | 1762 | 1761,7 | 1711,6 | 1740,5 | 1665 | 1581,8 | 1639,6 |
| Vietnam | 1441,1 | 1558,4 | 1603,5 | 1653,7 | 1697,7 | 1714 | 1716,8 |

1.1.8 Producción mundial

El continente asiático produce los mayores volúmenes (cerca del 90%) del caucho natural en el mundo. El país de mayor producción es Tailandia quien alcanzó una cifra correspondiente a 3.051.780 ton, seguido de Indonesia con 2.734.900 ton en el año 2010 (FAO, 2013), cuyo destino principal es China, seguido por Estados Unidos, Japón y la India (Tabla 1-3).

Tabla 1-3: Producción mundial de caucho en ton (años 2005 a 2011). FAO (2013).

| PAÍS | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Bangladesh | 5.200 | 5.300 | 5.400 | 5.500 | 5.700 | 5.800 | 5.997 |
| Bolivia (Estado Plurinacional de) | 11.500 | 11.800 | 12.000 | 12.806 | 13.695 | 14.326 | 17.489 |
| Brasil | 103.708 | 105.434 | 111.407 | 120.905 | 126.973 | 133.981 | 164.498 |
| Brunei Darussalam | 257 | 220 | 222 | 229 | 209 | 219 | 243 |
| Camboya | 20.329 | 21.389 | 17.923 | 31.676 | 37.380 | 39.211 | 43.471 |
| Camerún | 58.689 | 61.736 | 46.807 | 53.477 | 52.321 | 54.864 | 55.500 |
| China | 513.618 | 537.982 | 588.380 | 547.861 | 618.866 | 690.812 | 750.852 |
| Côte d'Ivoire | 170.089 | 178.257 | 188.532 | 203.000 | 209.524 | 235.048 | 238.717 |
| Ecuador | 13.500 | 13.600 | 14.000 | 15.000 | 15.400 | 16.109 | 19.665 |
| Filipinas | 104.160 | 116.013 | 133.344 | 135.645 | 129.017 | 130.430 | 140.500 |
| Gabón | 10.751 | 11.309 | 12.000 | 13.710 | 13.035 | 13.669 | 13.669 |
| Ghana | 10.000 | 10.500 | 11.000 | 16.550 | 19.134 | 20.150 | 20.185 |
| Guatemala | 57.000 | 55.000 | 70.000 | 73.000 | 81.000 | 84.730 | 103.435 |
| Guinea | 10.000 | 10.500 | 13.500 | 13.900 | 13.600 | 14.000 | 15.000 |
| India | 802.625 | 852.895 | 825.345 | 864.500 | 831.400 | 862.000 | 891.344 |
| Indonesia | 2.270.891 | 2.637.231 | 2.755.172 | 2.751.286 | 2.440.347 | 2.734.900 | 3.088.400 |
| Liberia | 111.000 | 93.500 | 120.800 | 84.800 | 59.500 | 62.100 | 63.000 |
| Malasia | 1.126.000 | 1.283.600 | 1.199.600 | 1.072.400 | 857.019 | 899.001 | 996.673 |
| México | 24.756 | 24.145 | 27.709 | 29.112 | 31.794 | 32.097 | 38.243 |
| Myanmar | 51.500 | 63.200 | 72.000 | 87.200 | 93.290 | 112.079 | 149.627 |
| Nigeria | 158.600 | 142.500 | 143.000 | 110.424 | 145.000 | 143.500 | 143.500 |
| Papua Nueva Guinea | 5.400 | 5.500 | 7.200 | 7.900 | 7.500 | 7.500 | 7.500 |
| República Centroafri- ca na | 1.349 | 1.419 | 1.076 | 1.229 | 1.340 | 1.405 | 1.405 |
| República Democrática del Congo | 11.379 | 7.422 | 13.587 | 13.176 | 13.226 | 13.450 | 13.600 |
| República Dominicana | 12 | 13 | 14 | 15 | 221 | 231 | 282 |
| Sri Lanka | 104.350 | 109.140 | 117.550 | 129.240 | 136.000 | 152.990 | 158.198 |
| Tailandia | 2.979.722 | 3.070.520 | 3.024.207 | 3.166.910 | 3.090.280 | 3.051.781 | 3.348.897 |
| Vietnam | 481.600 | 555.400 | 605.800 | 660.000 | 711.300 | 751.700 | 789.635 |

1.1.9 El caucho en Colombia

En Colombia la producción de caucho se remonta a la explotación de los bosques naturales a mediados del siglo XIX. Hasta el año 2008, se contaba con algo más de 30.000 hectáreas sembradas y se estima que la producción anual es aproximadamente de 1.000 toneladas (MADR, 2008; AGROCADENAS, 2005), siendo aún insuficiente para suplir la demanda interna por lo que se ha recurrido a la importación de 22.000 ton·año⁻¹ en promedio. Se estima que el consumo total de caucho natural en Colombia fue cercano a 25.962 ton·año⁻¹ para el año 2006, de las cuales la producción nacional representó sólo el 7,5 % del consumo (FEDECAUCHO, 2006).

En la actualidad, este cultivo se distribuye principalmente en nueve núcleos regionales. El departamento del Caquetá presenta la mayor superficie sembrada con el 27% seguido por los departamentos de Santander (26%), Antioquia (11%) y Meta (8%). Asimismo, del total de área proyectada para sembrar en el año 2006, estos cuatro departamentos representaban el 61,3% (MADR, 2008) (Tabla 1-4).

A nivel mundial el rendimiento potencial del clon RRIM 703 es de 3,0 ton·ha⁻¹·año⁻¹ (Evans, 1993). En Colombia se registran rendimientos muy variables que van desde 0,4 hasta 1,17 ton·ha⁻¹·año⁻¹ para este mismo clon. En este sentido, la brecha tecnológica presenta también un amplio rango si se compara con el rendimiento reportado para Tailandia (0,273 a 1,04 ton·ha⁻¹·año⁻¹), y más amplio aún con respecto al rendimiento potencial de clones como el RRIM 703 (1,83 a 2,6 ton·ha⁻¹·año⁻¹), mostrándose grandes posibilidades de aumento en rendimiento para Colombia, siempre y cuando se cuente con materiales y esquemas de manejo adecuados a las condiciones locales de producción.

Adicionalmente, el cultivo del caucho mejoraría la oferta de empleo pues se calcula que si en el país se cultivaran 30.000 hectáreas de caucho para suplir las necesidades internas, se generarían alrededor de 7.500 empleos directos (AGROCADENAS, 2006).

Tabla 1-4: Área (ha) de caucho sembrada a nivel departamental entre el año 2002 hasta 2008 (MADR, 2008).

| Departamento | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Antioquia | 169 | 469 | 879 | 1.481 | 2.339 | 3.035 | 4.099 |
| Arauca | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 |
| Bolívar | 0 | 0 | 50 | 50 | 100 | 130 | 130 |
| Caldas | 408 | 508 | 578 | 678 | 773 | 773 | 968 |
| Caquetá | 3.588 | 3.738 | 4.670 | 4.678 | 5.664 | 6.864 | 7.150 |
| Casanare | 60 | 60 | 60 | 70 | 101 | 101 | 101 |
| Cauca | 0 | 0 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Córdoba | 0 | 0 | 30 | 386 | 919 | 1.061 | 1.840 |
| Cundinamarca | 236 | 236 | 281 | 311 | 567 | 682 | 721 |
| Guaviare | 494 | 584 | 652 | 772 | 1.100 | 1.100 | 1.486 |
| Huila | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

Tabla 1-4. Continuación ...

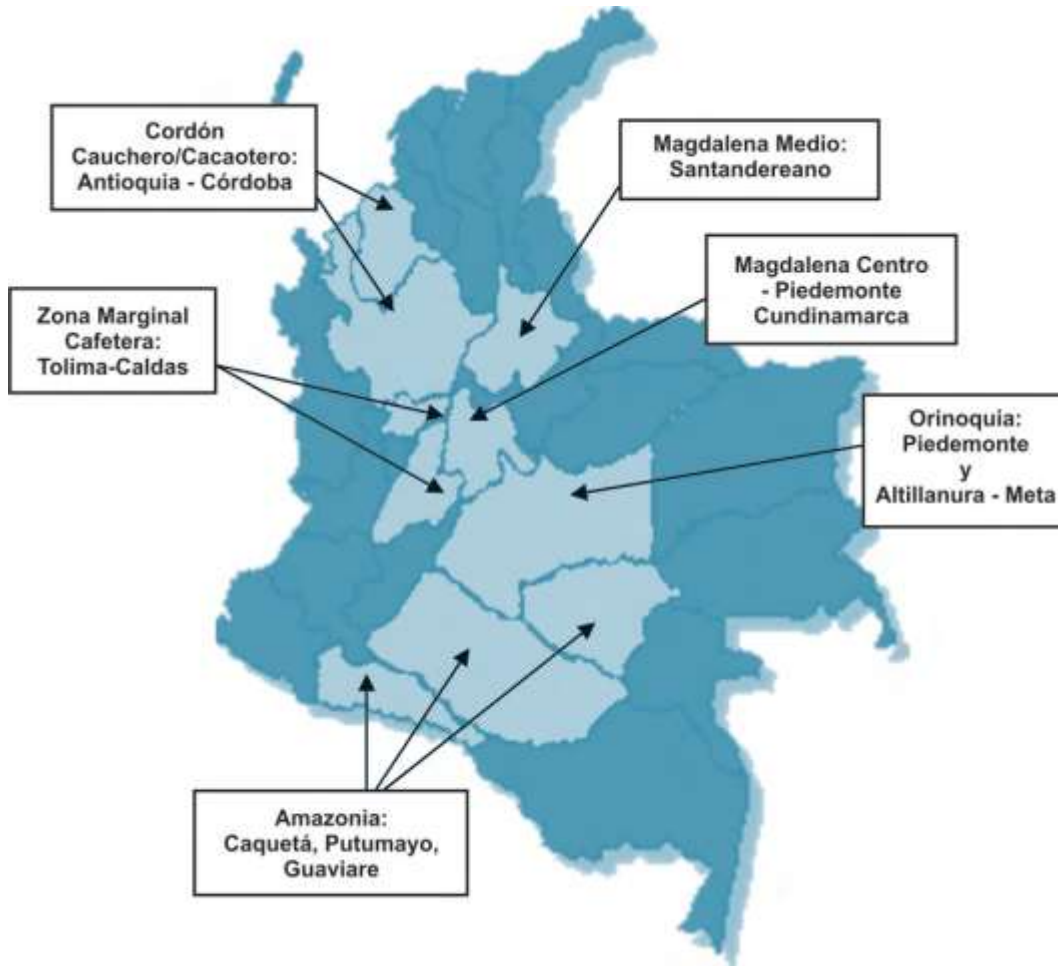
| | | | | | | | |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Meta | 638 | 1.397 | 1.438 | 1.528 | 1.744 | 2.794 | 4.058 |
| Nariño | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95 | 119 |
| N. Santander | 15 | 15 | 165 | 165 | 165 | 165 | 165 |
| Putumayo | 385 | 626 | 1.226 | 1.226 | 1.226 | 1.357 | 1.804 |
| Quindío | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Santander | 564 | 864 | 1.794 | 3.479 | 5.475 | 5.467 | 6.315 |
| Tolima | 140 | 140 | 160 | 210 | 300 | 330 | 379 |
| Valle del Cauca | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Vichada | 7 | 7 | 7 | 7 | 107 | 682 | 818 |
| TOTAL | 6.787 | 8.727 | 12.192 | 15.244 | 20.783 | 24.847 | 30.356 |

No todo el caucho natural que se produce en Colombia (Figura 1-1) cumple con los estándares internacionales de calidad requeridas por los industriales. Actualmente se comercializan diferentes calidades de caucho natural y en diversas presentaciones como:

- Lámina - (50%): producto obtenido del proceso de coagulación del látex, laminado de los coágulos y secado al aire.
- Caucho crepé - (25%): Producido en MAVALLE S.A. - Puerto López, Meta.
- Granulado - (25%): obtenido en la planta transformadora de cauchos técnicamente especificados (TSR - 20) en Florencia – Caquetá.

El precio del caucho oscilaba en el año 2008 entre \$5.500 por kg de lámina de primera calidad, \$1.300 por litro de látex preservado y el ripio a \$3.200 (por kg de lámina). Las industrias transformadoras de caucho en Colombia consumen caucho natural y caucho

Figura 1-1: Localización de los núcleos caucheros en Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010).



1.2 Variabilidad espacial

La creación y desarrollo de nuevos avances en la agricultura moderna para sistemas frágiles y pobres deben estar acompañados no sólo de la utilización de insumos ambientalmente amigables y económicos sino también del reconocimiento del suelo como un cuerpo natural cuyas propiedades varían en el tiempo y en el espacio (Santra *et al.*, 2008).

La variabilidad espacial del suelo es un concepto natural y regular. Ésta se expresa en características físicas como dureza, permeabilidad, porosidad, tamaño de partículas e infiltración; en químicas como composición, cristalización y niveles de intemperización; en diferencias climáticas debido a la altitud y relieve y en la actividad biológica (Souza *et al.*, 2010).

Para la caracterización de la variabilidad de suelos se ha recurrido a herramientas como la geoestadística y análisis multivariado, permitiendo la generación de predicciones sobre los datos tomados en campo y los resultados obtenidos de laboratorio, su distribución y relación entre ellos así como su correlación con estudios preliminares (Rodríguez *et al.*, 2008; Sağlam *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2010). A través de estas ayudas, varios estudios han dado cuenta de las correlaciones existentes entre la productividad de algunos cultivos y la variabilidad espacial de los suelos.

Souza *et al.* (2010), determinaron que la variabilidad de la producción de caña de azúcar se explica mejor cuando atributos del suelo como M.O, Ca, K, Mg, SB, CICE, pH, arcilla, limo, arena y densidad aparente se relacionan con la altitud de las formas del relieve. Millán *et al.* (2012) determinaron que el conocimiento de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas de suelos Vertisoles era importante para identificar zonas con características de degradación física del suelo. Mohamed y Abdo (2011) utilizaron las tecnologías de los SIG para determinar la variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos, con la finalidad de realizar un sistema de mapeo digital que les estipulara la medida de tasa variable de nutrientes para aumentar la eficiencia en las operaciones agrícolas. Garzón *et al.* (2010) evaluaron la variabilidad espacial y la relación de algunas propiedades químicas en un Entisol. Cucunubá *et al.* (2011) determinaron unidades de manejo agronómico en plantaciones de palma de aceite, mediante la identificación de relaciones de dependencia espacial entre propiedades físicas del suelo.

Cabe mencionar que el uso de transformaciones de los datos originales dentro de las metodologías de predicción espacial de las propiedades del suelo, pueden tornar esos datos como no correlacionados evitando el efecto de multicolinealidad; en dicho suceso, el análisis de componentes principales (ACP) es una alternativa para reducir el número de variables iniciales, haciendo más sencilla su manipulación y generando nuevas variables correlacionadas (Caten *et al.*, 2011).

1.3 Análisis geoestadístico

La Geoestadística es una rama de la estadística que se ha convertido en una herramienta adecuada para estudiar variables numéricas que se distribuyen espacial y temporalmente, las cuales pueden o presentan comportamientos aleatorios a nivel local, pero que a gran escala tienen un grado de ordenamiento mayor (Ulloa, *et al.* 2003; Montero y Larraz, 2008; Giacomino *et al.*, 2011). La variabilidad espacial de ellas resulta de la combinación de factores intrínsecos y extrínsecos, mientras que la variabilidad temporal la causa principalmente los cambios de las características del suelo generadas en el tiempo. La variabilidad espacial intrínseca hace referencia a las variaciones naturales en las características del suelo, resultantes de procesos de formación del suelo, mientras que la variabilidad espacial extrínseca hace alusión a las variaciones provocadas por falta de uniformidad en las prácticas de manejo del suelo (Zacharias, 1998; Montero y Larraz, 2008; Moral *et al.*, 2011). Es por ello que el suelo posee una variabilidad que es inherente a como sus factores de formación interactúan en el paisaje. Éste tipo de variabilidad en los suelos es ya conocida desde hace varias décadas y debe

ser tomada en cuenta en todos los muestreos en campo que se realicen (Goovaerts, 1998).

Las propiedades del suelo y los componentes de rendimiento de los cultivos, en lugar de tener una distribución espacial al azar, poseen una dependencia espacial, dando a entender que las distintas observaciones están relacionadas con sus vecinas (Peña *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2008; Moral *et al.*, 2011). La evaluación de la dependencia espacial requiere de la aplicación de procedimientos estadísticos como análisis de semivariogramas utilizando kriging, y análisis de mapas generados con valores interpolados (Utset *et al.*, 2000; Giraldo, 2002; Romano *et al.*, 2011).

1.3.1 Semivariograma y Kriging

Un concepto fundamental en geoestadística es el semivariograma, el cual es usado para analizar la estructura espacial de las propiedades del suelo. Su estructura está dada por: pepita (la varianza es cero a cortas distancias), la meseta (variación a la cual el variograma se eleva asintóticamente), y el rango de dependencia espacial. La longitud de correlación indica la variabilidad espacial de las variables estimadas basándose en un semivariograma experimental. Ésta longitud varía según la distancia mínima entre puntos de muestreo y tamaño de la muestra. Entender el semivariograma, ayuda a relacionar algunos de los descriptores del semivariograma con las características espaciales de los datos. La Figura 4-1 esquematiza la mitad de la variación entre dos puntos en un campo espacial como una función de su separación (Al-Omran *et al.*, 2004; Santra *et al.*, 2008; Lakhankar *et al.*, 2010; Abu y Malgwi, 2011).

La semi-varianza o mitad de la varianza es una autocorrelación estadística que se define como:

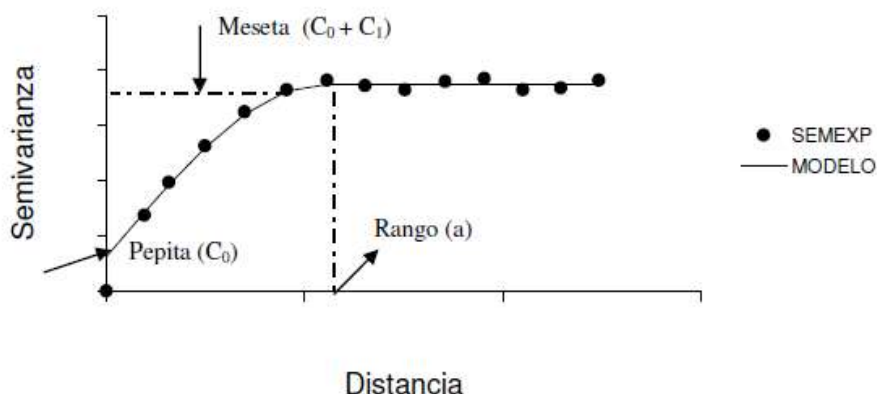
$$(1) \quad \gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z_i - z_{i+h})^2$$

Donde $\gamma(h)$ = semi-varianza para la clase de intervalo de distancia (h), Z_i = valor medido de la muestra u observación en el punto i , Z_{i+h} = valor de la muestra u observación en el punto $i + h$, y $N(h)$ = número total de parejas de muestras u observaciones para el intervalo de separación o número de pares de datos que están separados por una distancia h (Vieira, 2000; Al-Omran *et al.*, 2004; Holmes *et al.*, 2005; Santra *et al.*, 2008; Bolfe *et al.*, 2010; Abu y Malgwi, 2011).

Los criterios de mejor ajuste de los mínimos cuadrados son usados para ajustar la semi-varianza de los datos (Figura 1-2), determinando la pepita (C_0), la meseta ($C_0 + C$), y el rango de la dependencia espacial (A). La pepita es la intersección del semivariograma, indicando la semi-varianza entre los dos puntos más cercanos separados en el campo espacial. La meseta representa la variación espacial dependiente; éste es equivalente a la semi-varianza máxima cuando el modelo del semivariograma es limitado. El rango mide el límite de la dependencia de una variable dada, y es la distancia a la cual el

semivariograma alcanza su meseta, y se define como el límite de la dependencia espacial (Webster y Oliver, 2007).

Figura 1-2: Semivariograma acotado y graficación de sus elementos constitutivos. Los puntos hacen referencia al Semivariograma Experimental (SEMEXP) y la línea continua al Modelo Teórico (MODELO). (Giraldo, 2002; Romano et al., 2011).



Los modelos de semivariogramas más utilizados y comunes son el esférico, gaussiano, exponencial y lineal, y se definen como:

Modelo Esférico: Presenta por característica un crecimiento rápido cerca al origen, pero sus incrementos marginales van decreciendo a distancias grandes, hasta que a distancias superiores al rango los incrementos son nulos. Matemáticamente se expresa como:

$$(2) \quad \gamma(h) = C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{A_0} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{A_0} \right)^3 \right] \quad \text{para } h \leq A_0$$

Modelo Gaussiano: En éste modelo, la dependencia espacial se desvanece solo en una distancia que tiende al infinito. Su distintivo fundamental es su forma parabólica cerca al origen. Matemáticamente se expresa como:

$$(3) \quad \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{A_0^2}\right) \right]$$

Modelo Exponencial: Dicho modelo es aplicado cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre observaciones. El valor del rango

es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la meseta. Es uno de los modelos más utilizados. Matemáticamente se expresa como:

$$(4) \quad \gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{A_0}\right) \right]$$

Modelo Lineal: Es un modelo en el cual no se alcanza la meseta. Su utilización puede llegar a ser delicado, puesto que en algunos casos es indicativo de la presencia de no estacionariedad en alguna dirección. Su expresión matemática es:

$$(5) \quad \gamma(h) = C_0 + \left[h \left(\frac{C}{A_0} \right) \right]$$

Para todos los modelos, $\gamma(h)$ = semi-varianza para la clase de intervalo de distancia (h); h = distancia de separación del intervalo; C_0 = Efecto Pepita ≥ 0 ; C = Meseta $\geq C_0$; y A_0 = Rango.

El modelo esférico es una función cuadrática modificada para que en alguna distancia A_0 , los pares de puntos no se autocorrelación en y el semivariograma alcance una asíntota (rango efectivo del modelo esférico $A = A_0$). Sin embargo, en los modelos Gaussiano o hiperbólicos el umbral nunca encuentra la asíntota. En tal caso, el rango efectivo ($A = \sqrt{3}A_0$) es la distancia a la cual la meseta ($C_0 + C$) está dentro del 5% de la asíntota. La utilidad de las variables autorrelacionadas empieza a ser menor en longitudes más grandes a su rango de escala. Las medidas son usualmente representadas por un decaimiento en la escala de longitud exponencial en sus correlaciones tales que la covarianza es proporcional a $\exp(-1/A)$, donde A es el rango (Vieira, 2000; Al-Omran *et al.*, 2004; Iqbal *et al.*, 2005; Santra *et al.*, 2008; Lakhankar *et al.*, 2010; Abu y Malgwi, 2011).

Los modelos matemáticos como el esférico, gaussiano o exponencial, pueden ser ajustados al semivariograma experimental para observar la variación espacial de la propiedad analizada. Calculados los semivariogramas, se observó su comportamiento y la tendencia que evidencian, caracterizando así la dependencia espacial de las variables analizadas, para luego ser ajustados a modelos teóricos (modelos exponencial, esférico y gaussiano), estimando además, los coeficientes del efecto pepita (C_0), meseta (C_0+C_1) y rango o alcance (A) para cada modelo; éstos parámetros del semivariograma describen las características de la variación espacial. El efecto pepita es el indicador de discontinuidad entre muestras, es decir, indica la variabilidad espacial no detectada durante el muestreo. La meseta es el valor de la semivarianza, en la cual el modelo se estabiliza y presenta valor constante; el rango simboliza la distancia máxima a la cual el valor de una variable posee dependencia espacial; cuando el rango es grande, sus variaciones predominan a distancias amplias, mientras que si éste es pequeño, la mayor variación se produce a cortas distancias (Webster y Oliver, 2007).

Se determinó el grado de dependencia espacial (GDE), relacionando el efecto pepita con la meseta (C_0/C_0+C_1) y fue clasificado de acuerdo a los criterios de Cambardella (1994),

quien menciona que éste es fuerte si es superior al 75%, moderado si está entre 25% y 75%, y débil si es inferior al 25%.

El Kriging es una técnica de interpolación basada en la teoría de variables regionalizadas desarrollada por Matheron (1965), que ofrece una amplia variedad y flexibilidad de las herramientas que proporcionan estimaciones a los sitios no muestreados usando la media ponderada de los valores de las muestras vecinas pertenecientes a una distancia determinada, llamada zona de influencia. Ésta técnica requiere de un modelo de semivariograma para calcular los valores de las variables de cualquier intervalo de muestreo posible. La funcionalidad del semivariograma en relación con el kriging, permite estimar la precisión de un valor en un sitio no muestreado con relación a los valores de las muestras en otros lugares (Trangmar *et al.*, 1985; Vieira y Gonzalez, 2003; Iqbal *et al.*, 2005; Lakhankar *et al.*, 2010; Abu y Malgwi, 2011; Moral *et al.*, 2011).

La interpolación se realizó mediante Kriging, donde todos los estimadores son únicamente variantes del estimador básico $Z^*(x)$, el cual se define por la fórmula:

$$(6) \quad Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i [Z(x_i) - m(x_i)]$$

denominando a w_i como los pesos asignados a los datos $Z(x_i)$ siendo ellos realizaciones de la variable aleatoria $Z(x_i)$. Los valores esperados de las variables aleatorias $Z(x)$ y $Z(x_i)$ son $m(x)$ y $m(x_i)$, respectivamente (Moral *et al.*, 2011; Millán *et al.*, 2012).

Los semivariogramas y krigeado se obtuvieron mediante el software GS+ (Robertson, 1998), determinando la variabilidad espacial de las diferentes variables. Los mapas de distribución de cada variable fueron elaborados mediante el uso del software Surfer 8.0 (Golden Software Inc., 1999). El uso combinado Kriging-mapas de contorno genera una efectiva reducción en el carácter tendencioso de las predicciones encontradas en los mismos. Éste procedimiento produce resultados más precisos que al ser utilizados de forma independiente ó por sí solos, aunque presenten un incremento en la precisión no es muy alto (Utset *et al.*, 2000; Moral *et al.*, 2011).

1.4 Análisis de datos composicionales

Antes de realizar un análisis multivariado es necesario el conocer y distinguir las distintas variables del estudio, identificando el tipo de datos presentes en ellas. Múltiples de los análisis de datos de una o más poblaciones se basan en proporciones o porcentajes. Éste tipo de datos se denominan composicionales; datos o composiciones que describen, de forma cuantitativa, las partes de un todo, aportando únicamente información relativa entre sus componentes. La composición se entiende como un vector cuyos elementos son estrictamente positivos y de suma constante.

En múltiples ramas de ciencias de la tierra (Geología, Agricultura, Arqueología, Biología, Geografía, Paleontología), la mayoría de los análisis de datos composicionales, hacen énfasis a enfoques estadísticos estándares; actualmente ha surgido la alerta en el sentido en que éste tipo de enfoques no deberían aplicarse directamente a éstos datos, puesto que se cae en el error de expresar variables dependientes como independientes (Campbell *et al.*, 2009; Moral *et al.*, 2011; Tolosana, 2011).

En dichas ciencias, tratar con bases de datos composicionales que presentan dependencia espacial, es bastante común; más allá de ello, pueden considerarse como datos composicionales, datos tales como las proporciones texturales (arena-limo-arcilla), las proporciones de porosidad total (macroporos-mesoporos-microporos), la composición mineral del suelo ó sedimentos, entre otras.

Es llamada composición a un vector de elementos positivos de suma igual o menor a una constante (1, 100 ó 10^6), que brindan información parcial acerca de la importancia de varios componentes de un sistema (Aitchison, 1986; Tolosana, 2011). La idea fundamental del análisis composicional es, como estableció Aitchison (1986) transformar los datos en términos de logaritmos de cocientes entre sus partes. Al utilizar la transformación log-cociente centrada *clr*, se logra representar la totalidad de los datos en el espacio Euclidiano, es decir el espacio bidimensional o tridimensional que cumple los axiomas, proposiciones o postulados de Euclides, llamado también espacio cartesiano, en vez de estar obligados a trabajar en el simplex, denominado como el espacio muestral natural o soporte de éste tipo de datos, representado como diagrama ternario (triángulo equilátero de altura unidad), que posee estructura de espacio vectorial. Se concluye que el espacio de todas las composiciones (llamado también espacio composicional) es un espacio de tipo cociente, y que el simplex es una forma o manera de exponer o explicar dicho espacio.

La transformación log-cociente centrada (*clr*) se calcula tomando el logaritmo cociente de cada elemento entre la media geométrica de la muestra (Moral *et al.*, 2011; Filzmoser y Hron, 2009; Filzmoser *et al.*, 2009a; Filzmoser *et al.*, 2010). Dado que resulta un vector de mediciones x en D elementos en el simplex, ésta transformación se determina como:

$$(7) \quad \text{clr}(x) = \left[\ln \left(\frac{x_1}{g(x)} \right), \ln \left(\frac{x_2}{g(x)} \right), \dots, \ln \left(\frac{x_D}{g(x)} \right) \right]$$

Donde $g(x)$ es la media geométrica de las D partes de x .

Existen dos transformaciones adicionales que pueden ser utilizadas para propósitos de visualización: la transformación log-cociente aditiva (*alr*) y la transformación log-cociente isométrica (*ilr*). Se escogió la *clr*, la cual es biyectiva y simétrica, y permite la visualización de todos los elementos; además, la suma de las componentes del vector transformado es igual a cero (Mateu-Figueras *et al.*, 2003). De igual forma, ésta transformación permite representar los resultados en términos de logaritmos de cocientes entre las partes de una composición, y las proporciones y/o porcentajes en términos

relativos a su naturaleza (Carranza, 2011); posteriormente, a éstos resultados se les aplica los análisis estadísticos estándares requeridos, adaptados de los datos transformados. Filzmoser *et al.* (2009b) mencionan que, a excepción de las tres transformaciones propuestas para abrir un sistema de números cerrados, cualquier otra transformación de variables composicionales no es suficiente para los análisis estadísticos.

Se efectuó la transformación de datos composicionales para las propiedades físicas del suelo como son la porosidad total y la textura que están integradas por la sumatoria de las variables macroporos, mesoporos y microporos, para el caso de la primera, y, arena, limo y arcilla, respecto a la segunda. En cada grupo, sus variables constituyen una composición, dado que, para cada muestra de suelo, la suma de todas sus partes o componentes es una constante igual a 1 ó a 100%, si se hace énfasis en términos de porcentajes (Millán *et al.*, 2012); esto significa que para cada propiedad física del suelo que se componga de dos o más variables, dichas subvariables dependen una de otra. Es por ello que se realizó un análisis estadístico de los datos bajo el concepto teórico de los datos composicionales propuesto por Aitchison (1986), donde se realiza una transformación logarítmica a ellos, logrando una independencia a cada variable estudiada. Los cálculos y gráficos estadísticos se realizaron con el software Excel-base CoDa-Pack (Thio, 2004).

1.5 Análisis multivariado

El análisis multivariado es un conjunto de métodos estadísticos cuya finalidad es estudiar, analizar, representar e interpretar simultáneamente conjuntos de datos multivariantes en el sentido de la existencia de variables medidas para cada individuo u objeto estudiado. Su esencia radica en un mejor entendimiento y comprensión del fenómeno objeto de estudio, el cual se obtiene de la información que los métodos estadísticos univariantes y bivariantes no pueden obtener. En sí éste análisis se dedica al estudio de varias variables de modo simultáneo, considerando varios aspectos (valores en cada caso) y determinando las relaciones simultáneas entre éstas variables (Salvador Figueras, 2000; Vega Vilca, 2011; Cuadras, 2012, Tusell, 2012). Ésta técnica estadística ha sido utilizada para estudios de índole ambiental, económica, social y en agricultura como los trabajos expuestos por Momtaz *et al.* (2009), Reid y Spencer (2009), Moral *et al.* (2010) y Morari *et al.* (2009).

Entre los distintos métodos de análisis multivariado para determinar la interdependencia en las variables e individuos estudiados, se acotan los siguientes: análisis por componentes principales, análisis de factores y análisis por conglomerados ó clústers, que son los utilizados en éste estudio, análisis de ordenamiento multidimensional, entre otros métodos paramétricos. Los utilizados para describir dependencia están el análisis de regresión multivariado, el análisis de contingencia múltiple y el análisis discriminante (Sharma, 1998; Johnson y Wichern, 2007; Li *et al.*, 2007; Morari *et al.*, 2009; Xin-Zhong *et al.*, 2009).

El análisis de componentes principales (PCA) disminuye la dimensionalidad de las observaciones, permitiendo la descripción de los datos en pequeños conjuntos de datos, explicando un elevado porcentaje de la varianza total; para todas las variables evaluadas

éste análisis posibilitó observar la similitud o disimilitud de los valores de cada una de ellas pertenecientes a los lotes estudiados, y de las diferentes relaciones existentes. Se utilizó un PCA normado, en el cual las coordenadas de los individuos son los valores estandarizados de cada variable analizada. Las variables estandarizadas pierden las unidades de medida, lográndose la eliminación del efecto de la escala de medida, obteniendo una uniformidad en los datos (Pardo y Cabarcas, 2001); seguido de éste procedimiento, dentro del análisis se aplicó la rotación de Varimax, la cual permite aprovechar las relaciones entre las variables originales y las nuevas variables generadas, facilitando la interpretación de los componentes principales (Caten *et al.*, 2011). El análisis de conglomerados (CA ó *Clusters*) identifica grupos donde los parámetros y propiedades presentan algunas semejanzas entre sí; la disimilaridad entre ellos es una distancia medida (Giacomino *et al.*, 2011). La proporción de la variación de cada variable explicada en los componentes principales relacionados es la suma de sus correlaciones al cuadrado; de allí que las variables que mejor se explican, se encuentran ubicadas por encima de las correlaciones de 0.5, como punto de referencia al 5% de la significancia, mientras que las menos explicadas se ubicarán cerca del origen (Hernández *et al.*, 2003).

Cuadras (2012) precisa que los objetivos principales de éste análisis son: (i) resumir los datos en un conjunto pequeño de nuevas variables pero con mínima pérdida de información, (ii) determinar grupos en los datos, en dado caso que existan, (iii) clasificar las nuevas observaciones en grupos establecidos, y, (iv) relacionar dos grupos de variables.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Determinar la relación entre parámetros productivos del caucho y las propiedades físicas y químicas del suelo en un Oxisol de la Altillanura Colombiana, mediante análisis descriptivo, geoestadístico y multivariado.

2.2 Objetivos específicos

- ❖ Establecer la dependencia espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante el uso de técnicas geoestadísticas.
- ❖ Determinar la variabilidad espacial de algunos parámetros productivos del caucho.
- ❖ Identificar correlaciones entre las propiedades del suelo, así como su relación lineal y espacial con los parámetros productivos.

3. Generalidades del área de estudio

3.1 Geología y localización geográfica

La evolución y desarrollo de los suelos de la Orinoquia están ligados con el origen de la Megacuenca sedimentaria que se encuentra ubicada entre el Escudo de la Guyana y el flanco derecho de la Cordillera Oriental. Evidencian predominio de depósitos cuaternarios de origen fluvial, rocas sedimentarias del Terciario como areniscas, lodolitas y calizas, las cuales reposan sobre sedimentarias del Cretáceo, Paleozoico y rocas cristalinas félsicas del Precámbrico (Malagón, 2003).

El área geográfica de referencia comprende una extensa zona que va desde el municipio de Puerto López (Meta), sobre el margen derecho del río Meta, hasta la desembocadura del río Orinoco. Según Sánchez (2010), el paisaje de altiplanicie presenta una superficie de acumulación de origen Plio-Pleistocénica, que por fenómenos tectónicos es solventada respecto de la planicie aluvial de los ríos Meta y Guayabero. Éste río se halla ubicado al suroriente de los ríos Meta y Metica, y al norte del río Vichada, levantada antes del Pleistoceno Superior en forma de bloques basculados ligeramente hacia el oriente, lo que manifiesta que los sedimentos del Terciario Superior al Cuaternario inferior no estén enterrados por depositaciones más jóvenes o recientes. Este paisaje es llamado en Colombia "Altillanura" y enmarca sabanas con diferentes grados de disección, cubiertas con pastos naturales.

3.2 Zona de estudio y fisiografía

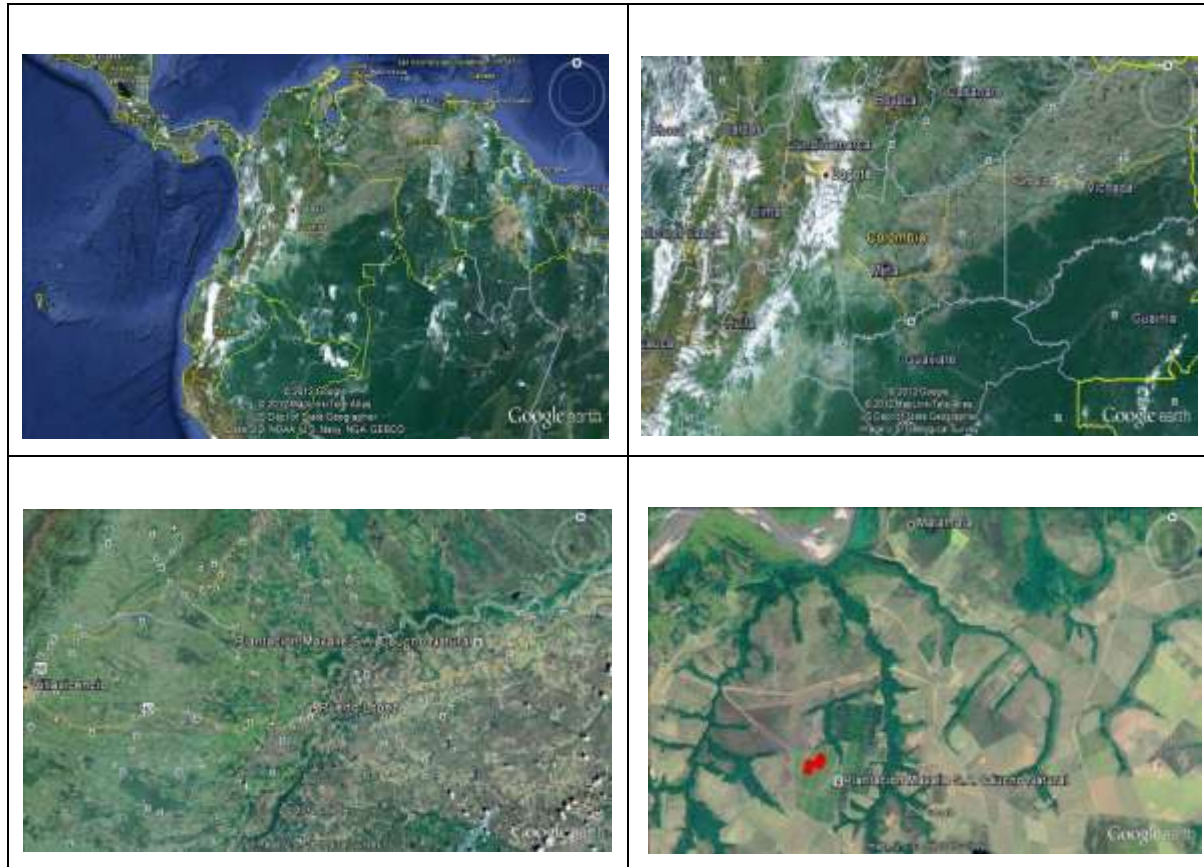
La zona de estudio está situada en la altillanura bien drenada del municipio de Puerto López, departamento del Meta, en la empresa Mavalle S.A., que se encuentra entre las coordenadas geográficas WGS84: *4°15'10" Norte* y *72°33'55" Oeste*, con altura media de 190 msnm (Figura 3-1). Corresponde a una llanura aluvial, de relieve ligeramente plano, con pendientes inferiores al 3%.

Según Sánchez (2010), este paisaje, debido al diferente grado de disección que presenta, se encuentra subdividido respecto a la inclinación del relieve (áreas planas y plano-cóncavas). A partir de sedimentos finos se han originado suelos cuyos rasgos morfogénéticos hacen alusión al proceso pedogenético que los ha venido afectando, pero que comparten múltiples propiedades, de las cuales una es su muy baja fertilidad.

El suelo sobre el cual se realizó el estudio, proviene de sedimentos de laderas del Piedemonte, que han sido transportados por el río Meta, es decir, son suelos que tienen como Material Parental depósitos aluviales antiguos. Los grandes grupos presentes en

ésta zona del paisaje de altiplanicie son: *Haplustox*, *Haplustults*, *Hapludox*, *Haplaquox* y *Dystrudepts*.

Figura 3-1: Localización geográfica del área de estudio (coordenadas geográficas: WGS84). (Tomado de: [Google Earth, 2012](#)).



3.3 Clima

El clima ambiental influyente en la zona de estudio es cálido húmedo, con una temperatura mayor de 24°C y precipitación promedio anual entre 2000 a 4000 mm, con rango de precipitaciones tipo Monomodal, además de presentar altitudes comprendidas entre los 180 y 450 msnm (IGAC, 2004). La estacionalidad de la precipitación es muy marcada, y se acentúan los meses secos desde finales de diciembre hasta marzo o abril (Sánchez, 2010).

3.4 Vegetación

Tanto en la Altillanura (altiplanicie) como en la Orinoquia inundable el bioma dominante es el de sabanas tropicales, con presencia de gramíneas de los géneros *Trachypogon*, *Andropogon*, *Anonopus*, *Brachiaria*, *Cynodon*, *Cyperus*, *Desmodium*, *Mimosa*, *Paspalum* y *Leptocoryphium*, los cuales predominan dependiendo de la humedad del suelo, y especies arbustivas como Chaparro (*Curatela americana*) y Peralejo (*Byrsonima crassifolia*) dominantes en zonas no hidromórficas. El aporte de biomasa es pobre (2.2-3.8 ton ha⁻¹ año⁻¹, en sabanas de tipo herbáceo), pero puede ser mayor (28 o más ton ha⁻¹ año⁻¹) dependiendo de otras coberturas existentes gracias al régimen de lluvias, longitud de la estación seca y nutrientes disponibles para ellas (Rao *et al.*, 2001; Rippstein *et al.*, 2001; Malagón, 2003). Las formaciones vegetales asociadas a “bosques de galería” suministran mayor cantidad de biomasa, incrementándose así los contenidos de humedad y la disponibilidad de nutrientes (Malagón, 2003).

3.5 Suelos

Los suelos hacen parte del paisaje de Altiplanicie Estructural de la unidad AVCa en la consociación Typic Hapludox (75%). Presenta formas de relieve tipo de mesas y superficies onduladas con pendientes inferiores al 3%, afectados por escurrimiento difuso en planos convexos; su material parental está constituido por arcillas. Son suelos profundos a moderadamente profundos, de texturas finas a medias, bien a moderadamente drenados, fuerte a medianamente ácidos, de fertilidad baja, limitados por contenidos de aluminio intercambiable (Al⁺³) superiores al 70%, capacidad de intercambio catiónico menor a 16 cmol·kg⁻¹, disminuyendo a profundidad, y contenidos de P disponible muy bajo (IGAC, 2004).

Las tierras de esta unidad son dedicadas principalmente a la ganadería de tipo extensivo, con pastos naturales de sabana e introducidos como el caso del *Brachiaria*. Presentan limitaciones para la agricultura por su bajo contenido nutricional. Sin embargo, se encuentran establecidos cultivos transitorios, pastos mejorados y cultivos perennes como palma de aceite, caucho y otros forestales (IGAC, 2004).

3.6 Clasificación y descripción del perfil

El perfil del suelo descrito (Tabla 3-1) y caracterizado en el área de estudio hace referencia a un suelo del Orden Oxisol. Son suelos minerales altamente evolucionados (intemperismo muy avanzado), con muy pocos minerales meteorizables, arcillas de baja actividad (Caolinita 1:1), óxidos de Al-Fe, alto contenido de cuarzo (arenas), abundancia de sesquióxidos. Fertilidad potencial y actual muy bajas (en función del componente mineral) la cual depende del contenido de la materia orgánica, alta acidez, altos

contenidos de Al^{+3} , y alto poder fijador de PO_4^{-3} (IGAC, 1995; Minasny y Hartemink, 2011).

Son Oxisoles con alternancia estacional de humedad muy marcada, lo cual determina para Colombia que la vegetación presente, sea en general, de Sabanas con repercusión en la biomasa vegetal y en el aporte de MO al suelo (IGAC, 1995).

A continuación se describe el Perfil Modal de Suelos:

Tipo de perfil: Modal

Taxonomía: **Inceptic Hapludox, franca gruesa, kaolinítica e isohipertérmica.**

Localización geográfica: Departamento: Meta. Municipio: Puerto López.

Sitio: Finca Mavalle S.A.

Paisaje: Altiplanicie estructural. Tipo de relieve: Mesas y superficie onduladas. Forma del terreno: Litología /

Sedimentos: Arcillas con recubrimientos continuos de limos eólicos

Clase de pendiente: ligeramente ondulada. Pendiente (%): 1-3.

Clima ambiental: Cálido húmedo

Precipitación promedio anual: Alrededor de 2.000 mm.

Temperatura promedio anual: 25°C

Clima edáfico: Údico e Isohipertérmico.

Erosión: no hay. Tipo: no hay. Grado: no hay.

Movimientos en masa: no hay

Clase: Tipo: Frecuencia:

Pedregosidad superficial: no hay. Tipo: Clase:

Afloramientos rocosos: no hay. Clase: Superficie cubierta:

Inundaciones: no hay. Frecuencia: Duración:

Encharcamientos: no hay. Frecuencia: Duración:

Nivel freático: no se encontró

Drenaje natural: Externo lento, interno moderado, natural bien drenado.

Profundidad efectiva: Profunda.

Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, endopedón óxico

Características diagnósticas: endopedon óxico, régimen de humedad údico.

Vegetación natural: sustituida por cultivos comerciales de caucho

Descrito por: E. Chacón y J.P. Fernández. Fecha: Junio de 2010.

Perfil Revisado, corregido y aprobado por: Jorge Hernán Londoño Ramos (Agrólogo-Contratista IGAC). Fecha: Agosto de 2010.

Tabla 3-1: Descripción del perfil de suelo Inceptic Hapludox, calicata empresa Mavalle S.A., Puerto López (Meta).



| HORIZONTES MAESTROS | DESCRIPCIÓN |
|--|---|
| <p>Oi 3-0 cm</p> | <p>Capa de hojarasca en superficie, con varios estados de descomposición, especialmente el fibríst.</p> |
|  <p>Ap 0-30 cm</p> | <p>Color pardo oscuro 7.5YR3/3 (húmedo), presente en un 40 a 45% en el horizonte, y color pardo rojizo oscuro 5YR4/6 (húmedo); textura Franco-Arenosa (FA); estructura en bloques subangulares medios y finos, débiles, bien desarrollados; consistencia friable; muchos poros (abundantes) medios y finos irregulares; hay reacción al NaF (ligera), no hay reacción al HCl y H₂O₂; límite difuso y plano; presenta frecuentes raíces medias y finas, vivas y de distribución normal; hay presencia de muchos macroorganismos; pH 5.5 en campo, fuertemente ácido y pH 4.5 en laboratorio, extremadamente ácido.</p> |
|  <p>Bw 30-50 cm</p> | <p>Color pardo rojizo 2.5YR4/6 (húmedo); textura Franco-Arenosa (FA); estructura en bloques subangulares medios y finos, débiles, bien desarrollados; consistencia friable; muchos poros (abundantes) medios y finos irregulares; hay reacción al NaF (ligera), no hay reacción al HCl y H₂O₂; límite difuso y plano; presenta pocas raíces medias y finas, vivas y de distribución normal; pH 5.0 en campo, muy fuertemente ácido y pH 4.7 en laboratorio, muy fuertemente ácido.</p> |

Tabla 3-1. Continuación...

| | |
|---|--|
|  <p style="text-align: center;">Bo 50-100 cm</p> | <p>Color pardo rojizo 2.5YR4/4 (húmedo); textura Franco-Arenosa (FA); estructura en bloques subangulares medios y finos, débilmente desarrollados; consistencia friable; pocos poros medios y muchos poros finos irregulares; hay reacción al NaF (ligera), no hay reacción al HCl y H₂O₂; límite difuso y plano; presenta pocas raíces medias y finas, vivas y de distribución normal; pH 5.0 en campo, muy fuertemente ácido y pH 4.9 en laboratorio, muy fuertemente ácido.</p> |
|---|--|

3.7 Etapas fenológicas, manejo integrado del cultivo y sistema de sangría

3.7.1 Etapa de vivero

Los clones que se encuentran plantados en el área de estudio (RRIM 600 y FX 3864) provenientes de vivero, se establecieron en el año 1996. Durante la etapa de vivero recibieron aplicación de fertilizantes a base de elementos mayores N, P, K, Ca, Mg y S, y elementos menores como Cu, Zn, B y Mn, en proporción de 1 g por planta de cada nutriente, es decir, se aplica igual cantidad de nutrientes, tanto mayores como menores, a dichas plantas. A medida que la planta crece en vivero, la dosis puede incrementar hasta 2 g por planta. Su aplicación puede ser en forma sólida o líquida, aunque si se realiza en forma líquida debe aplicarse cada 8 días, mientras que en sólida, se puede hablar de 1 ó 2 aplicaciones al mes. El material vegetal se mantiene por un tiempo de 1 a 2 años en vivero; posteriormente se lleva a campo para su establecimiento.

3.7.2 Establecimiento y mantenimiento

Con la preparación del terreno se aplica Cal Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ o Calfos, a razón de $2 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. Una vez establecido el cultivo, dicha enmienda se aplica en proporción de 1 kg por planta cada dos años. Desde el año 2012 se viene realizando aplicaciones programadas de Yeso Agrícola ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tres veces al año como enmienda; al hacer aplicaciones de cal se logra neutralizar el aluminio (Al^{+3}) tóxico, el cual se intercambia por iones Ca, Mg y S, sirviendo como elementos nutrientes para las plantas, incrementándose así el pH del suelo y su capacidad de intercambio catiónica, además de disminuir su acidez. El plan de fertilización se realiza de forma fraccionada tres veces al año durante la época invernal, *in situ*, con 25 a 30 g de elemento mayores (N, P, K, Ca, Mg, S) y 5 g de elementos menores (Cu, Zn, B y Mn), haciendo mezcla hasta alcanzar una proporción de 50 g por planta (mayor requerimiento de elementos mayores); los fertilizantes más usados son la úrea, superfosfato triple (SPT) y cloruro de potasio (KCl). Cabe mencionar que la fertilización de mantenimiento está condicionada por el análisis de suelos. Para mantener balanceado el cultivo en cuanto a relaciones iónicas, deben estar en el rango ideal ($\text{Ca}/\text{Mg}=2$ a 4, $\text{Mg}/\text{K}=3$, $\text{Ca}/\text{K}=6$ y $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{K}=10$), ya que un incremento o disminución puede ser contraproducente para el cultivo.

Es necesario acotar que en la zona no se presenta sistema de riego; la necesidad hídrica en el cultivo se suple con la época invernal y las lluvias esporádicas que se presenten en la época seca.

3.7.3 Poda de formación

En el año de establecimiento del cultivo, es necesario realizar la deschuponada, procedimiento que comienza desde el momento de la siembra, suprimiendo todos los rebrotes generados por la planta, exceptuando la yema del injerto. Es necesario suprimir todos los chupones o ramas hasta los 2 metros de altura, teniendo como fin el lograr un tronco recto y liso. La deschuponada debe realizarse cada 8 o 15 días, durante los primeros seis meses, para posteriormente realizarla mensualmente.

En el caucho se presenta el proceso de inducción a la ramificación, el cual consiste en quitar los folíolos de las hojas del último crecimiento en el momento en que estén maduras. Si el árbol a los 2 o 2,5 m de altura ya ha ramificado naturalmente, no se hace ningún procedimiento y se deja libre para su crecimiento. Si por el contrario, después de los 2,5 m no ha ramificado, es necesario inducirla, puesto que copas más altas están susceptibles a daños por el viento, y un tronco más corto engruesa más rápido, obteniendo así mayor precocidad del árbol.

La distribución de las diferentes ramas en el árbol es de vital importancia, ya que un desequilibrio en la copa puede generar volcamiento. Ya que el caucho es un árbol de doble propósito (productor de látex y productor de madera), la poda de formación es de suma importancia (SENA, 2006).

3.7.4 Control de malezas

Como en la mayoría de los cultivos, las malezas compiten por luz, agua, espacio y por nutrientes. En el caso del caucho, dicha competencia retarda su crecimiento en los primeros años. Se puede sembrar plantas de cobertura que mejoren la calidad del suelo, protejan de la erosión y reduzcan el mantenimiento en los primeros 3 o 4 años de establecido el cultivo; ésta actividad se debe realizar después de la aplicación de herbicidas como gramoxone y round up, en las dosis recomendadas y que presenten pantallas protectoras.

Es aconsejable la utilización de la calle, sembrando cultivos asociados, dejando 1 a 2 m a cada lado de la línea de plantación, logrando el mantenimiento de espacios libres de plantas nocivas para el caucho. Así mismo, el mantenimiento de la línea de plantación es indispensable para el desarrollo del árbol; el control de malezas se realiza principalmente a mano con machete, guadañadora o azadón. En estado precoz, es indispensable realizar dicha labor cada 3 meses, con plateo cada 3 o 6 meses en el resto de la plantación, evitando la presencia de plantas arbóreas que brinden sombra al caucho. En estado adulto, la plantación cierra el dosel, facilitando y economizando el control de malezas (SENA, 2006).

3.7.5 Manejo integrado de enfermedades y plagas

Es necesario que el agricultor reconozca oportunamente los ataques de enfermedades y plagas en las diferentes fases del cultivo de caucho, con el fin de hacer un control oportuno, minimizando el uso de agroquímicos y evitando daños económicos a la plantación (SENA, 2006).

Dentro de las principales enfermedades del caucho se encuentran:

Mal suramericano de las hojas (*Microcyclus ulei*); principal enfermedad del caucho en América, convirtiéndose en factor limitante para el desarrollo del cultivo. Las condiciones favorables para el desarrollo de dicha enfermedad son: (i) humedad relativa mayor al 95% por un lapso de 10 horas continuas, durante un periodo mínimo de 12 noches por mes y agua libre de rocío sobre las hojas durante 6 horas, (ii) temperatura óptima para el desarrollo del hongo entre 21 y 26°C, con diseminación de esporas por el viento y la lluvia. Condiciones favorables para el patógeno pueden generar en la planta pérdida total del follaje, y en plantaciones adultas de clones susceptibles, al presentarse defoliaciones sucesivas, produce muerte del extremo de las ramas, que luego ocasiona muerte descendente, disminuyéndose la producción de látex. Varios limitantes para el desarrollo de ésta enfermedad son: humedad relativa menor al 70%, vientos suaves que secan con mayor rapidez las hojas, disminuyendo la infección, evapotranspiración real mayor a 900mm, deficiencia hídrica en los meses de refoliación.

Dentro de los controles recomendados se resaltan: control químico con termonebulizaciones con metil tiofanato (cercobin o topsin) a razón de 250g por hectárea, suplementado con benlate a razón de 400 g por hectárea, para el control de esporulación conidial; se recomienda hacer dichas aplicaciones en etapa de vivero, pues en plantaciones establecidas, la aplicación de fungicidas a las hojas es antieconómico. El

control más efectivo y económico se fundamente en la siembra de nuevas plantaciones en “zonas de escape”, es decir en zonas desfavorables para el hongo y donde el caucho pueda desarrollarse y producir económicamente (SENA, 2006).

Mal rosado (*Corticium salmonicolor*); control con sulfato de cobre y fungicidas azufrados como calixin.

Mancha areolada (*Thanatephorus cucumeris*); se debe evitar el establecimiento de plantaciones donde la refoliación concuerde con la época de lluvias. Se debe retirar las ramas y partes afectadas de la planta, para luego amontonarlas y quemarlas. Como control químico se aconseja aspersiones al inicio y durante la época de lluvias con ridomil y oxiclورو de cobre.

Raya negra o cáncer del panel o gangrena (*Phytophthora palmivora*); se controla evitando altas densidades de siembra, y no causando heridas durante el rayado, además de control periódico de malezas y utilización de productos preventivos como benlate, ridomil y fitorax.

Antracnosis (*Colletotrichum gloesporioides*); control químico a base de oxiclورو de cobre.

Dentro de las principales plagas del cultivo de caucho, se destacan:

Hormiga arriera (*Atta* sp); se controla eliminando la reina del hormiguero, ya que mientras esté con vida, el hormiguero continuará. Control químico con insecticidas a base de clorpirifos (lorsban 2,5%, arrierafin, sumithion), insuflándolos por las bocas del arrieral.

Gusano cachón (*Erinnyis ello*); uso de insecticidas biológicos a base de *bacillus thuringiensis* como el dipel o el thuricide, o con liberaciones de himenópteros y entomoparásitos como *Trichogramma* sp.

Gusano peludo (*Premolis semirufa*); control con insecticidas de contacto.

Comején blanco o termitas (*Coptotermes* sp); uso de insecticida sistémico como sistemín o dimecrón para destruir los nidos.

3.7.6 Parámetros y sistema de sangría

El criterio fundamental para el inicio de la sangría es que el 50% de los árboles por hectárea cumplan con una circunferencia superior a 45 cm, a 1 m de altura, es decir, 5 años después de la siembra. La mejor época para iniciar éste procedimiento es al final de un período seco, y no coincidir con plena temporada de lluvias, ni con refoliación de los árboles (SENA, 2006).

El de explotación o sangría combina la forma, longitud de la incisión, número de incisiones y frecuencia, dicha combinación de factores define su intensidad. Después de iniciarse la sangría, una plantación puede explotarse durante 25 a 30 años y hasta más. La sangría dura menos de 3 horas, y después de 3 a 4 horas de escurrimiento se recoge el látex.

El rayado o sangría debe realizarse en las primeras horas de la mañana (5 o 6 am), ya que las horas frescas con las de mayor producción de látex, puesto que existe menor pérdida de agua, penumbra, calma atmosférica y menor temperatura, favoreciendo una mejor hidratación de los tejidos y una presión interna mayor en los vasos laticíferos del árbol (SENA, 2006).

4. Metodología

4.1 Muestreo

El estudio se realizó en dos lotes (Lote 1: clon RRIM 660, Lote 2: clon FX 3864); en cada uno se implementó una malla de 80 puntos distanciados perpendicularmente a 12,6 m x 32,6 m (10 filas y 8 columnas). El sistema de siembra del caucho se realiza en surco doble a 3m x 2,5 m en triángulo, dejando entre 12 y 13 m entre cada surco doble para sembrar allí los cultivos asociados, de tal forma que se manejan 560 árboles por ha; pueden presentarse pérdidas durante los primeros 25 a 30 años de cultivo por diferentes adversidades (enfermedades, plagas, desarrollo y crecimiento de los árboles, entre otras), lográndose manejar alrededor de 500 árboles. Los muestreos de suelo se realizaron en plena época de lluvias, más exactamente en el cuarto (4) mes de las mismas (Julio de 2010); los árboles de caucho se encontraban en etapa de producción, aproximadamente en su séptimo (7) año. Se tomaron muestras de suelo, bajo el dosel del árbol de caucho, entre 0 y 20 cm de profundidad, en cuyo espesor se concentra la mayor cantidad de raíces adventicias del árbol de caucho, las cuales cumplen la función de toma de nutrientes; las muestras de suelo presentaron un peso aproximado de 1000 g cada una. La producción de látex se determinó con probeta de 100 ml (medición hecha 1,5 a 2 horas después del rayado, tiempo al cual se recoge el látex) y el perímetro de los árboles de caucho con flexómetro, a una altura de 1 metro de la superficie del suelo, medición también denominada como diámetro a la altura del pecho; para el tiempo del muestreo, se había realizado en los meses de Abril y Mayo la primera fertilización y aplicación de enmiendas.

4.2 Análisis de laboratorio

Los análisis químicos del suelo realizados fueron: pH con potenciómetro en una relación 1:2,5 suelo-agua; % MO por el método modificado de Walkley-Black volumétrico; acidez intercambiable (Ac.I.) KCl 1N, aluminio intercambiable (Al.I.) por valoración; contenidos de P disponible mediante el método Bray II; Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Na^{+} , por valoración mediante el método de extracción con Acetato de Amonio 1M a pH 7.0 (USDA, 2004), Capacidad de Intercambio Iónico Efectiva (CICE) por suma de bases valoradas mediante el método de extracción con Acetato de Amonio 1M a pH 7.0 (USDA, 2004), Conductividad Eléctrica (C.E.) por el método del conductímetro en extracto de saturación, porcentaje de Saturación de Bases (SB) y relaciones iónicas (Ca/Mg, Mg/K, Ca/K, Ca+Mg/K) calculadas.

Dentro de los análisis físicos se determinaron los contenidos de arcilla, limo y arena por el método de Bouyoucos (USDA, 2004), densidad aparente (Da) por el método del

cilindro, retención de humedad por el método de la olla a presión calculando la curva con seis puntos (0.1, 0.3, 1, 3, 5, 15), y porosidad total calculada en porcentaje, teniendo en cuenta la relación entre la densidad aparente y la densidad real. Las subvariables de la porosidad total se calcularon de la siguiente forma; (i) Macroporosidad (%): (porosidad total – humedad a capacidad de campo) / densidad aparente, (ii) Mesoporosidad (%): (humedad a capacidad de campo – humedad a punto de marchitez permanente) * densidad aparente, y (iii) Microporosidad (%): porosidad total – macroporosidad.

4.3 Estadística descriptiva, geoestadística y análisis multivariado

El estudio estadístico descriptivo y las pruebas de normalidad se realizaron mediante el programa estadístico SPSS Statistics, versión 19.0 (IBM, 2010), determinando media, mediana, coeficiente de variación (CV), mínimo, máximo, asimetría y curtosis; este tipo de metodología ha sido utilizada también por varios autores como Ortega y Santibáñez (2007), Camacho-Tamayo *et al.* (2008), Silva *et al.* (2008), Garzón *et al.* (2010), Motomiya *et al.* (2011), entre otros, quienes confirman que el uso de estas metodologías posibilitan la identificación y caracterización del comportamiento de las diversas propiedades y características del suelo, al igual que sus distintas interacciones existentes. Se realizó un análisis de varianza (Anova) con el propósito de determinar la existencia de diferencias estadísticas de las variables estudiadas entre los lotes evaluados, mediante el Test de Kruskal-Wallis ($P < 0,05$ y $P < 0,01$) usando el software estadístico SAS v. 8.1e (SAS Institute Inc., Cary, N.C). Se utilizó el Test de bondad de Kolmogorov-Smirnov para el análisis de normalidad ($P = 0,05$). Respecto al análisis del CV, se usó la clasificación de Pimentel-Gómez y García (2002).

Las correlaciones se realizaron mediante la prueba de correlación de Pearson, y se clasificaron de acuerdo a los rangos determinados por Bisquerra (2009), donde indica que $r = 1$ correlación perfecta, $0,8 < r < 1$ correlación muy alta, $0,6 < r < 0,8$ correlación alta, $0,4 < r < 0,6$ correlación moderada, $0,2 < r < 0,4$ correlación baja, $0 < r < 0,2$ correlación muy baja, y $r = 0$ correlación nula, determinando así la interacción entre las distintas variables estudiadas.

Se estableció la relación entre los parámetros productivos del caucho y las propiedades físicas y químicas del suelo mediante análisis multivariado (análisis de componentes principales y análisis de conglomerados), identificando los grupos donde se presentan semejanzas entre sí.

Para la realización de estos análisis, los datos fueron previamente estandarizados con media 0 y varianza 1. Se utilizó el algoritmo Ward y la distancia Euclidiana para la separación de los grupos, representando los resultados en forma de dendrograma, facilitando la identificación de los grupos resultantes de las variables analizadas (Camacho-Tamayo *et al.*, 2010; Giacomino *et al.*, 2011; Simfukwe *et al.*, 2011).

5. Resultados y discusión

5.1 Estadística descriptiva

Los resultados del Anova se ilustran en la Tabla 5-1, el cual permitió observar las diferencias estadísticas de las variables entre lotes evaluados. Se evidencian diferencias altamente significativas ($P < 0,01$) en las variables PL2 (Producción de Látex 2), pH, K, Mg/K, Ca/K, Ca+Mg/K, C.E., Macroporos, Mesoporos, Limo y Arcilla, presentando medias más altas en el lote 2 para las variables Macro y Microporos. Las variables Per (Perímetro del árbol), ADP (Agua Disponible para las Plantas), Microporos y Arena muestran diferencias a nivel de $P < 0,05$ entre lotes; las demás variables no presentan diferencias evidenciando la homogeneidad de los suelos en los dos lotes evaluados en cuanto a variables como acidez, fertilidad, limo y arcilla. Ello puede deberse a un mismo manejo y aplicación de fertilizantes y enmiendas, al igual que a la uniformidad o semejanza en el porcentaje granulométrico de partículas minerales del suelo.

Los elementos nutricionales en el suelo estudiado presentan contenidos bajos (Guerrero, 2004). Los resultados muestran una homogeneidad en la estimación de la tendencia central de los datos (media y mediana) de las variables, a pesar de la presencia de algunas distribuciones asimétricas; para Cambardella *et al.* (1994), esto puede ser indicativo de que las medidas de tendencia central, en su distribución, no están sujetas a valores atípicos. Lo anterior es análogo a lo expuesto por Ribeiro *et al.* (2007), quienes encontraron que para el tamaño de poros entre 0,03 y 0,0375 micras, los resultados fueron estadísticamente similares para todos los suelos; Cruz *et al.* (2010) mostraron que para atributos físicos del suelo y carbono orgánico, los valores de la media y la mediana fueron semejantes, al igual que la asimetría y la curtosis presentaron valores cercanos a cero, como indicativo de aproximación a una distribución normal; Abu y Malgwi (2011) mostraron que la media y mediana para la mayoría de los parámetros evaluados, era idénticas a pesar de la asimetría en su distribución, indicando homogeneidad en ella.

Se observa en las Tablas 5-2 y 5-3 que el CV (Coeficiente de Variación) para las variables analizadas en ambos lotes presentan variabilidad baja, media, alta y muy alta (Pimentel-Gómez y García, 2002), presentándose baja variabilidad en la mayoría de las propiedades físicas en contraste con los químicos, donde solamente el pH presenta un CV bajo, al igual que el parámetro Per. Sun *et al.* (2003) documentaron que el P disponible mostró alto CV, mientras el pH del suelo presentó un CV bajo, al igual que se presenta en éste estudio. Sales Rodrigues *et al.* (2012) reportan un CV bajo para pH, CV medio para contenidos de materia orgánica y CV alto para los contenidos de P, Ca, Mg, K, suma de bases y CIC en un suelo clasificado como Rhodic Hapludox; afirman que el alto valor de los CV de las propiedades químicas del suelo se debe, probablemente, por

efectos residuales de fertilizaciones anteriores. Cambardella *et al.* (1994) resaltan que continuas aplicaciones de fertilizantes pueden cambiar la continuidad espacial de las propiedades químicas del suelo.

Tabla 5-1: ANOVA no paramétrica resultante del análisis de los parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y de las propiedades químicas y físicas del suelo analizado.

| VARIABLE | LOTE 1: CLON RRIM 600 (MEDIA) | LOTE 2: CLON FX 3864 (MEDIA) | Nivel de Significancia |
|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Per (cm) | 59,58 | 61,92 | * |
| PL 1 (ml) | 205,06 | 179,31 | ns |
| PL 2 (ml) | 297,2 | 210,4 | ** |
| PL 3 (ml) | 114,61 | 101,23 | ns |
| pH | 4,79 | 4,70 | ** |
| MO (%) | 2,73 | 2,8 | ns |
| P (mg·kg ⁻¹) | 3,61 | 3,64 | ns |
| Ac.I. (cmol· kg ⁻¹) | 1,64 | 1,76 | * |
| Al. I. (cmol· kg ⁻¹) | 1,4 | 1,44 | ns |
| Ca (cmol· kg ⁻¹) | 0,41 | 0,38 | ns |
| Mg (cmol· kg ⁻¹) | 0,12 | 0,12 | ns |
| K (cmol· kg ⁻¹) | 0,07 | 0,05 | ** |
| Na (cmol· kg ⁻¹) | 0,07 | 0,07 | * |
| Ca/Mg | 3,25 | 3,20 | ns |
| Mg/K | 1,76 | 2,34 | ** |
| Ca/K | 6,11 | 7,14 | ** |
| (Ca+Mg/K) | 7,70 | 9,55 | ** |
| C.E. (dS·m ⁻¹) | 0,06 | 0,06 | ** |
| SB (%) | 29,15 | 26,79 | ns |
| CICE (cmol·kg ⁻¹) | 2,33 | 2,39 | ns |
| ADP (%) | 3,91 | 4,56 | * |
| Arena (%) | 72,55 | 72,6 | * |
| Limo (%) | 14,02 | 12,8 | ** |
| Arcilla (%) | 14,4 | 14,85 | ** |
| Da (g·cm ⁻³) | 1,41 | 1,4 | Ns |
| Macroporos (%) | 5,41 | 4,18 | ** |
| Mesoporos (%) | 7,4 | 9,1 | ** |
| Microporos (%) | 37,15 | 39,45 | * |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, MO: Materia Orgánica, Ac.I.: Acidez Intercambiable, Al.I.: Aluminio Intercambiable, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, ADP: % Agua Disponible para las plantas, Da: Densidad aparente. Nivel de presenta diferencias significativas.

Tabla 5-2: Estadística descriptiva para parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y para las propiedades químicas y físicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | MEDIA | MEDIANA | CV | MÍNIMO | MÁXIMO | ASIMETRÍA | CURTOSIS | K - S |
|---------------------------------|--------|---------|-------|--------|--------|-----------|----------|-------|
| LOTE 1: CLON RRIM 600 | | | | | | | | |
| Per (cm) | 59,58 | 59,88 | 8,73 | 48,17 | 72,33 | 0,11 | -0,16 | N |
| PL 1 (ml) | 205,06 | 200 | 38,56 | 50 | 400 | 0,33 | -0,39 | N |
| PL 2 (ml) | 297,2 | 312,5 | 34,11 | 50 | 560 | -0,03 | -0,17 | N |
| PL 3 (ml) | 114,61 | 115 | 59,15 | 10 | 260 | 0,3 | -0,86 | N |
| pH | 4,79 | 4,79 | 2,01 | 4,53 | 5,04 | 0,15 | 0,36 | N |
| MO (%) | 2,73 | 2,75 | 11,60 | 1,92 | 3,43 | -0,08 | -0,07 | N |
| P (mg·kg ⁻¹) | 3,61 | 3,47 | 27,07 | 2,02 | 6,26 | 0,69 | -0,17 | N |
| Ac.l. (cmol·kg ⁻¹) | 1,64 | 1,64 | 17,10 | 1,03 | 2,34 | 0,06 | -0,35 | N |
| Al. l. (cmol·kg ⁻¹) | 1,4 | 1,4 | 21,83 | 0,71 | 2,12 | -0,11 | -0,68 | NoN |
| Ca (cmol·kg ⁻¹) | 0,41 | 0,39 | 38,9 | 0,2 | 0,82 | 0,8 | -0,1 | NoN |
| Mg (cmol·kg ⁻¹) | 0,12 | 0,12 | 23,49 | 0,07 | 0,2 | 0,61 | -0,37 | NoN |
| K (cmol·kg ⁻¹) | 0,07 | 0,07 | 25,41 | 0,04 | 0,11 | 0,32 | -0,81 | N |
| Na (cmol·kg ⁻¹) | 0,07 | 0,06 | 23,75 | 0,04 | 0,11 | 0,36 | -0,94 | NoN |
| Ca/Mg | 3,25 | 2,98 | 24,89 | 1,87 | 5,19 | 0,52 | -0,76 | NoN |
| Mg/K | 1,76 | 1,78 | 15,12 | 1,15 | 2,41 | -0,13 | -0,29 | N |
| Ca/K | 6,11 | 5,6 | 32,03 | 2,58 | 11,01 | 0,52 | -0,25 | NoN |
| (Ca+Mg/K) | 7,70 | 7,25 | 25,28 | 3,72 | 12,74 | 0,47 | -0,20 | NoN |
| C.E. (dS·m ⁻¹) | 0,06 | 0,06 | 16,23 | 0,04 | 0,09 | 0,13 | -0,3 | N |
| SB (%) | 29,15 | 28,41 | 28,24 | 16,22 | 48,14 | 0,44 | -0,76 | NoN |
| CICE (cmol·kg ⁻¹) | 2,33 | 2,28 | 12,13 | 1,64 | 3,06 | 0,23 | 0,03 | N |
| ADP (%) | 3,91 | 3,81 | 36,65 | 1,6 | 7,42 | 0,74 | -0,09 | N |
| Arena (%) | 72,55 | 72,48 | 2,92 | 67 | 76 | -0,6 | 0,07 | N |
| Limo (%) | 14,02 | 14 | 12,98 | 10 | 18,27 | 0,09 | -0,42 | N |
| Arcilla (%) | 14,4 | 14,25 | 8,49 | 12,25 | 17,52 | 0,6 | 0,11 | N |
| Da (g·cm ⁻³) | 1,41 | 1,42 | 5,36 | 1,20 | 1,6 | -0,11 | 0,07 | N |
| Macroporos (%) | 5,41 | 5,06 | 33,16 | 1,88 | 10,32 | 0,49 | -0,17 | NoN |
| Mesoporos (%) | 7,4 | 7,3 | 28,7 | 3,37 | 12,11 | 0,32 | -0,2 | N |
| Microporos (%) | 37,15 | 37,5 | 10,7 | 28,81 | 44,61 | -0,19 | -0,71 | N |

Tabla 5-2. Continuación...

| | LOTE 2: CLON FX 3864 | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Per (cm) | 61,92 | 61,88 | 9,72 | 48,38 | 77,5 | 0,1 | -0,14 | N |
| PL 1 (ml) | 179,31 | 172,5 | 30,67 | 50 | 305 | 0,3 | -0,0 | N |
| PL 2 (ml) | 210,4 | 200 | 31,57 | 50 | 365 | 0,39 | -0,02 | NoN |
| PL 3 (ml) | 101,23 | 100 | 41,89 | 10 | 185 | -0,1 | -0,71 | N |
| pH | 4,70 | 4,70 | 2,78 | 4,36 | 5,01 | -0,17 | -0,15 | N |
| MO (%) | 2,8 | 2,86 | 11,91 | 1,95 | 3,61 | -0,4 | 0,10 | N |
| P (mg·kg ⁻¹) | 3,64 | 3,62 | 23,05 | 2,00 | 5,67 | 0,28 | -0,3 | N |
| Ac.I. (cmol·kg ⁻¹) | 1,76 | 1,73 | 15,31 | 1,15 | 2,40 | 0,29 | -0,34 | N |
| Al. I. (cmol·kg ⁻¹) | 1,44 | 1,39 | 17,22 | 0,91 | 2,06 | 0,29 | -0,47 | N |
| Ca (cmol·kg ⁻¹) | 0,38 | 0,35 | 28,88 | 0,22 | 0,69 | 0,85 | -0,14 | NoN |
| Mg (cmol·kg ⁻¹) | 0,12 | 0,11 | 10,81 | 0,09 | 0,14 | 0,55 | -0,05 | N |
| K (cmol·kg ⁻¹) | 0,05 | 0,05 | 24,81 | 0,03 | 0,08 | -0,27 | -1,11 | NoN |
| Na (cmol·kg ⁻¹) | 0,07 | 0,07 | 11,68 | 0,05 | 0,09 | 0,45 | -0,61 | N |
| Ca/Mg | 3,20 | 3,04 | 23,43 | 2,02 | 5,02 | 0,67 | -0,38 | NoN |
| Mg/K | 2,34 | 2,21 | 29,52 | 1,31 | 3,86 | 0,62 | -0,71 | NoN |
| Ca/K | 7,14 | 6,82 | 31,28 | 3,48 | 11,9 | 0,30 | -0,91 | NoN |
| (Ca+Mg/K) | 9,55 | 9,12 | 29,50 | 4,87 | 16,17 | 0,39 | -0,73 | NoN |
| C.E. (dS·m ⁻¹) | 0,06 | 0,053 | 18,44 | 0,03 | 0,08 | 0,32 | -0,27 | N |
| SB (%) | 26,79 | 25,76 | 21,50 | 15,52 | 41,23 | 0,61 | -0,25 | NoN |
| CICE (cmol·kg ⁻¹) | 2,39 | 2,35 | 10,87 | 1,8 | 3,05 | 0,28 | -0,17 | N |
| ADP (%) | 4,56 | 4,64 | 39,84 | 1,81 | 8,52 | 0,19 | -1,23 | NoN |
| Arena (%) | 72,6 | 72,5 | 2,2 | 69,5 | 75,8 | -0,03 | -0,15 | N |
| Limo (%) | 12,8 | 13 | 13,7 | 8,73 | 17,27 | -0,07 | -0,22 | N |
| Arcilla (%) | 14,85 | 14,52 | 9,23 | 11,25 | 18,25 | 0,32 | -0,04 | N |
| Da (g·cm ⁻³) | 1,4 | 1,4 | 5,3 | 1,24 | 1,55 | -0,1 | -0,41 | N |
| Macroporos (%) | 4,18 | 3,78 | 50,6 | 0,25 | 10,63 | 0,36 | -0,36 | NoN |
| Mesoporos (%) | 9,1 | 9,14 | 24,92 | 4,23 | 14,7 | 0,22 | -0,32 | N |
| Microporos (%) | 39,45 | 39,63 | 6,6 | 32,1 | 44,55 | -0,47 | 0,24 | N |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, MO: Materia Orgánica, Ac.I.: Acidez Intercambiable, Al.I.: Aluminio Intercambiable, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, ADP: % Agua Disponible para las plantas, Da: Densidad aparente. CV: Coeficiente de Variación, K-S: Test de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov (P=0,05), N: Normal, NoN: No Normal.

Dentro de los parámetros productivos analizados, para el caso del perímetro, el lote 2 (Clon FX 3864) evidencia valores más altos contrastados con el lote 1 (Clon RRIM 600). Martínez y García (2006b) en la Orinoquía y Norte Amazónico muestran como los clones de origen brasileño (FX 3864) presentan mayor tasa de crecimiento en cuanto al perímetro, en condiciones propias de éstas regiones.

En el caso de las producciones de látex, el lote 1 mostró valores más altos respecto al lote 2; para Melo *et al.* (2004) los mayores valores de producción de látex se evidencian en los meses de mayor pluviometría, tal como se presenta en éste estudio; en clones de origen asiático, las características genéticas propias, han posibilitado la obtención de mayor cantidad de látex, como sucede aquí para el caso del clon RRIM 600, tal como lo afirman SENA (2006), Quarteroli Silva *et al.* (2012) y Amortegui Ferro (2001). Éstos autores indican además que en el caso de clones de origen brasileño (Clon FX 3864), éstos poseen mayor tolerancia a enfermedades (comportamiento sanitario), lo cual es fundamental para su propagación comercial.

Bataglia (1987), clasifica la planta de caucho como planta originaria de suelos químicamente pobres, pero con características físicas buenas, que mediante el uso de fertilizantes, logra buen desarrollo y producción, lo cual ha posibilitado su manejo y obtención de productividad en zonas como la estudiada.

Las aplicaciones de enmiendas para reducir la acidez del suelo, disminuye la concentración de Al^{+3} del suelo y aumenta la disponibilidad de nutrientes junto con la microbiota del suelo (Roque *et al.*, 2004); de ello resultará una adecuada nutrición de la planta, mayor crecimiento radicular y de la parte aérea, y consecuentemente, mayor producción (Prado y Natale, 2008). Es así como un previo encalado al suelo, además de proporcionar aumento en el pH y saturación por bases, promueve la neutralización tanto del aluminio como en gran parte del hierro y manganeso, aumentando la actividad y eficiencia de los fertilizantes, disminuyendo la fijación del P, además de favorecer el desarrollo de las plantas (Viviani *et al.*, 2010). En cuanto al Per, los resultados concuerdan con lo encontrado en la granja Paraguaicito (Quindío-región Cafetera), donde los árboles del clon FX 3864 alcanzaron un perímetro medio de 45,1 cm a los seis años de edad (SENA, 2006).

Se presenta mayor pH (4,79) en el lote 1; el lote 2 presenta valores más altos en cuanto a MO, Ac.I. y Al.I.; la mayor cantidad de MO puede ser consecuencia de una presencia mayor y acumulación de residuos de defoliación u hojarasca en dicho lote, respecto al lote 1, los cuales quedan in situ desarrollando un proceso de descomposición, proporcionando iones de origen ácido al suelo, ya que como indican Camacho-Tamayo *et al.*, (2008) en estos suelos las labores de labranza son menores.

Para el caso del P, su concentración fue mayor en el lote 2, aunque no se presentan diferencias significativas entre ambos lotes. Los suelos de las regiones tropicales, en especial los más intemperizados, presentan contenidos bajos de P disponible para las plantas, lo que exige una apropiada corrección de ésta deficiencia para volverlos más productivos (Viviani *et al.*, 2010).

Las bases Ca^{+2} , Mg^{+2} , y K^{+} , al igual que la SB, presentan valores superiores en el lote 1; las relaciones iónicas (Mg/K, Ca/K, Ca+Mg/K), el Na^{+} y la C.E., presentaron diferencias

significativas los dos lotes, exceptuando la relación Ca/Mg la cual evidencia valores similares. Al analizar las relaciones iónicas se constata la deficiencia de bases en éste suelo, aunque se observe en la relación Ca/Mg valores dentro del rango ideal (3,0-5,0). La C.E., permite conocer la concentración de sales solubles en el suelo, y está directamente relacionada con el sodio presente en el mismo (Castro, 1998); para Adhikari *et al.*, (2011) la conductividad eléctrica (parámetro químico esencial) describe la salinidad del suelo y las sales solubles, y puede ser usada para determinar la calidad del mismo. Al-Omran *et al.*, (2004) encontraron que los datos de la C.E. presentan una asimetría positiva (valor bajo en relación a su media y mediana), confirmando que el CV alto de ésta propiedad es común, debido a una mayor distribución espacial de ésta variable. La CICE presenta mayor valor en el lote 2, debido a mayor cantidad de cationes intercambiables en ésta zona, debido posiblemente a mayores cantidades y/o aplicaciones de Cal Dolomita o Yeso, como se realiza actualmente. Elementos nutricionales como Ca^{+2} y Mg^{+2} proporcionan crecimientos significativos en el desarrollo del perímetro del tallo y en la producción de látex (Bolton y Shorrocks, 1961).

La curtosis fue negativa (rangos de -0,02 a -1,11) para la mayoría de las variables evaluadas, aunque fue positiva (valores de 0,03 a 0,36) para las propiedades químicas pH y CICE en el lote 1, MO en el lote 2, y para las propiedades físicas Arena, Arcilla y Da en el lote 1; en sí, los valores se presentaron muy cercanos a cero, demostrando su aproximación a una distribución normal, lo cual es indicativo de que los datos son adecuados y propicios para su uso en geoestadística. Los anteriores resultados son contrastantes respecto a estudios realizados por Iqbal *et al.* (2005), Abu y Malgwi (2011) y Sharma *et al.* (2011).

La prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov arrojó una distribución normal de los datos para la mayoría de variables analizadas; las variables Al.l., Mg^{+2} , Na^{+} en el lote 1, PL2, K^{+} , Mg/K y ADP en el lote 2 (Tabla 5-2 y 5-3), y además, Ca^{+2} , Ca/Mg, Ca/K, Ca+Mg/K, SB y Macroporos en ambos lotes, no se ajustaron a la distribución normal, debido a la variación de los valores encontrados en los puntos muestreados, variación debida posiblemente a presencia de mayor cantidad de datos atípicos obtenidos en cada una de éstas variables; para las variables químicas, puede ser además resultado de la aplicación no uniforme del fertilizante (Silva *et al.*, 2003).

Se encontró CV muy alto tanto para las producciones de látex como para la relación iónica Ca/K, ADP y Macroporos en ambos lotes, y Ca^{+2} en el lote 1, el cual es indicador de mayor heterogeneidad en los valores de las variables analizadas. Los demás parámetros y propiedades presentaron variabilidad baja, media y alta, los cuales fueron resultados similares a los expuestos por Yasrebi *et al.* (2008), Peña *et al.* (2009) y Sharma *et al.* (2011).

Los resultados para las propiedades químicas se atribuyen, en cierta forma o en dado caso, a la aplicación de fertilizantes al suelo; cabe anotar que los residuos de defoliación, el material parental del suelo, el tipo de clon, la presencia de gramíneas y leguminosas, al igual que la actividad biológica del suelo, son factores que explicaría la variabilidad encontrada. Oliveira *et al.* (2009) indican además que el comportamiento de los cationes en general es típico de suelos que están bajo una producción agrícola. Los CV bajos presentados para la Da y Microporosidad, al igual que CV moderado para Limo, demuestran como los valores de las variables analizadas presentan mayor homogeneidad; resultados análogos fueron reportados por Ramírez-López *et al.* (2008),

Martins *et al.* (2010) y Cucunubá-Melo *et al.* (2011). Al encontrarse el suelo con contenidos bajos en elementos nutrientes, factores como el material parental, la vegetación, manejo del suelo, historial de cultivos (Cox *et al.* 2003), el clima, las propiedades físicas del suelo y la extracción de nutrientes por parte del cultivo son causa de una mayor heterogeneidad espacial en el suelo, contribuyendo así a una baja disponibilidad de nutrientes. Por lo tanto, la información espacial del estado de los nutrientes en el suelo debe caracterizarse en primera instancia, antes de hacer recomendaciones de fertilizantes (Yasrebi *et al.*, 2008), con el fin de satisfacer las necesidades del suelo y del cultivo.

5.2 Análisis geoestadístico

No se aprecia un modelo único de semivariograma para las propiedades analizadas (Tabla 5-3). Las variables perímetro de árbol (Per) en el clon RRIM 600, Ca^{+2} del suelo en el lote 2, y producción de látex 2 (PL2) de ambos clones, presentan efecto pepita (EP), indicativo de discontinuidad entre muestras, significando una variabilidad espacial no detectada durante el muestreo, aunque en muchas oportunidades corresponde a que la estructura espacial de la variable se agrupa a distancias menores a las analizadas. Éste modelo se presenta en fenómenos que no exhiben ninguna autocorrelación espacial (Montanari *et al.*, 2008; García Bustamante, 2009; Hurtado *et al.*, 2009; Cruz *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2011).

Los modelos de semivariograma más comunes para el lote 1 es el modelo gaussiano y esférico para propiedades químicas, y esférico para propiedades físicas; para el lote 2 los modelos esférico, exponencial y gaussiano. Las variables que se ajustan al modelo esférico y el exponencial, al igual que al gaussiano, cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte, queriendo explicar que las medias de las variables son constantes en todos los puntos del área de estudio o que su función de distribución conjunta es invariante respecto a cualquier translación de su distancia, dado que estos modelos son acotados. Hurtado *et al.* (2009) confirman que éstos son los modelos de semivariograma que más se ajustan a las propiedades del suelo, siendo el esférico el de mayor ocurrencia (Silva *et al.*, 2007; Souza *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2011; Duffera *et al.*, 2007; Amaro Filho *et al.*, 2007; Ramírez-López *et al.*, 2008; Rodríguez-Vásquez *et al.*, 2008; Abu y Malgwi, 2011; Millán *et al.*, 2012).

Según plantean Santra *et al.* (2008) en su estudio sobre propiedades físicas, el modelo gaussiano se ajusta bien como semivariograma experimental para variables como la densidad aparente, limo y arcilla. De acuerdo a éstos modelos se evidencia que las variables estudiadas del suelo presentan estructura de dependencia espacial, conforme lo demuestra los semivariogramas obtenidos, como indican Oliveira *et al.* (2009).

Tabla 5-3. Modelos ajustados de semivariogramas para los parámetros productivos de los Clones RRIM 600 y FX 3864, y para las propiedades químicas y físicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | MODELO | Co | Co+C | A, m | C/Co+C | R ² | CVC |
|-----------------------|-------------|----------|--------|--------|--------|----------------|-------|
| LOTE 1: CLON RRIM 600 | | | | | | | |
| Per | EP | 25,28 | 25,28 | | | | |
| PL 1 | Exponencial | 720 | 5600 | 107,7 | 0,87 | 0,7 | 1,002 |
| PL 2 | EP | 450 | 8313 | | | | |
| PL 3 | Exponencial | 630 | 4638 | 113,1 | 0,86 | 0,73 | 0,84 |
| pH | Esférico | 0,005 | 0,011 | 260,8 | 0,54 | 0,87 | 0,89 |
| MO | Esférico | 0,027 | 0,11 | 283,2 | 0,8 | 0,97 | 0,99 |
| P | Exponencial | 0,59 | 1,3 | 585,6 | 0,55 | 0,86 | 0,87 |
| Ac.l. | Esférico | 0,019 | 0,09 | 208 | 0,8 | 0,9 | 0,94 |
| Al. l. | Esférico | 0,014 | 0,11 | 234,1 | 0,9 | 0,97 | 0,89 |
| Ca | Gaussiano | 0,016 | 0,034 | 318,88 | 0,52 | 0,97 | 0,97 |
| Mg | Gaussiano | 0,0004 | 0,0013 | 284,58 | 0,72 | 0,99 | 1,06 |
| K | Gaussiano | 0,0001 | 0,0005 | 212,52 | 0,76 | 0,99 | 0,96 |
| Na | Gaussiano | 0,0001 | 0,0006 | 316,97 | 0,81 | 0,99 | 1,01 |
| Ca/Mg | Esférico | 0,001 | 0,662 | 49,2 | 0,99 | 0,71 | 0,74 |
| Mg/K | Gaussiano | 0,01 | 0,069 | 37,76 | 0,85 | 0,21 | 1,08 |
| Ca/K | Esférico | 0,22 | 3,91 | 38,8 | 0,94 | 0,36 | 0,27 |
| (Ca+Mg/K) | Esférico | 0,06 | 3,92 | 53,8 | 0,99 | 0,6 | 0,25 |
| C.E. | Gaussiano | 0,000072 | 0,0003 | 705,64 | 0,75 | 0,9 | 0,86 |
| SB | Gaussiano | 27,3 | 92,32 | 270,02 | 0,7 | 0,97 | 1,01 |
| CICE | Esférico | 0,015 | 0,084 | 251,4 | 0,82 | 0,99 | 0,9 |
| ADP | Exponencial | 1,53 | 3,72 | 2132,7 | 0,59 | 0,78 | 1,05 |
| Arena | Exponencial | 0,53 | 6,5 | 140,7 | 0,92 | 0,96 | 0,92 |
| Limo | Exponencial | 0,2 | 3,47 | 57,9 | 0,94 | 0,61 | 0,91 |
| Arcilla | Gaussiano | 0,1 | 1,4 | 50,75 | 0,93 | 0,95 | 0,75 |
| Da | Esférico | 0,002 | 0,005 | 214,4 | 0,52 | 0,97 | 0,87 |
| Macroporos | Esférico | 0,71 | 2,48 | 163,2 | 0,71 | 0,7 | 0,97 |
| Mesoporos | Esférico | 2,16 | 4,4 | 118,5 | 0,51 | 0,73 | 0,92 |
| Microporos | Esférico | 3,62 | 18,1 | 175,3 | 0,8 | 0,95 | 0,98 |

Tabla 5-3. Continuación...

| | | LOTE 2: CLON FX 3864 | | | | | |
|------------|-------------|----------------------|--------|--------|------|------|-------|
| Per | Esférico | 0,01 | 28,9 | 57 | 1 | 0,69 | 0,77 |
| PL 1 | Esférico | 122 | 2751 | 46,3 | 0,96 | 0,7 | 0,76 |
| PL 2 | EP | 180 | 4438 | | | | |
| PL 3 | Exponencial | 848 | 1697 | 126,9 | 0,5 | 0,5 | 0,77 |
| pH | Exponencial | 0,005 | 0,02 | 267,3 | 0,73 | 0,87 | 1,18 |
| MO | Exponencial | 0,009 | 0,12 | 107,1 | 0,93 | 0,9 | 0,99 |
| P | Esférico | 0,364 | 0,73 | 141,2 | 0,5 | 0,66 | 0,9 |
| Ac.I. | Exponencial | 0,02 | 0,07 | 300,6 | 0,78 | 0,95 | 0,95 |
| Al. I. | Gaussiano | 0,038 | 0,37 | 1017,8 | 0,9 | 0,91 | 0,95 |
| Ca | EP | 0,00008 | 0,01 | | | | |
| Mg | Exponencial | 0,00001 | 0,0001 | 72 | 0,9 | 0,59 | 0,64 |
| K | Gaussiano | 0,00008 | 0,0003 | 294,1 | 0,72 | 0,97 | 0,99 |
| Na | Gaussiano | 0,00003 | 0,0004 | 1037,2 | 0,92 | 0,96 | 0,84 |
| Ca/Mg | Esférico | 0,01 | 0,39 | 43,8 | 0,98 | 0,46 | -0,19 |
| Mg/K | Esférico | 0,001 | 0,7 | 263 | 0,99 | 0,97 | 1,02 |
| Ca/K | Esférico | 1,78 | 5,881 | 202 | 0,69 | 0,92 | 0,92 |
| (Ca+Mg/K) | Esférico | 2,85 | 10,29 | 262,7 | 0,72 | 0,95 | 0,93 |
| C.E. | Exponencial | 0,0007 | 0,0002 | 566,7 | 0,72 | 0,96 | 0,97 |
| SB | Exponencial | 10,39 | 28,64 | 207,30 | 0,64 | 0,83 | 0,78 |
| CICE | Esférico | 0,02 | 0,065 | 186,5 | 0,72 | 0,91 | 1,01 |
| ADP | Esférico | 0,06 | 2,84 | 75,8 | 0,98 | 0,43 | 0,91 |
| Arena | Esférico | 1,71 | 4,65 | 710,9 | 0,63 | 0,56 | 0,81 |
| Limo | Esférico | 1,1 | 2,77 | 145,2 | 0,62 | 0,87 | 0,94 |
| Arcilla | Gaussiano | 0,23 | 1,65 | 40,36 | 0,86 | 0,54 | 0,72 |
| Da | Gaussiano | 0,003 | 0,035 | 902,9 | 0,93 | 0,98 | 1,04 |
| Macroporos | Gaussiano | 0,51 | 3,91 | 84,35 | 0,87 | 0,67 | 0,87 |
| Mesoporos | Esférico | 0,64 | 5,03 | 74,5 | 0,87 | 0,44 | 0,84 |
| Microporos | Gaussiano | 3,36 | 6,72 | 219,8 | 0,5 | 0,92 | 1,01 |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva, ADP: % Agua Disponible para las plantas, Da: Densidad aparente, EP: Efecto Pepita Puro, CVC: Coeficiente de Validación Cruzada.

El alcance ó rango (A, en m) sobrepasó la distancia mínima de muestreo utilizada (32,6 m), indicando que la distancia a partir de la cual dos muestras de una variable son independientes es una distancia mayor a la obtenida para el caso del suelo bajo el cultivo de caucho (Tabla 5-3); cuanto menor sea el rango, más rápido se obtiene la independencia entre las muestras, ya que el rango es el límite de distancia de la dependencia espacial (Silva *et al.*, 2007). Las propiedades químicas Al.I., Na, C.E. y

propiedades físicas arena y Da, en el lote 2, presentaron valores mayores por fuera del rango de muestreo (distancia máxima 330m), mostrando que no existe una distancia finita para la cual dos muestras sean independientes, como se mencionó anteriormente; en éstos casos se habla de rango efectivo, denominado como la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta. En el lote 1 se evidenció éste fenómeno en el contenido de P disponible, C.E. y ADP.

Según Cruz *et al.* (2010), el alcance o rango ofrece una información valiosa para la planificación y evaluación experimental, además de brindar información acerca de la génesis y evolución de los suelos en el paisaje y los límites de las clases taxonómicas de los mismos. Asimismo, Yasrebi *et al.*, (2008) indican que el conocimiento del rango de influencia de las diferentes propiedades del suelo brinda la opción de construir un conjunto de datos independientes al desarrollar un análisis estadístico clásico; ayuda también a determinar sitios necesarios de muestrear y a diseñar experimentos de campo en futuras investigaciones, evitando así la dependencia espacial, aunque reportaron grandes diferencias entre los rangos o alcances de las variables del suelo estudiadas.

Tanto para los parámetros productivos del caucho como para las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas se presentó GDE (Grado de Dependencia Espacial) fuerte y moderado, exceptuando las variables Per y PL2 en el lote 1, y, PL2 y Ca en el lote 2, las cuales presentaron Efecto Pepita Puro (Tablas 5-3). Las variables químicas Ca^{+2} , Mg^{+2} , SB, en el lote 1, al igual que PL3, K^+ , Ca/K, Ca+Mg/K, C.E., SB, CICE en el lote 2, y, pH y P en ambos lotes, exhibieron un GDE moderado, pero con mayores alcances; similares resultados fueron obtenidos por Moreira da Silva *et al.* (2008). En cuanto a propiedades físicas, arena, limo, microporos en el lote 1, ADP, Da, macroporos, mesoporos en el lote 2, y arcilla en ambos lotes, presentan GDE fuerte, evidenciándose resultados similares por Cruz *et al.* (2010) y Cucunubá-Melo *et al.* (2011), al igual que para Abu y Malgwi (2011) en relación a los contenidos de arena, limo y arcilla.

Respecto a lo anterior, Cambardella *et al.* (1994) y Yasrebi *et al.* (2008), indican que la dependencia espacial fuerte de las propiedades del suelo (químicas y físicas) es atribuida a factores intrínsecos del mismo (material parental, relieve, clima, organismos, tiempo), mientras que una dependencia espacial débil se puede atribuir a factores extrínsecos (fertilización, preparación del suelos, encalado, tráfico de maquinaria agrícola, entre otros).

Los R^2 y CVC más altos se presentan en el lote 1. Los modelos ajustados a los semivariogramas reportan coeficientes de determinación por encima de 0,50, lo que confiere adecuada interpolación por kriging, asegurando una buena representación de los datos encontrados (Villatoro *et al.*, 2008; Rodríguez-Vásquez *et al.*, 2008; Faraco *et al.*, 2008; Cucunubá-Melo *et al.*, 2011), exceptuando las relaciones iónicas Ca/K, Ca+Mg/K en el lote 1, y Ca/Mg en el lote 2 encontradas en éste estudio.

5.3 Análisis de datos composicionales

Este análisis se efectuó para dos grupos de propiedades: Porosidad (macroporos, mesoporos y microporos) y textura (arena, limo y arcilla). Se obtuvo un diagrama AFM (Figura 5-1) donde se puede observar la ubicación de los datos adquiridos para cada variable en cada clon evaluado. Se analizó la relación entre componentes, entre muestras y entre ambas, para cada grupo, empleando como herramienta exploratoria los gráficos de dos dimensiones (*biplot*) (Figura 5-2) de datos composicionales (Aitchison y Greenacre, 2002). Éstos gráficos son resultado de la implementación de la transformación log-cociente centrada (*clr*) de los datos y cálculo de la matriz T de varianza-covarianza.

En la Figura 5-1 se observa tanto en el lote 1 como en el lote 2, que son los microporos del suelo los que presentan un porcentaje mayor respecto de los demás poros y como esta subvariable predomina en la porosidad total del mismo. Se presenta mayor cantidad de mesoporos en el lote 2, que permiten una mayor cantidad de retención o mayor disponibilidad de agua en el suelo para el clon FX 3864. En cuanto a la textura el tamaño de partículas tipo arena es la predominante en el suelo estudiado.

En los gráficos *biplot* (Figura 5-2), se representa la distribución de los datos transformados y sus diferentes correlaciones, donde la nube de variables se entiende como un conjunto de flechas que parten desde el origen y poseen una longitud igual a la desviación estándar de la variable o representan la varianza de los log-cocientes simples. El ángulo resultante entre cada flecha representa la correlación existente entre dos variables. Cuando los ángulos son pequeños se presenta una alta correlación positiva; ángulos cercanos a 90° carencia de correlación y ángulos cercanos a 180° advierten una alta correlación negativa (Pardo y Cabarcas, 2001; Egozcue *et al.*, 2011).

Se resalta una mayor agrupación de los datos en la porosidad total del suelo para el caso del lote 2 (Clon FX 3864); se observa mayor correlación en el lote 2 entre el log-cociente de los microporos con el log-cociente de los mesoporos, para el caso de la porosidad total, mientras que para la textura el log-cociente de la arcilla se correlaciona más con el log-cociente de la arena. Para ambos lotes, impera una carencia de correlación o correlaciones negativas entre los log-cocientes de las variables analizadas.

Figura 5-1. Distribución y ubicación de los datos de las propiedades físicas del suelo obtenidos en diagramas AFM para el lote 1 y para el lote 2. (A, B): clon RRIM 600, (C, D): clon FX 3864.

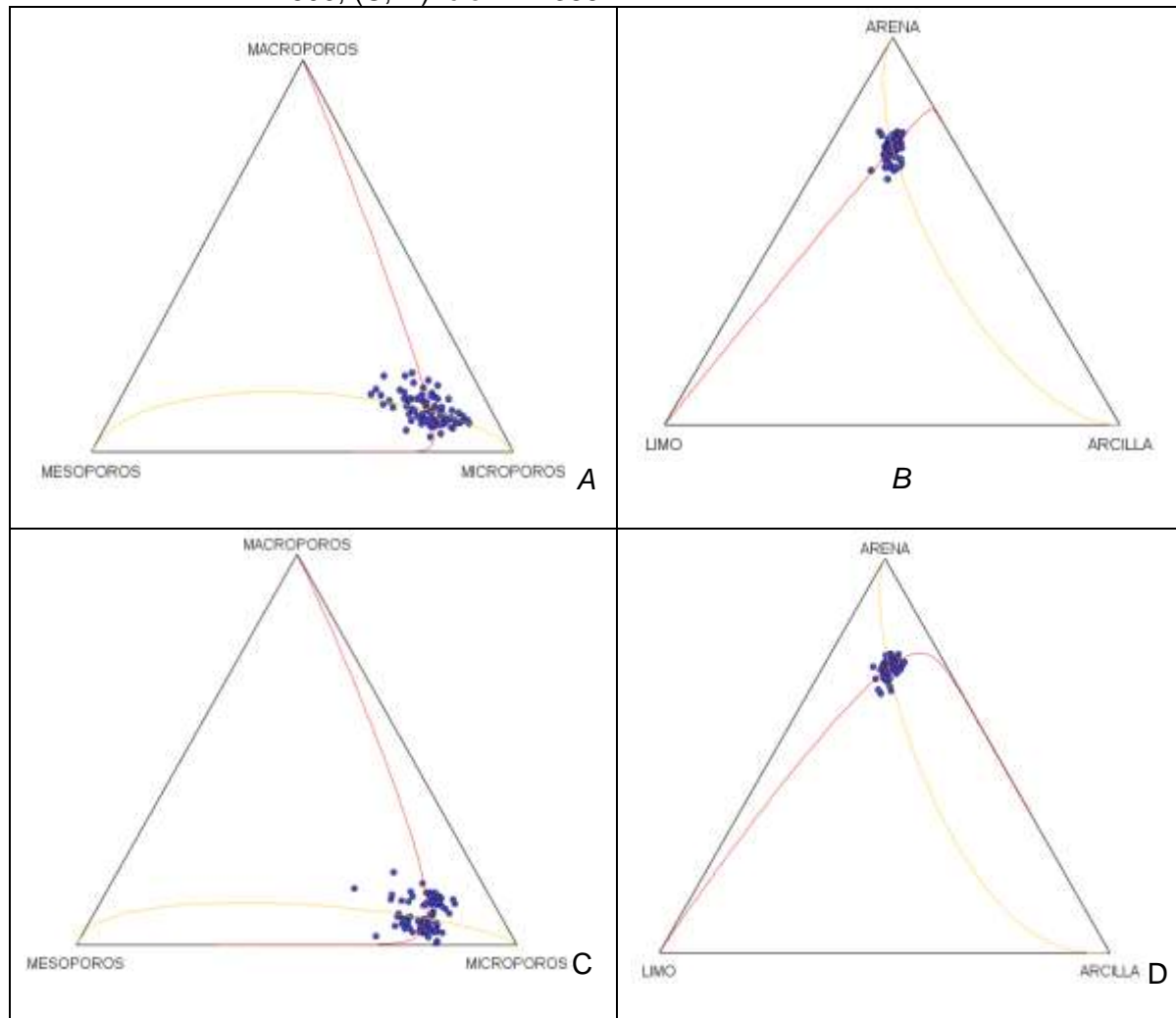
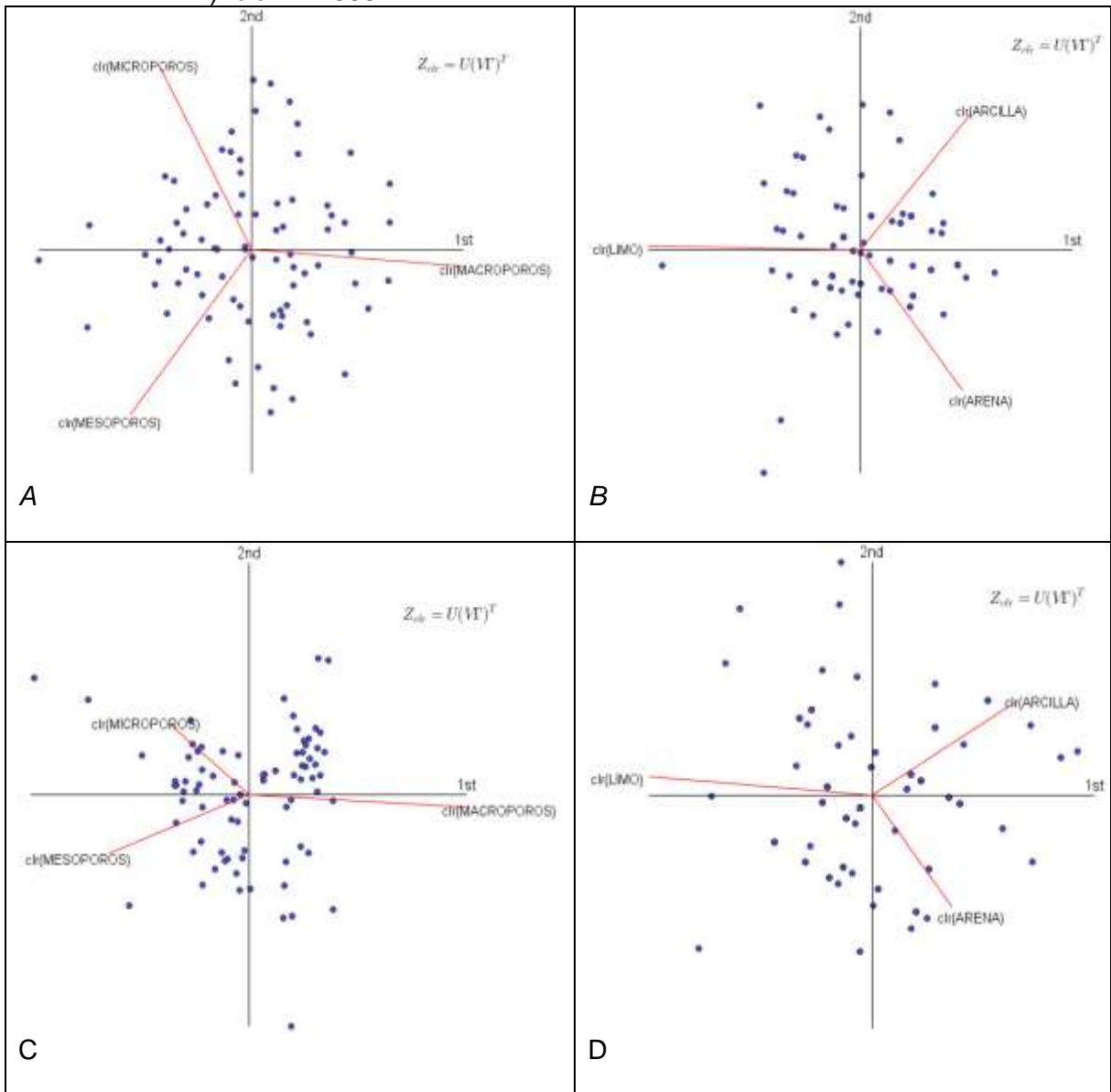


Figura 5.2. Gráficos de dos dimensiones (*biplot*) de las propiedades físicas del suelo *clr*-transformados para el lote 1 y para el lote 2. (A, B): clon RRIM 600, (C, D): clon FX 3864.



5.4 Correlaciones

Con los criterios de Bisquerra (2009) para la clasificación de correlaciones, se observa que el lote 1 y el lote 2 (Tablas 5-4 y 5-5) muestran correlación baja y moderada entre el Per y las producciones de látex; solo presentaron correlación directa moderada y alta entre sus distintas épocas de muestreo. Se observa correlación inversa baja entre PL2 con Arena, PL3 con microporos, y correlación directa baja entre PL2 con microporos para el caso del lote 1. Para el lote 2 se presenta correlación inversa baja entre PL1 con SB y PL3 con las propiedades físicas ADP, arcilla y mesoporos, mientras se evidencia una correlación directa baja entre PL3 respecto a los macroporos.

Los valores de correlación encontrados son bajos, moderados, altos y muy altos, coincidiendo con Silva *et al.* (2007) y aproximados a los encontrados por Pellegrino Cerri *et al.* (2012). En el lote 1 el pH presentó correlación directa positiva con el P, bases del suelo (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+}), C.E., y SB; se presenta correlación inversa con la MO, Ac.I., Al.I., y CICE; los diferentes rangos de correlación espacial para los nutrientes del suelo pueden ser debidos a la movilidad de los iones en el suelo (Yasrebi *et al.*, 2008). La MO mostró correlaciones directas con las variables Ac.I., Al.I., Mg, K, y CICE; según Zuluaga y Escobar (2000) la mayor acumulación de MO produce una disminución en el pH y en la concentración de Ca mientras se incrementa el Aluminio intercambiable, en algunos tipos de suelo, como el estudiado; esto indica que la planta de caucho es acidófila y por ende necesita de un pH bajo para lograr absorber mejor los nutrientes, tolerando además altas concentraciones de aluminio, el cual es acumulado en sus órganos.

El estudio constata los resultados obtenidos por Bilibio *et al.*, (2010) quienes consideran que el contenido de MO está estrechamente relacionado con la CIC, puesto que en suelos con mayores contenidos de materia orgánica, su capacidad tampón o de amortiguación es mayor, comportándose como un sistema más conservador que facilita la construcción o adecuación de la fertilidad del suelo y el mantenimiento del mismo. El P presentó correlación baja con las variables pH, bases del suelo y SB, mientras que muestra correlación muy alta, en ambos lotes, con Ac.I. y Al.I., debido a que el catión Al^{+3} brinda mayor acidez al suelo; ésta acidez revela correlación inversa de baja a moderada con las demás propiedades químicas, pero es con la CICE que presentan correlación directa; esto se debe a que en suelos con valores de pH por debajo de 4.5, al determinarse la CICE, se tienen en cuenta todos los cationes del suelo, incluyéndose tanto al H^{+} como al Al^{+3} .

El Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Na^{+} y SB muestran correlación directa, siendo el Ca^{+2} el que mayor correlación presenta con la SB, debido a que éste catión está presente en mayor cantidad en el suelo, denominado como el catión predominante (Garzón *et al.*, 2010). Según Miranda *et al.*, (1975), en Malasia se ha enfatizado en el efecto del Mg^{+2} sobre la producción de látex, pues es constituyente importante de la molécula de la clorofila; sin él se restringe el desarrollo de la planta como consecuencia de la reducción en la fotosíntesis. Sin embargo, enfatizan en sus estudios que el Ca^{+2} es el nutriente extraído en mayor cantidad por el cultivo de caucho, para condiciones propias de Malasia, lo cual constataría la correlación negativa resultante entre PL3 y Ca^{+2} del suelo, explicándose que una mayor cantidad de calcio en el suelo es aprovechado por el cultivo de caucho, generando así mayor producción de látex.

Tabla 5-4. Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon RRIM 600 y para las propiedades químicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | Per | PL 1 | PL 2 | PL 3 | pH | MO | P | Ac. I. | Al. I. | Ca | Mg | K | Na | Ca/Mg | Mg/K | Ca/K | (Ca+Mg/K) | C.E. | SB | CICE |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|------|
| LOTE 1: CLON RRIM 600 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Per | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 1 | 0,44 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 2 | 0,37 | 0,54 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 3 | 0,48 | 0,42 | 0,53 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | -0,18 | -0,09 | -0,19 | 0,08 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| MO | 0,14 | 0,07 | -0,02 | 0,02 | -0,31 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| P | 0,12 | -0,06 | 0,009 | 0,02 | 0,27 | 0,02 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Ac.I. | 0,09 | 0,06 | 0,22 | 0,07 | -0,76 | 0,47 | -0,2 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Al. I. | 0,05 | -0,04 | 0,21 | 0,04 | -0,72 | 0,29 | -0,21 | 0,83 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Ca | 0,04 | 0,08 | -0,09 | 0,08 | 0,54 | 0,12 | 0,2 | -0,43 | -0,5 | 1 | | | | | | | | | | |
| Mg | 0,17 | 0,19 | -0,21 | 0,18 | 0,42 | 0,3 | 0,29 | -0,29 | -0,5 | 0,68 | 1 | | | | | | | | | |
| K | 0,05 | 0,04 | -0,21 | 0,05 | 0,28 | 0,33 | 0,3 | -0,09 | -0,38 | 0,48 | 0,76 | 1 | | | | | | | | |
| Na | 0,02 | 0,004 | -0,12 | 0,07 | 0,22 | 0,13 | 0,3 | -0,11 | 0,4 | 0,46 | 0,55 | 0,66 | 1 | | | | | | | |
| Ca/Mg | -0,09 | 0,01 | -0,05 | 0,003 | 0,40 | -0,12 | -0,13 | -0,36 | -0,28 | 0,74 | 0,16 | 0,05 | 0,23 | 1 | | | | | | |
| Mg/K | 0,17 | 0,21 | 0,04 | 0,16 | 0,04 | -0,07 | -0,05 | -0,15 | -0,03 | 0,14 | 0,14 | -0,46 | -0,24 | 0,13 | 1 | | | | | |
| Ca/K | -0,12 | -0,003 | -0,07 | -0,07 | 0,31 | -0,11 | -0,1 | -0,35 | -0,17 | 0,66 | 0,13 | -0,24 | -0,005 | 0,83 | 0,51 | 1 | | | | |
| (Ca+Mg/K) | -0,07 | 0,04 | -0,08 | -0,07 | 0,24 | -0,08 | -0,09 | -0,26 | -0,17 | 0,62 | 0,12 | -0,21 | 0,03 | 0,78 | 0,54 | 0,99 | 1 | | | |
| C.E. | -0,05 | 0,01 | -0,2 | -0,04 | 0,25 | 0,13 | 0,1 | -0,14 | -0,3 | 0,36 | 0,53 | 0,6 | 0,56 | 0,2 | -0,14 | 0,005 | -0,02 | 1 | | |
| SB | 0,03 | 0,07 | -0,18 | 0,05 | 0,73 | -0,1 | 0,28 | -0,74 | -0,78 | 0,9 | 0,7 | 0,49 | 0,48 | 0,62 | 0,13 | 0,53 | 0,46 | 0,37 | 1 | |
| CICE | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,08 | -0,4 | 0,65 | -0,02 | 0,73 | 0,47 | 0,24 | 0,26 | 0,39 | 0,33 | 0,04 | -0,17 | -0,001 | 0,02 | 0,22 | -0,14 | 1 |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva. Valores con significancia se muestran en negrilla (P<0,05).

Tabla 5-5. Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon FX 3864 y para las propiedades químicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | Per | PL 1 | PL 2 | PL 3 | pH | MO | P | Ac. I. | Al. I. | Ca | Mg | K | Na | Ca/Mg | Mg/K | Ca/K | (Ca+Mg/K) | C.E. | SB | CICE |
|----------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|------|
| LOTE 2: CLON FX 3864 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Per | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 1 | 0,43 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 2 | 0,38 | 0,76 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PL 3 | 0,2 | 0,38 | 0,36 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| pH | -0,07 | -0,25 | -0,15 | -0,04 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| MO | -0,04 | -0,01 | -0,03 | -0,33 | -0,42 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| P | -0,004 | -0,09 | -0,18 | -0,15 | 0,13 | -0,01 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| Ac.I. | 0,09 | 0,14 | 0,01 | -0,12 | -0,63 | 0,56 | -0,08 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Al. I. | 0,11 | 0,09 | -0,02 | -0,13 | -0,6 | 0,62 | -0,12 | 0,95 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Ca | -0,06 | -0,22 | -0,07 | -0,33 | 0,32 | -0,02 | 0,24 | -0,41 | -0,42 | 1 | | | | | | | | | | |
| Mg | -0,03 | -0,08 | 0,06 | -0,24 | 0,13 | 0,18 | -0,01 | -0,21 | -0,11 | 0,33 | 1 | | | | | | | | | |
| K | -0,1 | -0,06 | -0,16 | 0,08 | 0,17 | -0,13 | 0,35 | -0,06 | -0,17 | 0,06 | -0,06 | 1 | | | | | | | | |
| Na | -0,01 | -0,15 | -0,12 | 0,13 | 0,13 | -0,2 | 0,14 | -0,15 | -0,16 | 0,09 | -0,23 | 0,4 | 1 | | | | | | | |
| Ca/Mg | -0,004 | -0,18 | -0,05 | -0,27 | 0,22 | -0,05 | 0,25 | -0,32 | -0,38 | 0,88 | 0,11 | 0,05 | 0,28 | 1 | | | | | | |
| Mg/K | 0,09 | 0,07 | 0,2 | -0,16 | -0,18 | 0,26 | -0,26 | 0,11 | 0,20 | -0,02 | 0,31 | -0,88 | -0,41 | -0,04 | 1 | | | | | |
| Ca/K | 0,08 | -0,09 | 0,15 | -0,26 | 0,03 | 0,11 | -0,007 | -0,12 | -0,06 | 0,56 | 0,1 | -0,63 | -0,06 | 0,53 | 0,68 | 1 | | | | |
| (Ca+Mg/K) | 0,05 | -0,08 | 0,15 | -0,26 | 0,05 | 0,12 | -0,07 | -0,12 | -0,04 | 0,48 | 0,15 | -0,73 | -0,15 | 0,45 | 0,78 | 0,99 | 1 | | | |
| C.E. | -0,01 | 0,03 | -0,17 | -0,04 | -0,51 | 0,22 | -0,04 | 0,23 | 0,26 | 0,11 | 0,07 | 0,05 | 0,15 | 0,19 | 0,003 | -0,01 | -0,07 | 1 | | |
| SB | -0,1 | -0,25 | -0,1 | -0,2 | 0,54 | -0,24 | 0,27 | -0,74 | -0,74 | 0,86 | 0,33 | 0,17 | 0,21 | 0,72 | -0,06 | 0,35 | 0,3 | -0,01 | 1 | |
| CICE | 0,05 | 0,02 | -0,04 | -0,28 | -0,5 | 0,61 | 0,06 | 0,87 | 0,8 | 0,02 | -0,08 | 0,03 | -0,05 | 0,05 | 0,12 | 0,07 | 0,04 | 0,31 | -0,31 | 1 |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva. Valores con significancia se muestran en negrilla (P<0,05).

Tabla 5-6: Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon RRIM 600 y para las propiedades físicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | Per | PL 1 | PL 2 | PL 3 | ADP | Arena | Limo | Arcilla | Da | Macroporos | Mesoporos | Microporos |
|-----------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|-------|--------------|--------------|------------|
| LOTE 1: CLON RRIM 600 | | | | | | | | | | | | |
| Per | 1 | | | | | | | | | | | |
| PL 1 | 0,44 | 1 | | | | | | | | | | |
| PL 2 | 0,37 | 0,54 | 1 | | | | | | | | | |
| PL 3 | 0,48 | 0,42 | 0,53 | 1 | | | | | | | | |
| ADP | -0,03 | -0,13 | -0,08 | 0,06 | 1 | | | | | | | |
| Arena | -0,01 | -0,03 | -0,27 | 0,01 | -0,08 | 1 | | | | | | |
| Limo | -0,14 | 0,02 | 0,11 | -0,06 | -0,05 | -0,57 | 1 | | | | | |
| Arcilla | 0,09 | 0,12 | 0,17 | -0,09 | -0,07 | -0,02 | -0,57 | 1 | | | | |
| Da | -0,09 | -0,05 | -0,06 | -0,06 | -0,51 | -0,11 | 0,23 | -0,19 | 1 | | | |
| Macroporos | 0,01 | 0,13 | -0,20 | 0,15 | -0,29 | 0,39 | -0,15 | -0,08 | 0,01 | 1 | | |
| Mesoporos | -0,03 | -0,17 | -0,06 | 0,05 | 0,8 | -0,2 | 0,03 | -0,05 | -0,21 | -0,46 | 1 | |
| Microporos | 0,01 | 0,03 | 0,24 | -0,23 | -0,44 | -0,21 | 0,13 | 0,14 | 0,19 | -0,51 | -0,42 | 1 |

Per: perímetro de árbol, PL: producción de látex, ADP: % Agua Disponible para las plantas, D.a.: Densidad aparente. Valores con significancia se muestran en negrilla (P<0,05).

Tabla 5-7: Correlaciones lineales para los parámetros productivos del Clon FX 3864 y para las propiedades físicas del suelo analizadas.

| VARIABLE | Per | PL 1 | PL 2 | PL 3 | ADP | Arena | Limo | Arcilla | Da | Macroporos | Mesoporos | Microporos |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------|-------------|--------------|-------------|------------|
| LOTE 2: CLON FX 3864 | | | | | | | | | | | | |
| Per | 1 | | | | | | | | | | | |
| PL 1 | 0,43 | 1 | | | | | | | | | | |
| PL 2 | 0,38 | 0,76 | 1 | | | | | | | | | |
| PL 3 | 0,2 | 0,38 | 0,36 | 1 | | | | | | | | |
| ADP | 0,19 | 0,07 | -0,1 | -0,28 | 1 | | | | | | | |
| Arena | 0,01 | 0,02 | 0,06 | 0,03 | -0,06 | 1 | | | | | | |
| Limo | -0,04 | 0,03 | 0,1 | 0,14 | -0,05 | -0,63 | 1 | | | | | |
| Arcilla | -0,01 | -0,17 | -0,14 | -0,24 | 0,13 | -0,13 | -0,77 | 1 | | | | |
| Da | -0,11 | -0,13 | -0,08 | 0,22 | -0,33 | 0,03 | -0,16 | 0,08 | 1 | | | |
| Macroporos | -0,01 | -0,06 | 0,12 | 0,28 | -0,69 | 0,08 | -0,22 | 0,14 | 0,22 | 1 | | |
| Mesoporos | -0,05 | -0,01 | -0,21 | -0,23 | 0,75 | -0,07 | 0,17 | -0,14 | -0,15 | -0,91 | 1 | |
| Microporos | 0,1 | 0,1 | -0,03 | -0,04 | 0,35 | -0,03 | 0,17 | -0,15 | -0,1 | -0,72 | 0,41 | 1 |

Per: perímetro de árbol, PL: producción de látex, ADP: % Agua Disponible para las plantas, D.a.: Densidad aparente. Valores con significancia se muestran en negrilla (P<0,05).

Malavolta *et al.* (1989) estudiaron la movilidad de los nutrientes del caucho y determinaron que los macronutrientes N, P, K y S son completamente móviles, el Mg es parcialmente móvil y el Ca es inmóvil dentro de las plantas.

Las relaciones iónicas en el lote 1 (Tabla 5-4), presentan correlación directa baja con el pH, y correlación directa alta con el Ca, mientras que la correlación inversa baja y moderada se presenta con las variables Ac.I., Al.I, K y Na. Las correlaciones directas moderadas se presentan entre Mg/K con Ca/K y Ca+Mg/K, mientras que las correlaciones directas muy altas se evidencian entre Ca/Mg con Ca/K y Ca+Mg/K, además de Ca/K con Ca+Mg/K; ello es debido a la aplicación de Cal Dolomita, Calfos o Yeso, ya que son enmiendas que proveen de éstos nutrientes al suelo, las cuales pueden estar disponibles para la planta, alrededor de uno a dos meses después de su aplicación e incorporación. Similares resultados reportan Peña *et al.* (2009), quienes indican que la extrema acidez presente en muchos suelos, induce una disminución en el contenido de bases de los mismos; de otra parte, aunque el valor de la relación Ca/Mg pueda ser favorable para el cultivo del caucho, las demás relaciones iónicas son bajas, ocasionadas por el desbalance en el contenido de K del suelo.

Estudios realizados por Quarteroli *et al.* (2012), en suelos del Brasil, determinaron que el macronutriente de mayor extracción por el caucho es el K, seguido de N, P, Mg, S y Ca, donde la mayor extracción se presenta durante el estado de senescencia foliar.

En el lote 2 (Tabla 5-5), el Per solo tuvo correlación con las variables PL1 y PL2. Las producciones de látex presentaron correlación directa entre ellas; cuando se presenta alta producción de látex en la primera colecta, muy seguramente se genere alta producción en las demás, siempre y cuando las colectas se realicen en la época de mayor precipitación, tiempo en el cual los árboles de caucho generan mayor producción de látex. El pH presenta correlación moderada directa con SB y moderada inversa con MO, Al.I., C.E., CICE, y correlación alta inversa con Ac.I. La MO evidencia correlación moderada con Ac.I., CICE y correlación alta con Al.I. El P presenta correlaciones bajas directas con Ca, K y SB, pero con porcentajes más altos respecto al lote 1. Hernández *et al.* (2003) reportan que en suelos con clases texturales entre franco arenosa a franco arcillo arenosa y con pH de rango entre fuertemente ácido a extremadamente ácido (propiedades que se relacionaron con el contenido de Al^{3+}), la concentración de P se hallaba en niveles altos, generando una disminución en la disponibilidad de otros nutrientes para los cultivos.

Para el caso de la relación iónica (Ca+Mg)/K en el lote 2, se muestra más representativamente, una correlación inversa baja con la variable PL3, correlación directa moderada, alta y muy alta con Ca, Ca/Mg, Mg/K y Ca/K, mientras que respecto al K, su correlación fue inversa alta.

En cuanto a las variables físicas (Tabla 5-6), en el lote 1, PL2 tuvo correlación directa baja con Microporos y correlación inversa baja con Arena; PL3 presentó correlación inversa baja con Microporos; el ADP presentó correlación inversa baja con Macroporos e inversa moderada con Da y Microporos, mientras que con Mesoporos mostró correlación directa muy alta. Limo evidencia correlación inversa moderada con Arena y Arcilla con Limo en igual porcentaje. Se presentó correlación directa baja entre Da con Limo y Macroporos con Arena. Macroporos presenta correlación inversa moderada con los Meso y Microporos, al igual que los Mesoporos con los Microporos, significando que al existir

mayor cantidad de Macro y Mesoporos se restringe la cantidad de Microporos del suelo, produciéndose mayor infiltración y/o disponibilidad de agua para las plantas por retención de humedad. Mzuku *et al.*, (2005) precisan que la textura del suelo puede tener gran influencia en la productividad del cultivo, por medio del efecto sobre la retención de agua del suelo, además de la influencia de la misma sobre los poros y sobre la conductividad hidráulica del suelo.

Autores como Cox *et al.*, (2003) y Mann *et al.*, (2010) determinan que la textura es una propiedad clave, pues afecta a otras propiedades del suelo, tales como la Da, y CIC, y de igual forma está relacionada con el rendimiento potencial de un suelo.

En el lote 2 (Tabla 5-7), ADP presentó correlación inversa baja y alta con Da y macroporos, mientras existe correlación directa alta y baja con meso y microporos correspondientemente. Limo tuvo correlación inversa alta con arcilla; resultados similares obtuvieron Martins *et al.*, (2010). Los Macroporos mostraron correlación directa baja con Da, correlación inversa muy alta y alta con los Meso y Microporos, mientras que los Microporos presentaron correlación directa moderada con Mesoporos.

5.5 Mapas de contorno

Tal como lo estipula la teoría de variables regionalizadas, los mapas de contorno (Figuras 5-3 y 5-4) se construyen para variables que presentan dependencia espacial; a manera de ejemplo se cita a Silva *et al.*, (2010), quienes generaron mapas para variables como pH, Ca, Mg, K, P, suma de bases, CICE, en un suelo Latosol. Con la información presente en los mapas se visualiza y se tiene un mejor conocimiento del patrón de distribución espacial, definiendo así diferentes zonas de manejo en una determinada área. Mohamed y Abdo (2011) al igual que Abu y Malgwi (2011) afirman que para un óptimo conocimiento sobre los tipos de suelos, la cuantificación y estimación de sus propiedades químicas y físicas, asociadas a su distribución y/o variabilidad espacial, son los mapas de contorno un requisito esencial ó primer paso para tomar decisiones de manejo de cultivos y otras prácticas en agricultura, agroforestería, irrigación y drenaje. En éste apartado las variables con efecto pepita no se ilustran.

Para PL3 en el lote 1, se presentan zonas con árboles más productivos respecto al lote 2 para finales de la época de lluvias (mes de Diciembre). De igual forma, el contenido de P del suelo en éste lote presenta mayor número de zonas con valores por debajo de 3 mg·kg⁻¹, presentando mayor deficiencia de éste nutriente. Para Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Na⁺ y SB en ambos lotes se presentan semejanzas en los mapas de contorno, con zonas de mayor concentración de cada elemento, siendo posiblemente resultado de la forma de aplicación de las enmiendas utilizadas en el cultivo; cabe priorizar que Ca⁺² y Mg⁺² presenta mapas de contorno muy similares en cuanto a la distribución de éstos nutrientes en el suelo, siendo la Cal Dolomita la que propicia dicho comportamiento. En el lote 2 el Mg⁺² presenta mayor distribución pero menor contenido respecto al lote 1, quizá a causa de labores de encalado. Se observa semejanza entre el pH y el Ca del suelo, comparándose con los resultados de Motomiya *et al.*, (2011) quienes encontraron distribución espacial similar en propiedades del suelo pH, Ca, SB y CICE, como consecuencia de la interdependencia entre éstas variables, y probablemente por labores de encalado.

Se observa que el pH del suelo para el lote 1 presenta rangos de valores más bajos (menor a 4,75) en relación al lote 2, extendiéndose en mayor número de zonas en su mapa de contorno, desde el centro hacia la parte noroccidental del mismo; es de resaltar que la distribución del pH del suelo está controlada por varios factores ambientales como la deposición ácida, la roca madre ó material parental, altitud, tipo de suelo, usos del suelo, cubierta vegetal, entre otros (Borůvka *et al.*, 2007; Shi *et al.*, 2009).

Los mapas de contorno para las relaciones iónicas (Ca/Mg, Mg/K, Ca/K y (Ca+Mg)/K) muestran correlación distinta en cada lote (Figura 5-3); en el lote 1, el ión más relevante en este tipo de relaciones es el Ca, destacándose por contenidos mayores observados en el lote, mientras en el lote 2, el ión a destacar es el ión Mg. En sí, los niveles de bases del suelo son bajas, y por ende las relaciones iónicas se ven afectadas por éstos, como lo demuestra su distribución espacial en los lotes, lo cual hace recomendable y oportuno una tasa de aplicación variable de elementos como Ca, Mg y K in situ, logrando incrementar los niveles de fertilidad en el suelo, obteniendo beneficios económicos, favoreciendo el desarrollo y productividad del cultivo (Motomiya *et al.*, 2011).

Las diferentes propiedades físicas del suelo presentan mapas de contorno con disimilitud de distribución espacial en ambos lotes (Figura 5-4), que no permite establecer una correlación clara entre variables, a pesar de ser el mismo tipo de suelo y de sus mismas características edafoclimáticas, independientemente del clon plantado en la zona de estudio; únicamente el mapa de ADP permite ratificar, visualmente, zonas que se correlacionan con el mapa de Mesoporos en ambos lotes, corroborando los resultados obtenidos en las Tablas 5-6 y 5-7. Para Vieira *et al.*, (2007), la textura del suelo es una de las propiedades más estables; su alteración y variabilidad espacial depende del material de origen y de agentes naturales de formación del suelo, siendo fenómenos como la erosión quienes promueven pequeñas variaciones en la proporción del tamaño de partículas, mientras que prácticas de manejo o del cultivo ocasionan una nula o poco alteración. Se evidencia además que el ADP en todas las muestras analizadas muestra valores inferiores a 10%. Montenegro (1990), cataloga como bajo a éste valor, concluyéndose que el agua retenida por el suelo es muy baja, y si se presentara una época seca muy marcada, sería desfavorable o perjudicial para las plantas.

La información cuantitativa resultante de los mapas de contorno puede usarse para facilitar el manejo de cultivos por sitio específico, mediante la tecnología de aplicación de tasa variable de fertilizante, logrando un mejor manejo, incrementando el rendimiento del cultivo, minimizando los costos de producción y disminuyendo la contaminación ambiental (Yasrebi *et al.*, 2008).

Figura 5-3: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y físicas del suelo analizadas para el lote 1 (Clon RRIM 600).

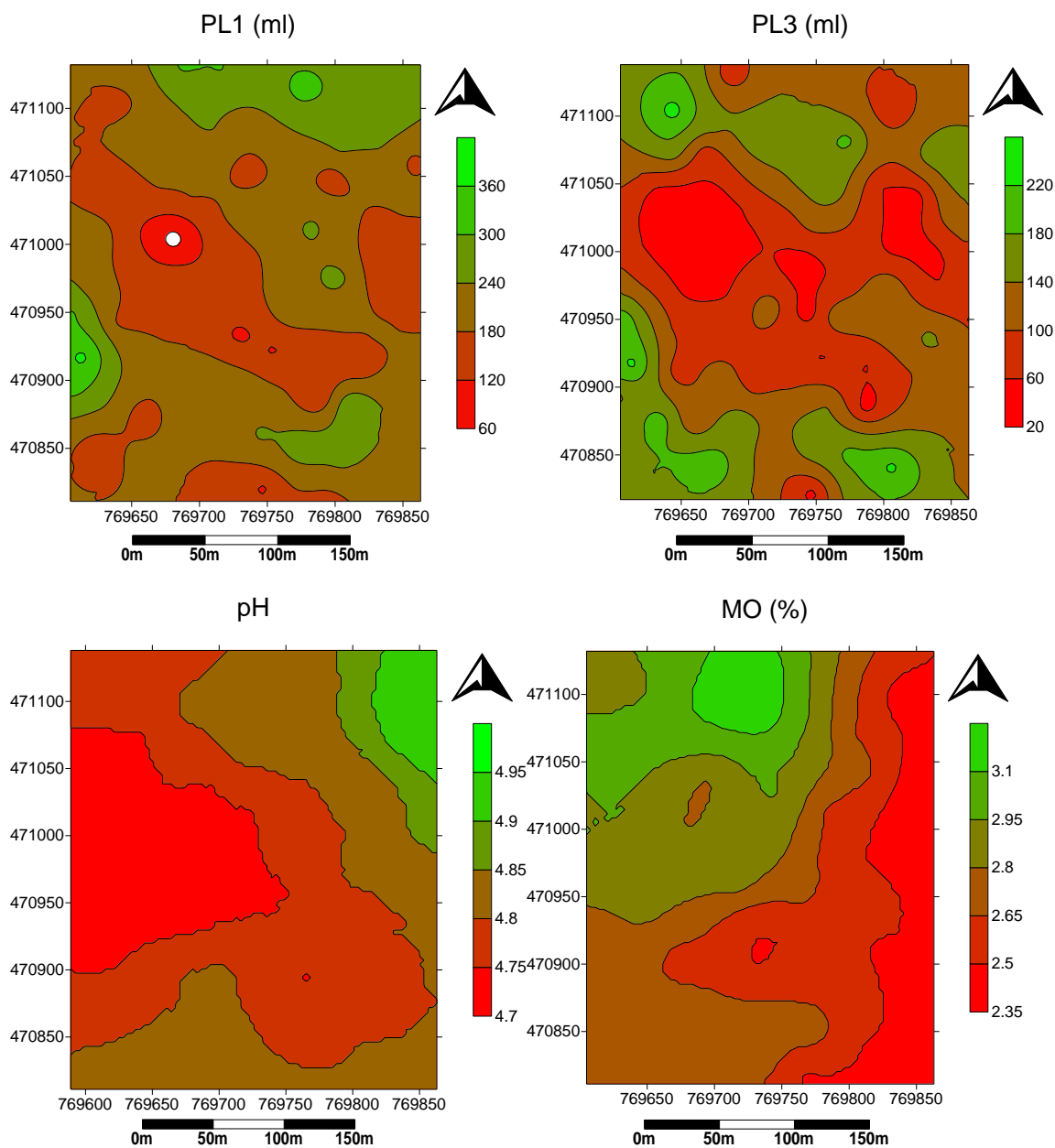


Figura 5-3. Continuación...

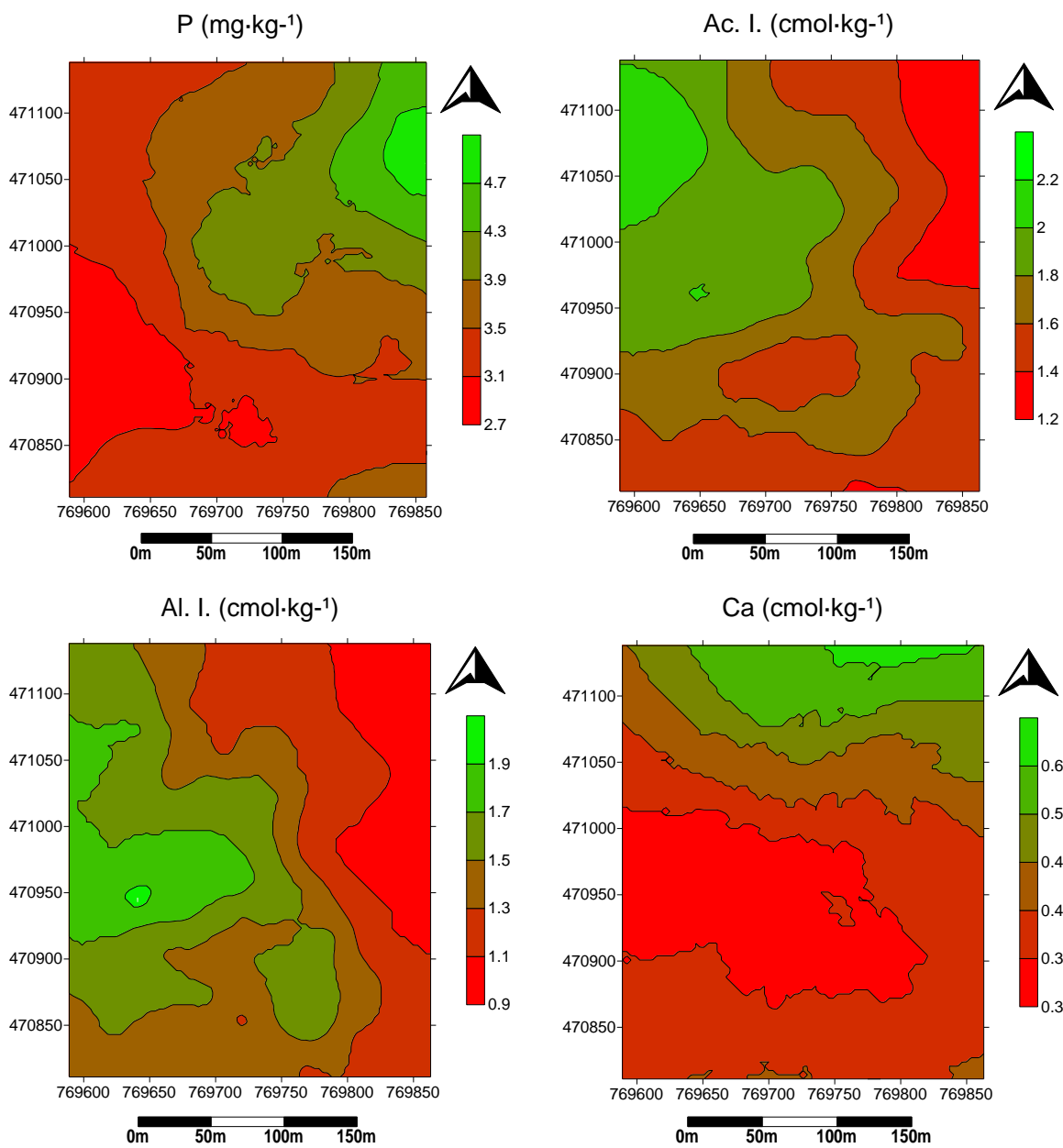


Figura 5-3. Continuación...

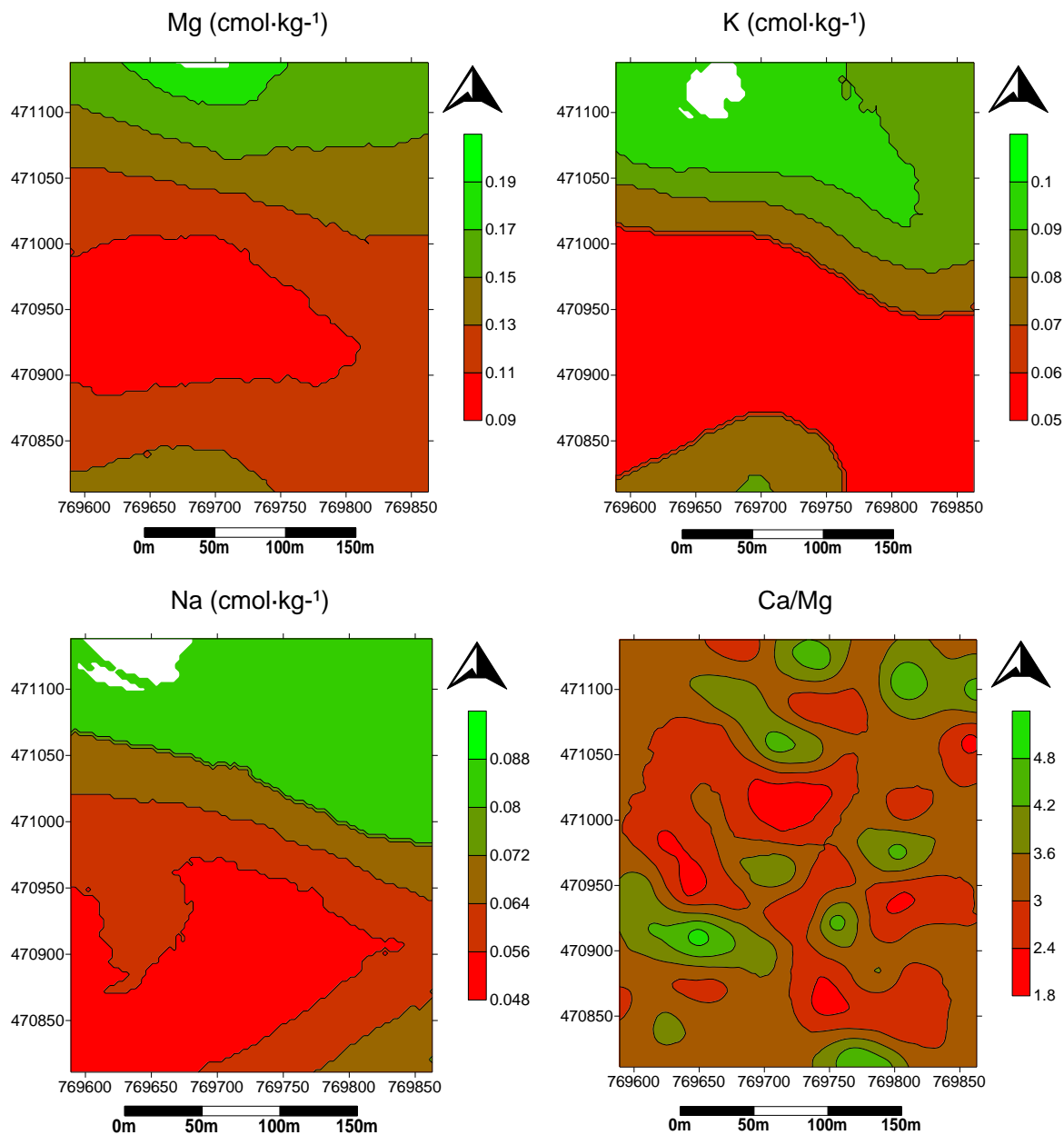


Figura 5-3. Continuación...

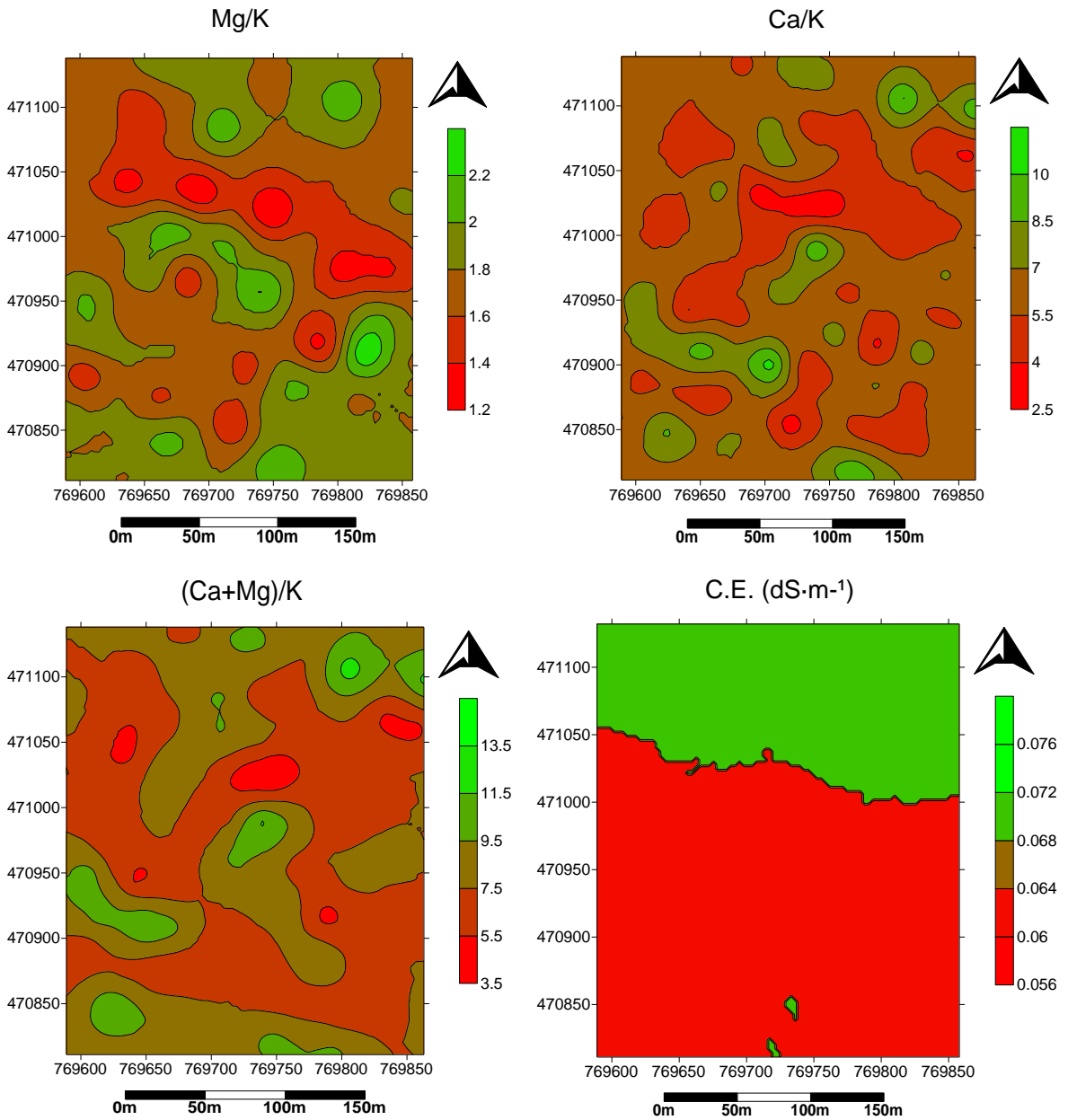


Figura 5-3. Continuación...

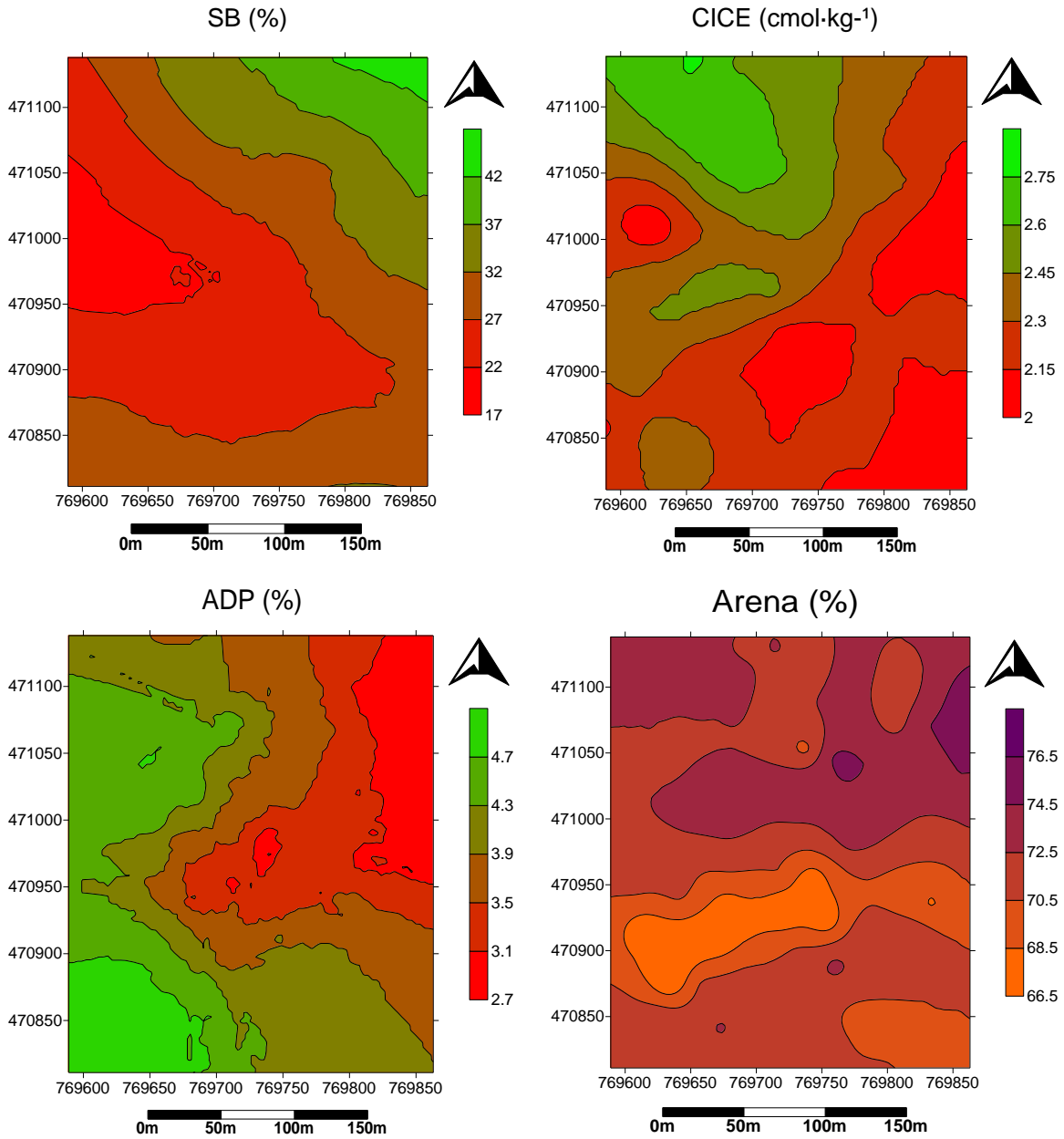


Figura 5-3. Continuación...

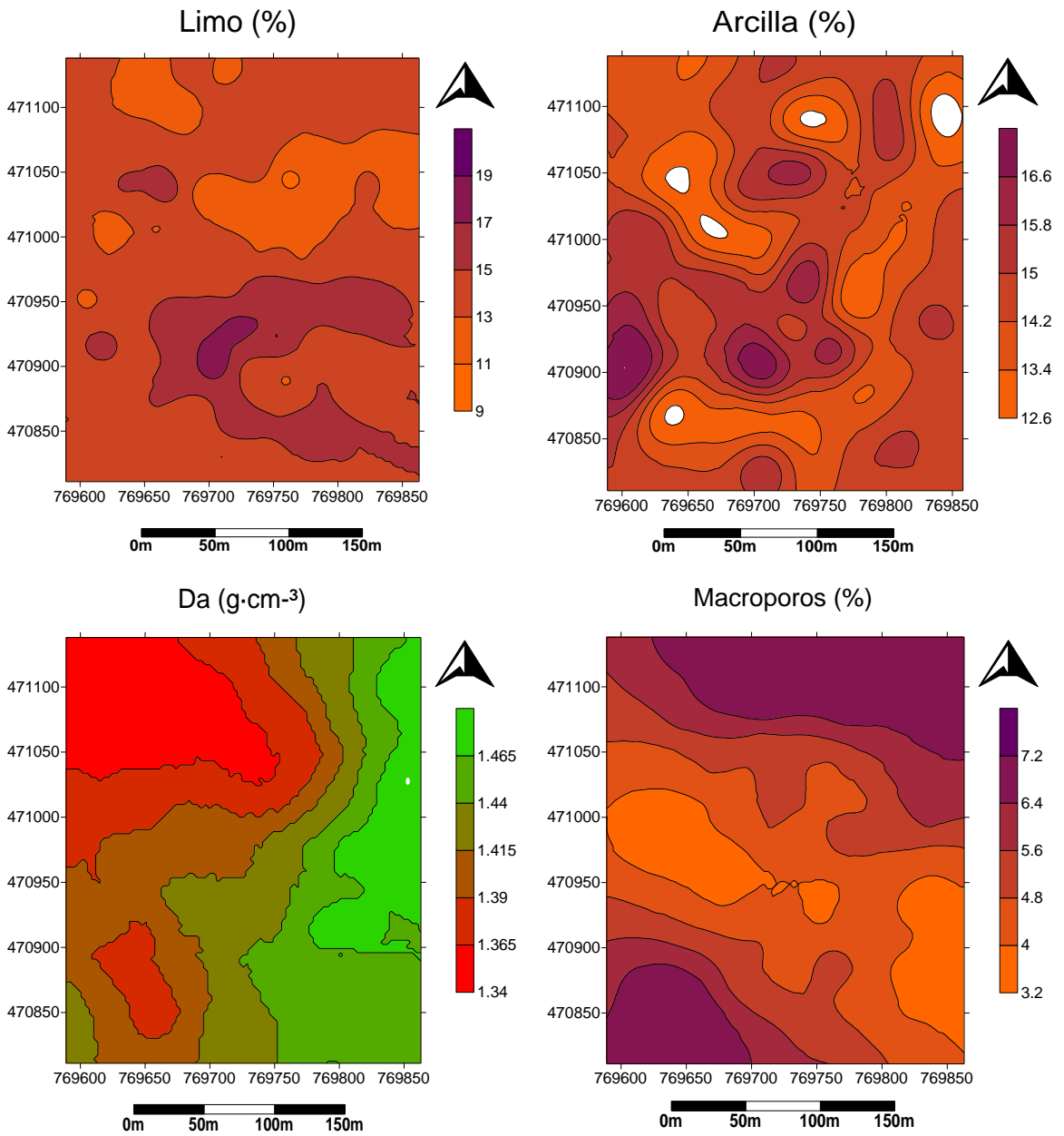


Figura 5-3. Continuación...

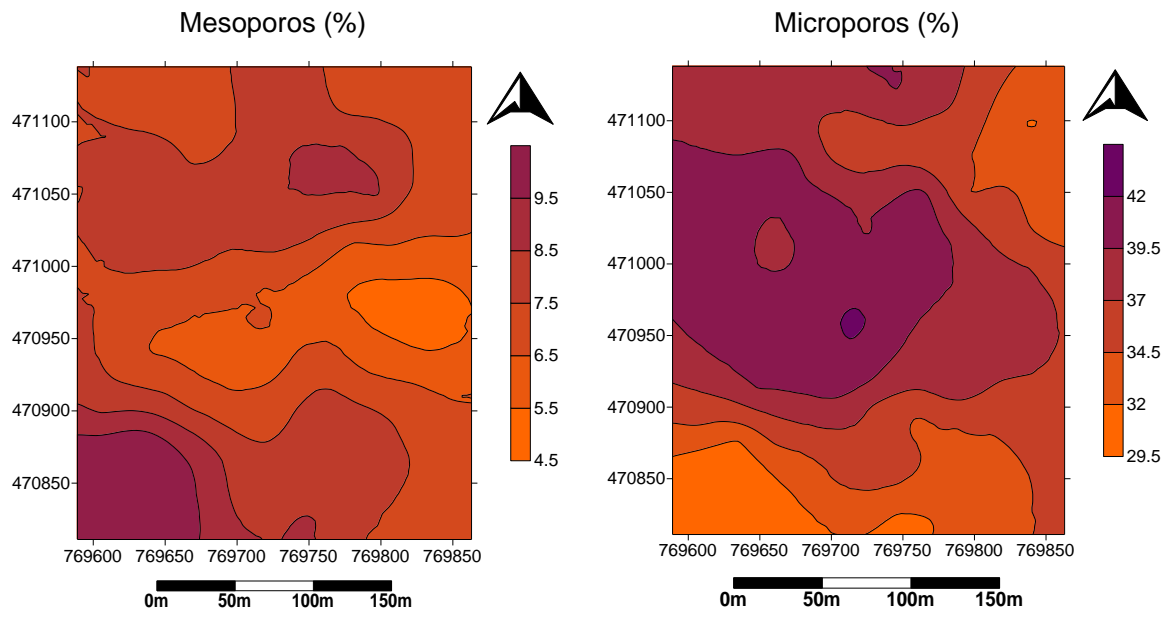


Figura 5-4: Mapas de contorno en 2D de los parámetros productivos, propiedades químicas y propiedades físicas del suelo analizadas para el lote 2 (Clon FX 3864).
Per (cm) PL1 (ml) PL3 (ml) pH

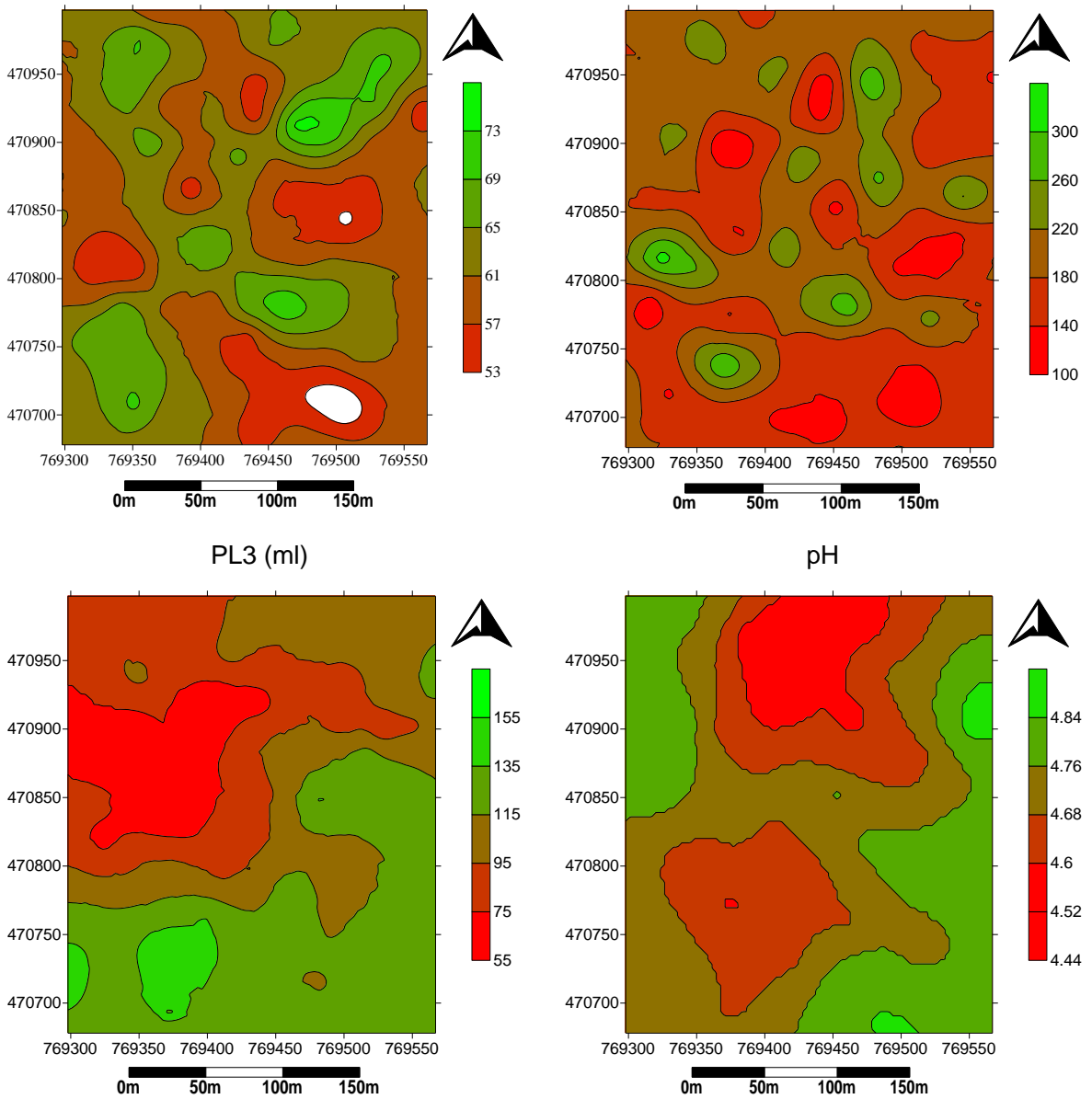


Figura 5-4. Continuación...

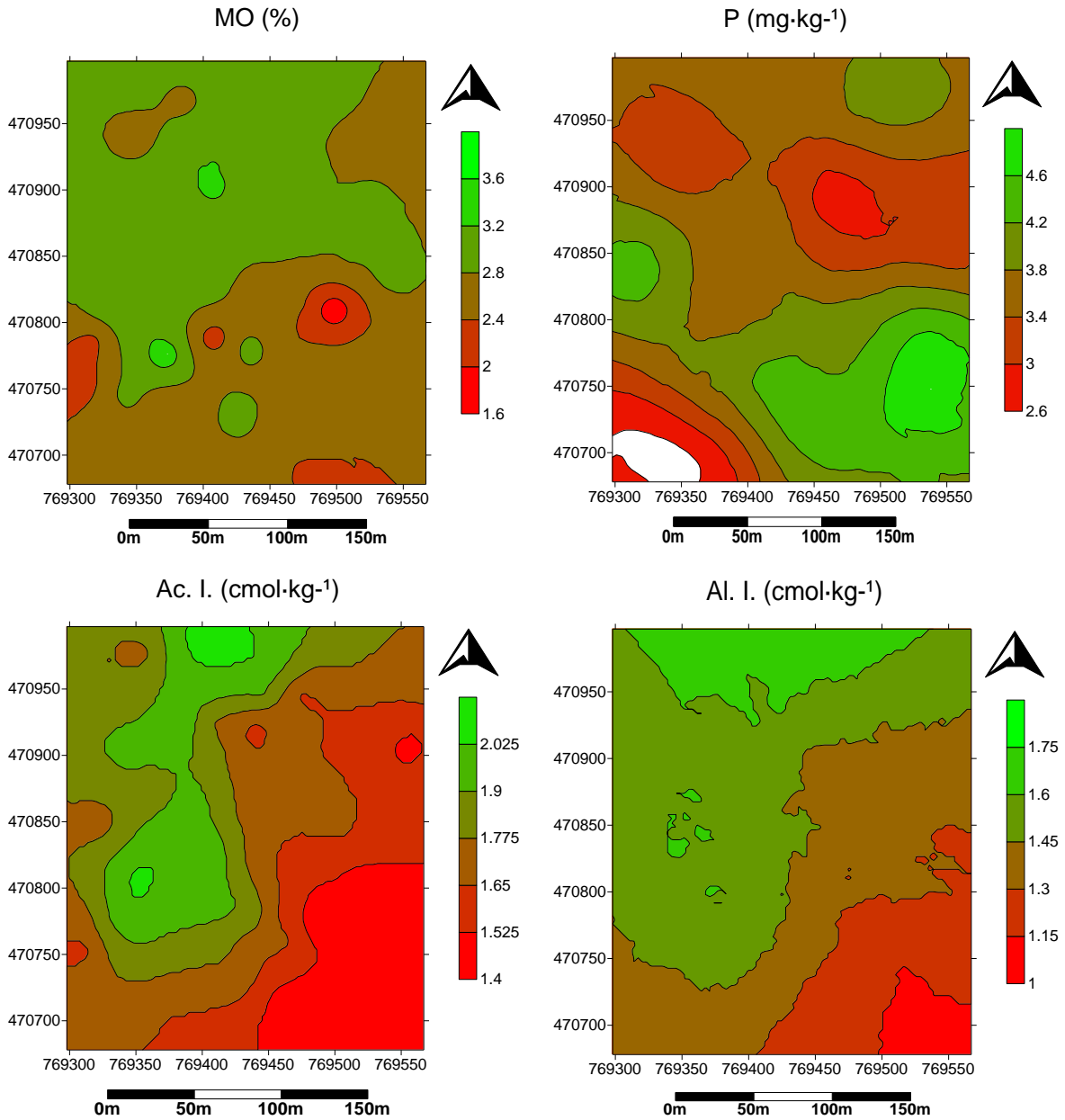


Figura 5-4. Continuación...

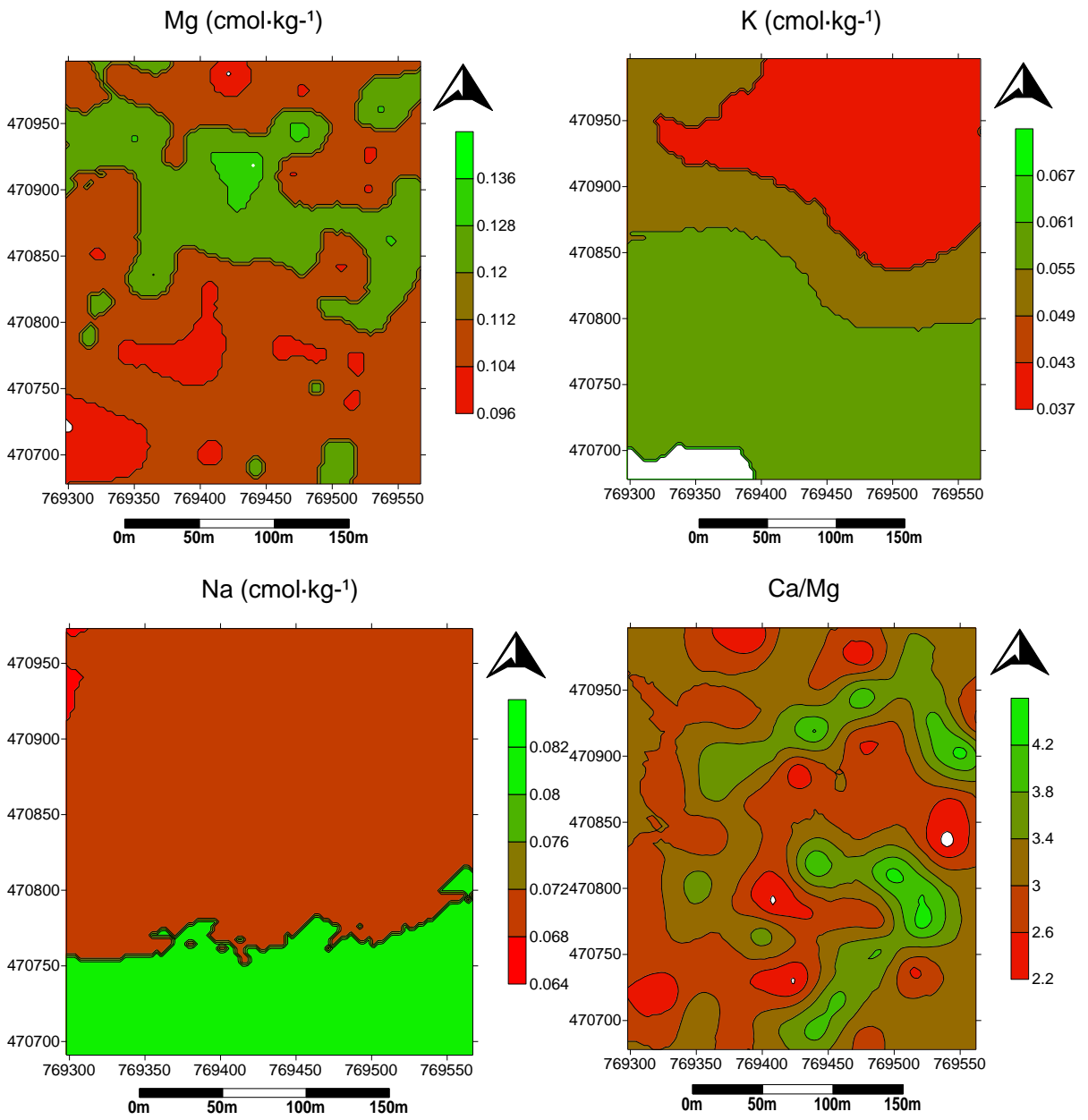


Figura 5-4. Continuación...

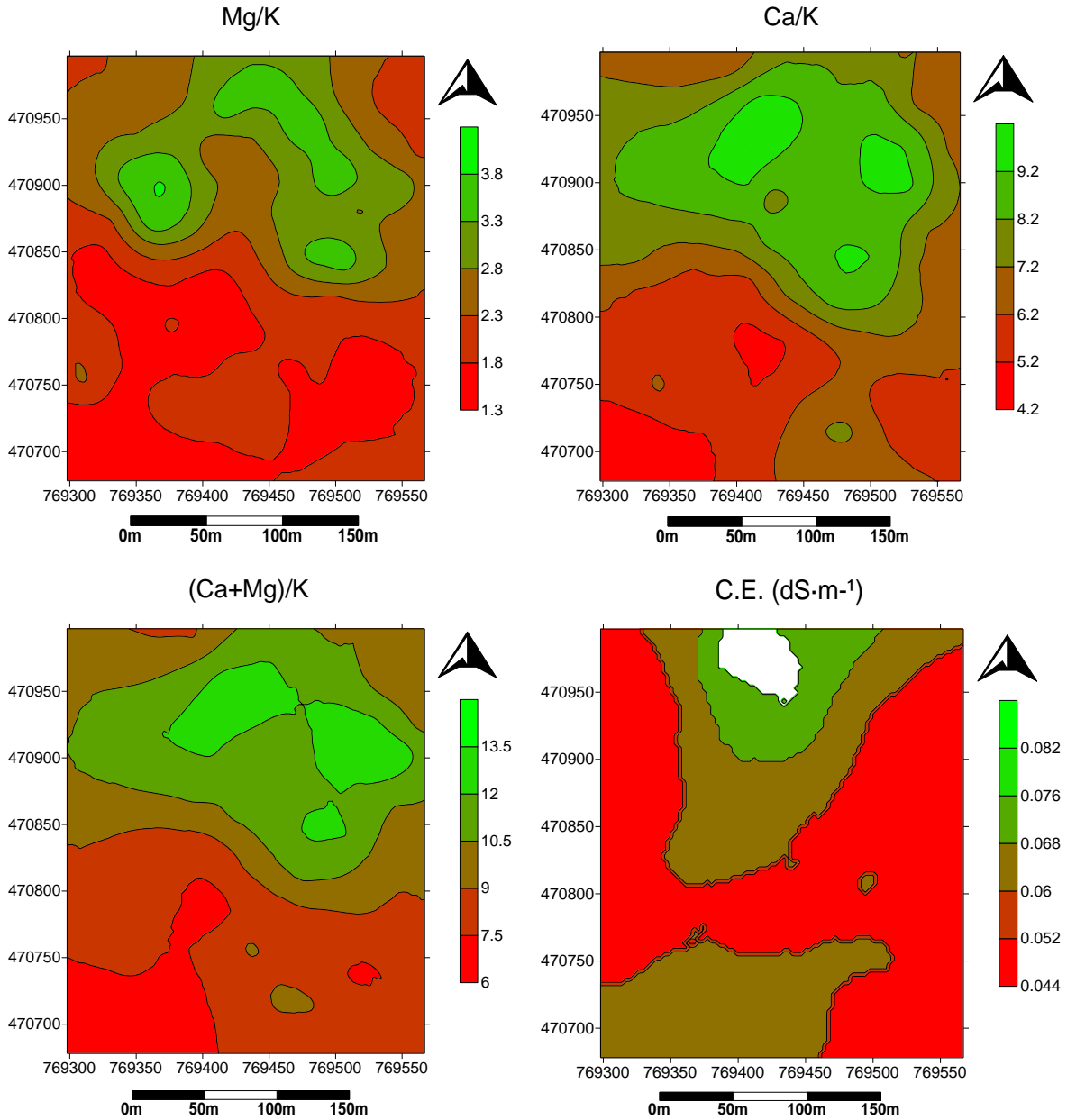


Figura 5-4. Continuación...

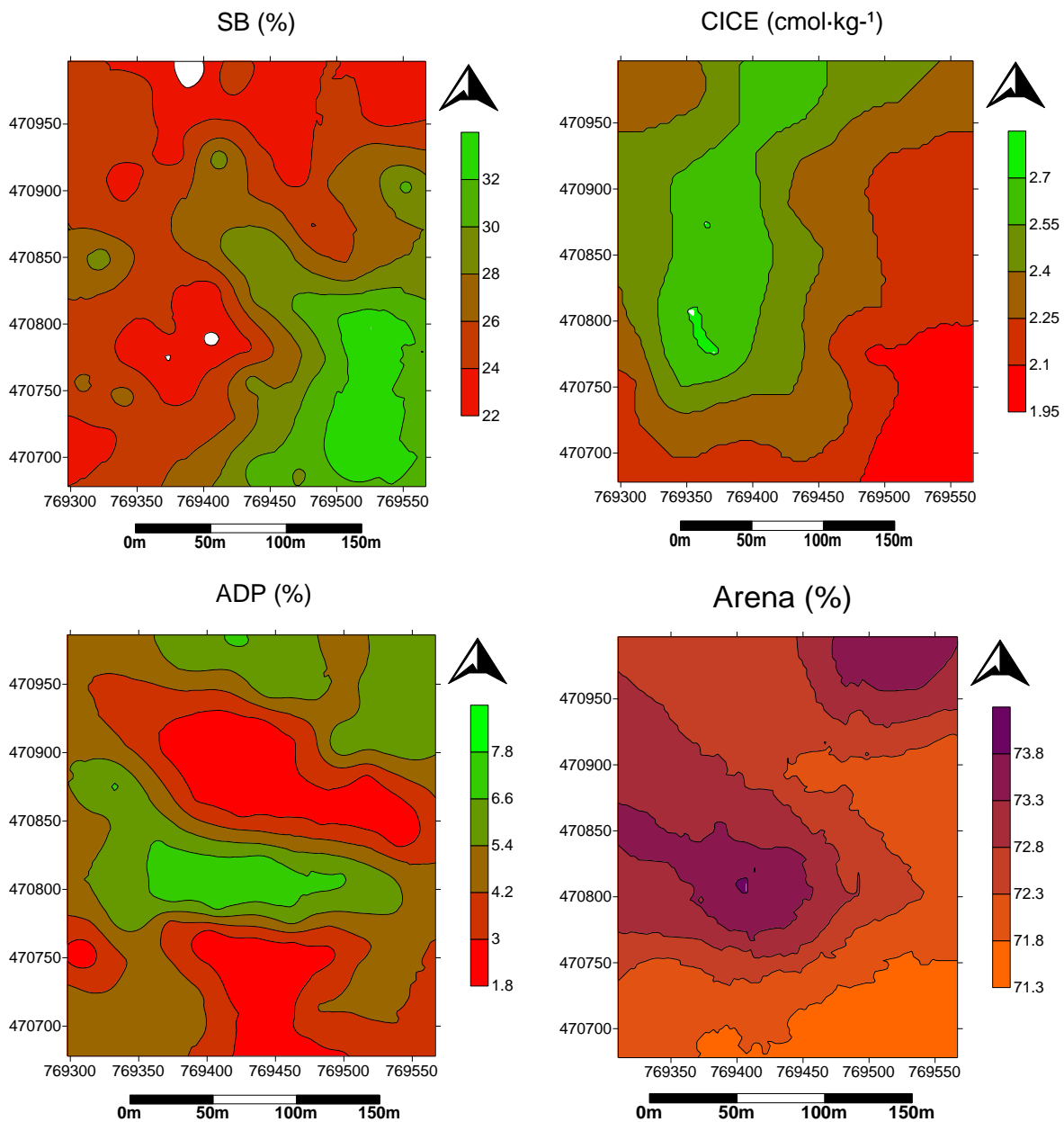


Figura 5-4. Continuación...

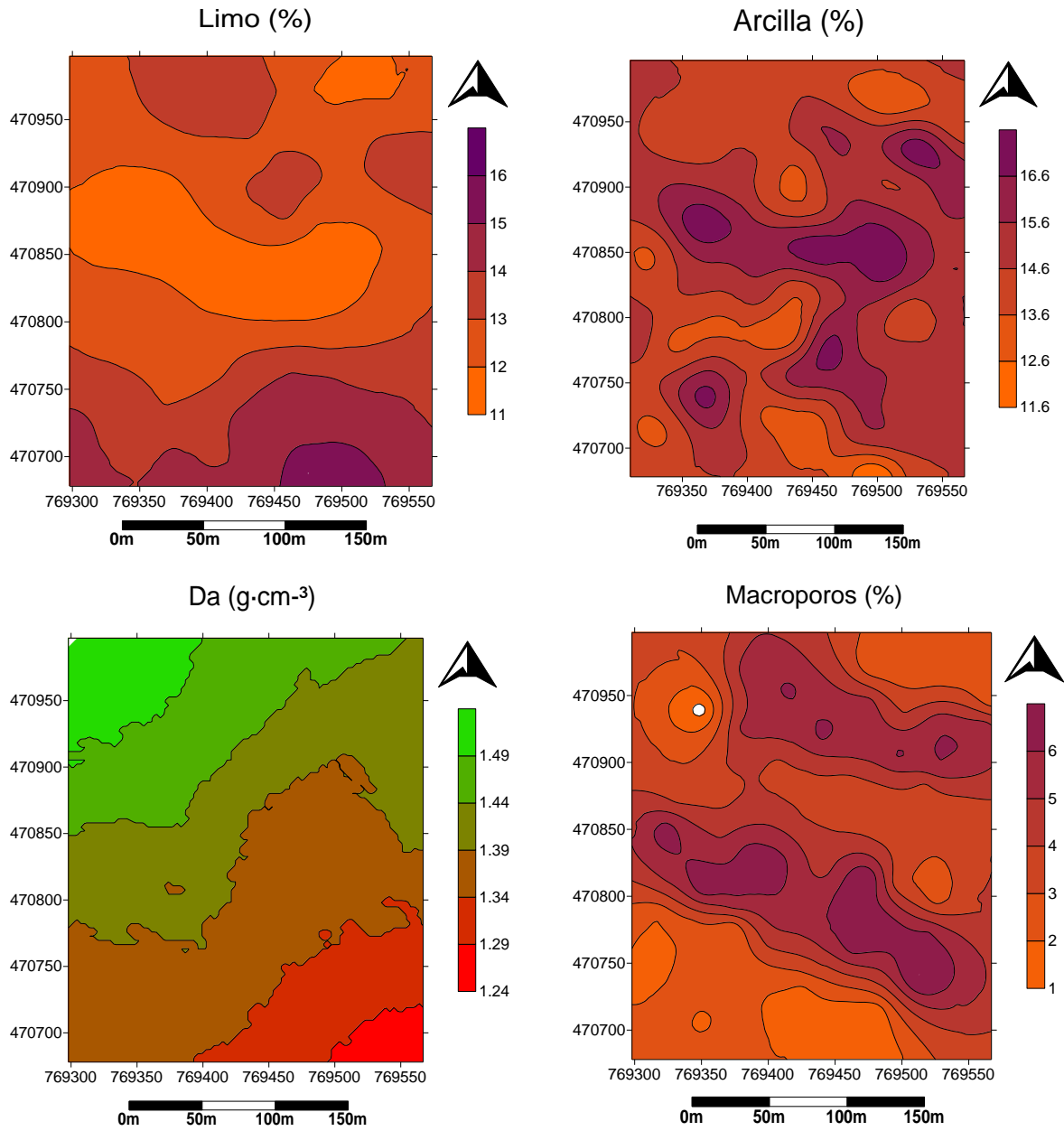
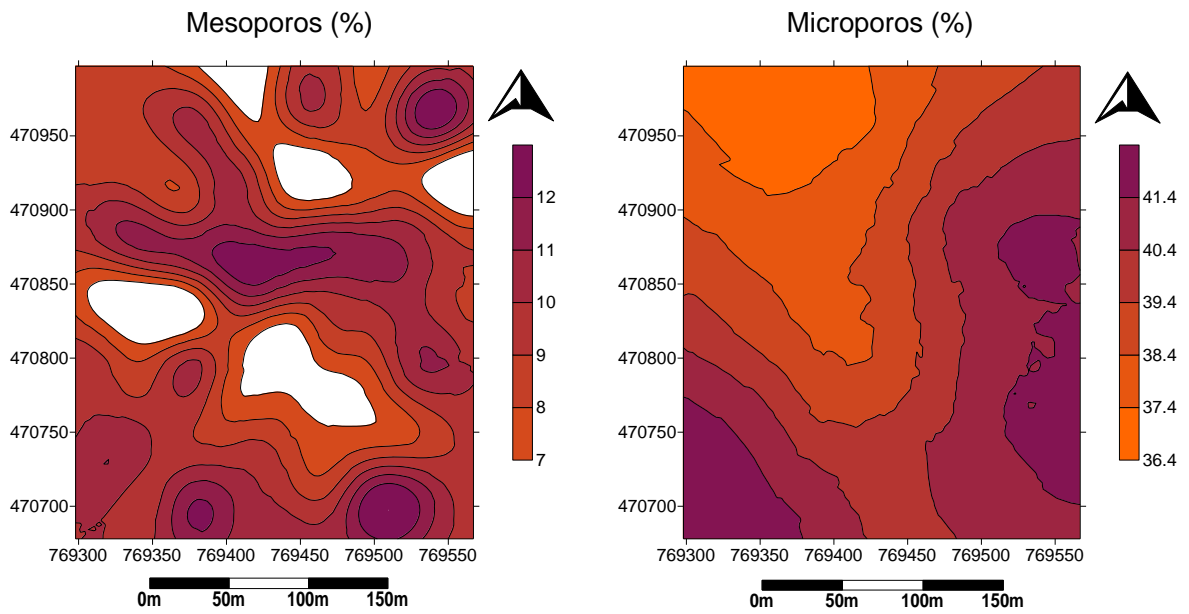


Figura 5-4. Continuación...



5.6 Análisis Multivariado

5.6.1 Análisis de componentes principales

Los resultados obtenidos del análisis de CP relacionando los parámetros productivos con las propiedades químicas y físicas para el lote 1 se presentan en las Tablas 5-8 y 5-9. Cabe agregar que todos los componentes resultantes en cada lote evaluado fueron resultado de la aplicación de la rotación Varimax, dentro del análisis de CP.

El análisis de CP de las propiedades químicas para el lote 1, arrojó seis componentes principales, con autovalores mayores a uno. Éstos explican el 78,8% de la varianza total de los datos (Tabla 5-8). El menor valor de la comunalidad se observó en el Per, concluyendo que ésta propiedad es poco representativa en los CP analizados.

De acuerdo a la Tabla 5-8, el CP1 representa el 24,43% de la varianza total, influenciado por las relaciones iónicas Ca/Mg, Ca/K y Ca+Mg/K, confirmando que el ión Ca es fundamental en éste tipo de relaciones y que es el de mayor presencia y necesidad en el suelo. El CP2 representa el 19,70% de la varianza total, influenciado mayormente por el Mg y K del suelo; parece ser que el suministro de uno de ellos, favorece la disponibilidad del otro. El CP3 con un 11,32% de la varianza total mostró altos valores para las producciones de látex, indicando relación directa solo entre ellas. El CP4 se presenta con un valor de 8,99% de la varianza total, mostrando mayor influencia del Ca con la CICE del suelo, ya que éste catión tiene mayor presencia en la CICE por mayor contenido en el suelo. El CP5, representado en un 8,38%, confirma la relación inversa entre el pH con la MO, la Ac.I. y el Al.I. del suelo; al presentarse un incremento en el pH del suelo, menor será la presencia de Aluminio e Hidrógeno intercambiable y por ende menor acidez en el suelo, la cual se ve favorecida además por la baja cantidad de MO presente en el suelo. Por último, el CP6 con un valor de 5,95% de la varianza total, es explicado únicamente con los contenidos de P del suelo, mostrando una relación inversa mayor con la relación Mg/K.

Tabla 5-8: Coeficientes de los seis primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 1 (clon RRIM 600) y propiedades químicas del suelo.

| Variable | PC 1 | PC 2 | PC 3 | PC 4 | PC 5 | PC 6 | Comunalidad Estimada |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------|
| Per | -0,025785 | -0,153143 | 0,284266 | 0,040482 | -0,153195 | 0,078696 | 0,136225 |
| PL1 | 0,067165 | 0,194468 | 0,779132 | -0,070385 | -0,049379 | -0,219365 | 0,704889 |
| PL2 | -0,044829 | -0,163534 | 0,868403 | -0,102941 | -0,103653 | 0,116612 | 0,817816 |
| PL3 | -0,051153 | 0,064589 | 0,848215 | 0,072401 | 0,054602 | -0,010847 | 0,734599 |
| pH | 0,246516 | 0,321428 | -0,049059 | 0,001020 | 0,770952 | 0,082471 | 0,767662 |
| MO | 0,024699 | 0,525712 | 0,014479 | -0,002239 | -0,703777 | -0,124860 | 0,788091 |
| P | 0,117920 | -0,008335 | -0,025177 | 0,128054 | 0,022981 | 0,736968 | 0,574656 |
| Ac.I | -0,277758 | -0,100055 | 0,054933 | -0,065273 | -0,877572 | 0,073464 | 0,869967 |
| Al.I | -0,080594 | -0,353336 | 0,002130 | 0,075527 | -0,778568 | 0,076318 | 0,749043 |
| Ca | -0,159596 | 0,106674 | -0,032740 | 0,961601 | 0,033007 | -0,008488 | 0,963761 |
| Mg | 0,136050 | 0,860445 | 0,035309 | 0,187672 | 0,165648 | -0,211136 | 0,867360 |
| K | -0,256594 | 0,888136 | -0,000630 | 0,055972 | 0,125276 | 0,241101 | 0,931583 |
| Na | -0,060515 | 0,673795 | -0,047301 | 0,472759 | 0,074092 | 0,267443 | 0,760415 |
| Ca/Mg | 0,834313 | 0,073471 | -0,033184 | -0,25526 | 0,129742 | 0,310517 | 0,880989 |
| Mg/K | 0,566317 | -0,229975 | 0,030563 | 0,160379 | 0,061886 | -0,637597 | 0,810619 |
| Ca/K | 0,972208 | -0,039919 | -0,011417 | -0,128387 | 0,131303 | -0,064973 | 0,984858 |
| Ca+Mg/K | 0,970633 | -0,067521 | -0,006418 | -0,096705 | 0,129136 | -0,145137 | 0,993822 |
| CE | 0,047811 | 0,665352 | 0,054172 | 0,093990 | 0,185311 | -0,050549 | 0,493643 |
| SB | 0,572361 | 0,520167 | -0,020332 | -0,319462 | 0,508665 | 0,063223 | 0,963377 |
| CICE | -0,188362 | 0,114808 | -0,026868 | 0,956243 | -0,054852 | 0,000248 | 0,966792 |
| Autovalor | 4,886211 | 3,940326 | 2,265667 | 1,799076 | 1,677202 | 1,191687 | |
| Vari. Total, % | 24,43106 | 19,70163 | 11,32833 | 8,99538 | 8,38601 | 5,95843 | |
| Vari. Acum., % | 24,43106 | 44,13269 | 55,46102 | 64,45640 | 72,84241 | 78,80085 | |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, MO: Materia Orgánica, MO: Materia Orgánica, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva. Valores superiores de 0,7 (valor absoluto) se muestran en negrilla.

Para las propiedades físicas se consideraron los cuatro primeros componentes principales que representan el 71,04% del total de la varianza, con autovalores superiores a 1, que manifiestan un intervalo aceptable (Tabla 5-9). El CP1 representó el 20,61% de la varianza total, donde muestra a las variables ADP y mesoporos como las de mayor influencia en dicho componente, las cuales se correlacionan negativamente, concluyendo que a menor cantidad de mesoporos menor será la cantidad de agua disponible en el suelo para las plantas, puesto que es en ellos en donde se encuentra la mayor cantidad de agua retenida (Montenegro, 1990). El CP2, con 18,89% de la varianza total, representó las producciones de látex, las cuales solo se relacionan entre ellas, demostrando que al aumentar o disminuir una de éstas, ocurrirá lo mismo con las demás; ello sucede gracias a que la mayor producción y rendimiento del cultivo está supeditada a la época de mayor precipitación, siendo la característica que impera en ésta planta

(SENA, 2006). El CP3 representó el 16,74% de la varianza total, expone a los macroporos del suelo como la propiedad más influyente, evidenciando relación inversa con microporos. El CP4 representó el 14,78% de la varianza total, mostrando la relación inversa existente entre el Limo y la Arcilla (variables que representan en mayor instancia a la textura del suelo en el lote 1). Se observó que la comunalidad para las variables fue mayor a 0,5, pero no fue el caso del Per, que al igual que en las variables químicas, éste parámetro productivo presentó el menor valor, indicando que sigue siendo poco representativo en los componentes principales analizados.

Tabla 5-9: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 1 (clon RRIM 600) y propiedades físicas del suelo.

| Variable | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Comunalidad Estimada |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------|
| Per | 0,081583 | 0,261417 | 0,274401 | 0,137998 | 0,169334 |
| PL1 | 0,079179 | 0,806101 | -0,079818 | -0,004110 | 0,662455 |
| PL2 | 0,008460 | 0,856191 | 0,272408 | -0,033759 | 0,808481 |
| PL3 | -0,067254 | 0,841401 | -0,183534 | 0,027034 | 0,746894 |
| ADP | -0,934184 | -0,028294 | 0,012478 | -0,015703 | 0,873903 |
| Arena | 0,159473 | -0,117309 | -0,626275 | -0,445313 | 0,629717 |
| Limo | -0,055641 | 0,026359 | 0,160130 | 0,961817 | 0,954524 |
| Arcilla | -0,087675 | 0,082633 | 0,416990 | -0,759138 | 0,764685 |
| Da | 0,541961 | -0,086711 | 0,120594 | 0,341546 | 0,432437 |
| Macroporos | 0,356381 | 0,027916 | -0,830443 | 0,006989 | 0,817472 |
| Mesoporos | -0,897541 | -0,001512 | 0,164568 | 0,077475 | 0,838667 |
| Microporos | 0,523847 | -0,028876 | 0,737470 | -0,086345 | 0,826567 |
| Autovalor | 2,47437 | 2,26747 | 2,00951 | 1,77378 | |
| Vari. Total, % | 20,61978 | 18,89559 | 16,74594 | 14,78150 | |
| Vari. Acum., % | 20,61978 | 39,51536 | 56,26131 | 71,04281 | |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, ADP: %Agua Disponible para las plantas, D.a.: Densidad aparente. Valores superiores de 0,7 (valor absoluto) se muestran en negrilla.

Para el lote 2, en cuanto a propiedades químicas, se presentaron cinco componentes principales, que explicaron el 74,90% de la varianza total (Tabla 5-10). Se observó que los valores de la comunalidad del Per y del P fueron los de menor valor, indicando que éstas variables son poco representativas. El CP1 con 27,31% de la varianza total, es explicado principalmente por CICE, Ac.I., Al.I., MO y pH, mostrando una mayor relación inversa del pH con las anteriores; esto es debido a que pH's más elevados permiten la mayor disponibilidad de nutrientes en la solución y en el complejo de cambio del suelo como las bases, se reduce la concentración de Al^{+3} e H^{+} y, de igual forma, mayores contenidos de MO favorecen pH más bajos en el suelo, debido a que la MO es fuente de sustancias húmicas y no húmicas que posibilitan la presencia de compuestos que ayudan a acidificar el suelo (Zapata y Osorio, 2010). El CP2 representó el 20,38% de la varianza total, mostrando una relación directa entre Mg/K, Ca/K y Ca+Mg/K, debido a que el K es el ión común en éstas relaciones iónicas.

El CP3, con 12,84% de la varianza total, muestra al Ca, a la relación Ca/Mg y a la SB, como las variables de mayor influencia en éste componente; cabe mencionar que el Ca es el catión predominante en éstas dos últimas variables mencionadas, debido a su mayor contenido en el suelo. El CP4 evidenció un 8,66% de la varianza total, relacionando las producciones de látex PL1 y PL2 negativamente pero de forma directa entre ellas, aunque mostraron igual relación con Per y PL3 pero en menor porcentaje. Por último, el CP5 con 5,69% de la varianza total no presenta alguna variable con valor absoluto por encima de 0.7, pero muestra al Mg del suelo como la variable de mayor influencia e interés en éste componente (valor absoluto = 0,65).

En lo referente a las propiedades físicas del lote 2 (Tabla 5-11), se consideraron cuatro componentes principales, que sumados explicaron el 72,10% de la varianza total. De igual manera, el Per mostró el menor valor de la comunalidad, concluyendo que ésta variable en todos los casos, es la menos representativa. El CP1 con el 27,68% de la varianza total presenta mayor influencia de las variables macro, meso y microporos, correlacionándose directamente los meso y microporos, e inversamente ellos con los macroporos; se concluye que suelos con mayor cantidad de mesoporos y microporos, ahonda en mayor agua disponible para las plantas. El CP2, que hace referencia al 19,22% de la varianza total, donde se presenta a PL1 y PL2 como los parámetros productivos de mayor dominio en dicho componente, con correlación directa entre ellos, a pesar de expresarse una menor correlación con PL3 y Per; se ratifica la correlación directa solo entre parámetros productivos. El CP3 representa el 14,61% de la varianza total, explicando la relación inversa entre Limo y Arcilla. El CP4, con 10,56% de la varianza total, solo se ve influenciado por la Da, de forma inversa, sin presentar algún tipo de relación con las demás variables.

Tabla 5-10: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 2 (clon FX 3864) y propiedades químicas del suelo.

| Variable | PC 1 | PC 2 | PC 3 | PC 4 | PC 5 | Comunalidad Estimada |
|----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------|----------------------|
| Per | -0,085804 | 0,100560 | -0,005041 | -0,468234 | -0,284805 | 0,317857 |
| PL1 | -0,036704 | -0,106603 | -0,064556 | -0,842254 | 0,075707 | 0,732001 |
| PL2 | 0,053898 | 0,033559 | -0,103129 | -0,882749 | -0,000193 | 0,793912 |
| PL3 | 0,299417 | -0,275348 | -0,290523 | -0,554276 | -0,140528 | 0,576841 |
| pH | 0,743343 | 0,014627 | 0,190768 | 0,088514 | 0,357166 | 0,724568 |
| MO | -0,727779 | 0,206367 | -0,070589 | 0,019171 | 0,182862 | 0,611038 |
| P | 0,094311 | -0,123818 | 0,577436 | 0,103984 | -0,105171 | 0,379531 |
| Ac.I | -0,889202 | -0,094602 | -0,336224 | 0,016975 | -0,039057 | 0,914489 |
| Al.I | -0,869182 | -0,023201 | -0,370043 | 0,039553 | -0,047368 | 0,896755 |
| Ca | 0,062919 | 0,307268 | 0,903407 | 0,096624 | 0,175823 | 0,954767 |
| Mg | -0,072582 | 0,480972 | 0,247211 | 0,022048 | 0,658197 | 0,731425 |
| K | -0,282542 | -0,696911 | 0,247056 | -0,132478 | 0,220848 | 0,692875 |
| Na | 0,168904 | -0,562637 | 0,292447 | 0,106555 | -0,251742 | 0,505342 |
| Ca/Mg | 0,123646 | 0,030553 | 0,8911 | 0,09144 | -0,197339 | 0,857584 |
| Mg/K | -0,051086 | 0,942212 | -0,060172 | -0,005228 | 0,130216 | 0,910977 |
| Ca/K | 0,0351 | 0,844766 | 0,474271 | 0,05686 | 0,001751 | 0,943032 |
| Ca+Mg/K | 0,017891 | 0,893641 | 0,37609 | 0,045512 | 0,029201 | 0,943281 |
| CE | -0,548787 | 0,149495 | 0,084518 | 0,104201 | -0,540697 | 0,633871 |
| SB | 0,441403 | 0,117274 | 0,833000 | 0,056587 | 0,210351 | 0,949929 |
| CICE | -0,934247 | -0,046175 | 0,140982 | 0,046993 | 0,118482 | 0,911072 |
| Autovalor | 5,462941 | 4,077785 | 2,568291 | 1,733268 | 1,138861 | |
| Vari. Total, % | 27,31470 | 20,38893 | 12,84146 | 8,66634 | 5,69431 | |
| Vari. Acum., % | 27,31470 | 47,70363 | 60,54509 | 69,21143 | 74,90573 | |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, MO: Materia Orgánica, MO: Materia Orgánica, C.E.: Conductividad Eléctrica, SB: Saturación de Bases, CICE: Capacidad de Intercambio Catiónica Efectiva. Valores superiores de 0,7 (valor absoluto) se muestran en negrilla.

Tabla 5-11: Coeficientes de los cinco primeros componentes principales para los parámetros productivos del lote 2 (clon FX 3864) y propiedades físicas del suelo.

| Variable | CP 1 | CP 2 | CP 3 | CP 4 | Comunalidad Estimada |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------------|
| Per | 0,020282 | 0,460508 | -0,117429 | 0,281168 | 0,305324 |
| PL1 | 0,105358 | 0,825207 | 0,065707 | 0,157082 | 0,721059 |
| PL2 | -0,170723 | 0,876282 | 0,021400 | 0,016311 | 0,797740 |
| PL3 | -0,176633 | 0,645216 | 0,112674 | -0,491872 | 0,702136 |
| ADP | 0,699445 | -0,062886 | -0,052018 | 0,505319 | 0,751231 |
| Arena | 0,014628 | 0,129337 | -0,674766 | -0,258109 | 0,538872 |
| Limo | 0,107361 | 0,039306 | 0,987107 | 0,052291 | 0,990185 |
| Arcilla | -0,154550 | -0,155285 | -0,776721 | 0,135879 | 0,669758 |
| Da | -0,056872 | -0,123922 | -0,125963 | -0,832375 | 0,727305 |
| Macroporos | -0,982418 | 0,042163 | -0,117927 | -0,005988 | 0,980865 |
| Mesoporos | 0,921217 | -0,080592 | 0,051019 | 0,104651 | 0,868690 |
| Microporos | 0,739892 | 0,028305 | 0,175947 | -0,140367 | 0,598901 |
| Autovalor | 3,322017 | 2,307399 | 1,754306 | 1,268344 | |
| Vari. Total, % | 27,683480 | 19,228320 | 14,619220 | 10,569530 | |
| Vari. Acum., % | 27,683500 | 46,911800 | 61,531000 | 72,100600 | |

Per: Perímetro de árbol, PL: Producción de Látex, ADP: %Agua Disponible para las plantas, D.a.: Densidad aparente. Valores superiores de 0,7 (valor absoluto) se muestran en negrilla.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concuerda con lo estipulado por Santi *et al.*, (2012), quienes indican que el uso de técnicas de reducción de variables, como el caso del análisis anterior, es importante para seleccionar los componentes principales, identificando e interpretando así la distribución de las variables originales de mayor peso.

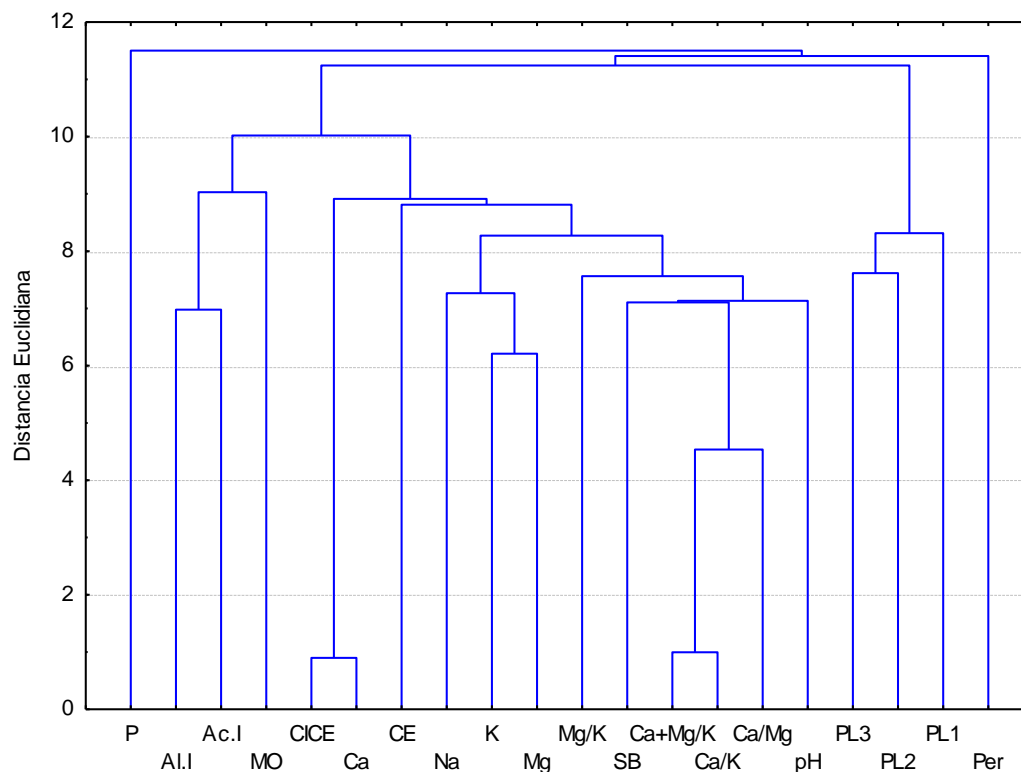
5.6.2 Análisis de conglomerados ó clúster

Las representaciones gráficas de los resultados ilustrados por medio de dendrogramas, obtenidos con el método de la media del grupo y el método de Ward, se muestran en las Figuras 5-5, 5-6, 5-7 y 5-8, tanto para el lote 1 como para el lote 2. El método de Ward posibilita una confiable discriminación de las variables entre grupos.

Para las propiedades químicas del lote 1 (clon RRIM 600), al hacer corte horizontal en el dendrograma (Figura 5-5) a una distancia Euclidiana con valor de 10, se pueden identificar tres grupos de variables relacionadas entre ellas, enumerándose todos los grupos de acuerdo a su cercanía al origen. El primer grupo se relaciona o vinculan con la presencia de cationes del suelo, formado éste grupo por relaciones iónicas, CICE, Ca, SB, pH, Mg, K y Na. El segundo grupo se compone por las producciones de látex (PL1, PL2, PL3), que muestran únicamente correlación entre ellas; el tercer grupo se constituye principalmente de la relación entre las variables que describen la acidez del suelo (Al.I., Ac.I.) y MO, las cuales están en función del primer grupo. Se observa dentro del

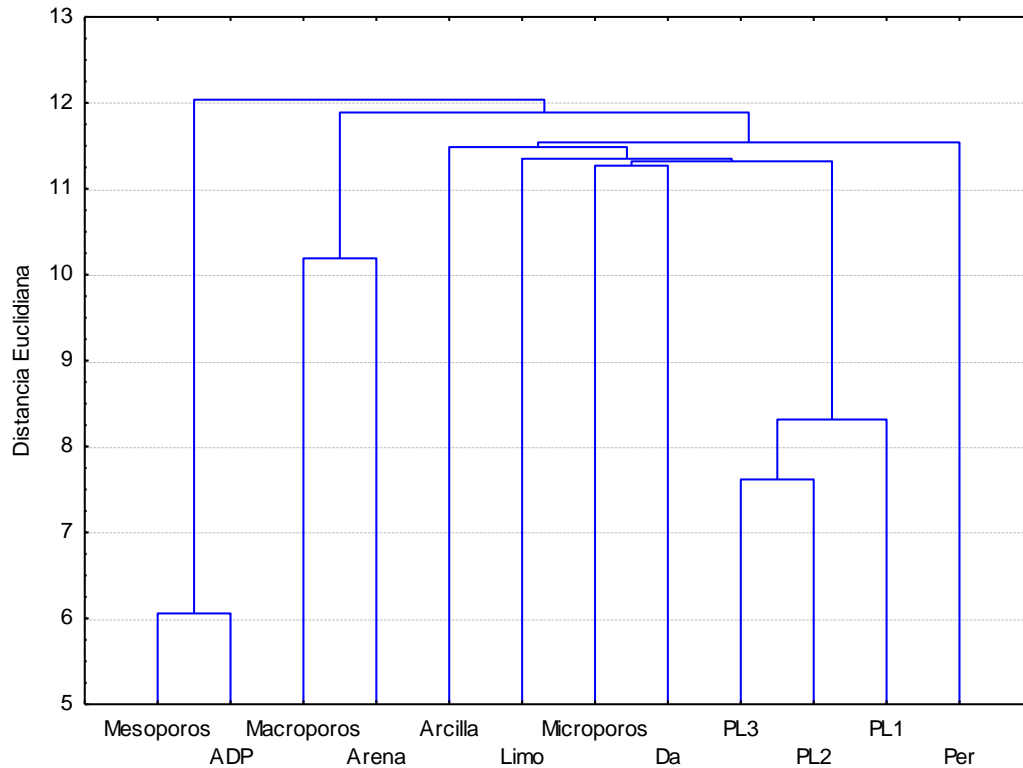
dendrograma, a una distancia Euclidiana por encima del valor de 11, como Per de la planta y P del suelo son variables poco representativas.

Figura 5-5: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades químicas del suelo.



En cuanto a las propiedades físicas de éste lote, en el clúster se identificaron dos grupos a un valor de distancia Euclidiana inferior a 12 (Figura 5-6). El primer grupo está comprendido por las variables que actúan en pro de la disponibilidad de agua para el cultivo (mesoporo y ADP), indicando y corroborando que en esos poros predomina la mayor cantidad de agua disponible para las plantas, además de la relación entre los macroporos y la arena, que evidencia y ratifica que al haber mayores contenidos de tamaño de partícula tipo arena, será mayor la cantidad de macroporos en el suelo. El segundo grupo relaciona las producciones de látex (PL1, PL2, PL3), las cuales están en función de las Da y los microporos, al igual que en función del limo y la arcilla; la densidad aparente del suelo está en función de la textura del suelo, siendo mayor a medida que se cuenta con partículas de suelo más finas. Las demás variables mostraron menor representación.

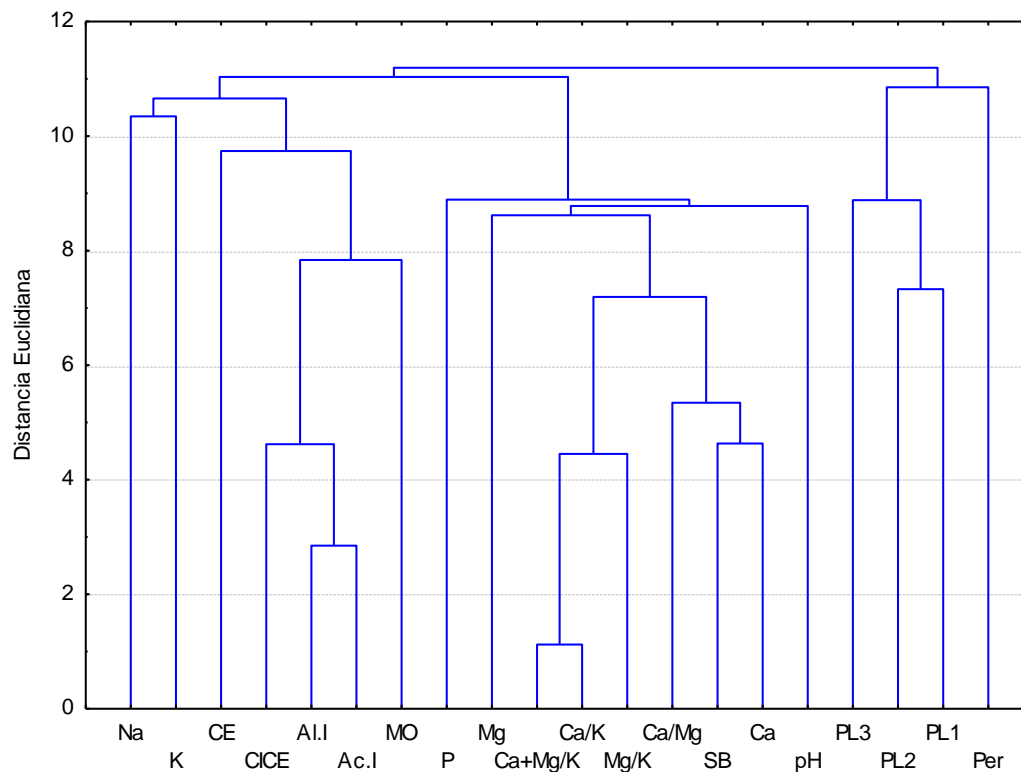
Figura 5-6: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades físicas del suelo.



El análisis de conglomerados de las propiedades químicas del lote 2 (Figura 5-7), permitió identificar tres grupos, a una distancia Euclidiana por debajo del valor de 10. El primero asoció en mayor medida a las relaciones iónicas del suelo (Ca/Mg, Mg/K, Ca/K, (Ca+Mg)/K), SB, Ca, Mg, P y pH. El segundo grupo se encuentra compuesto por la correlación entre las variables que describen la acidez del suelo (Al.I. y Ac.I.) con CICE, MO y CE. El tercer grupo relacionó únicamente las producciones de látex las cuales están en función del Per del árbol. El Na y K presentan la mejor significancia en éste lote respecto a las demás variables analizadas; en éste clúster, a una distancia Euclidiana por encima del valor de 10, las bases del suelo Na y K ratifican su relación directa, al igual que lo encontrado en el análisis de componentes principales.

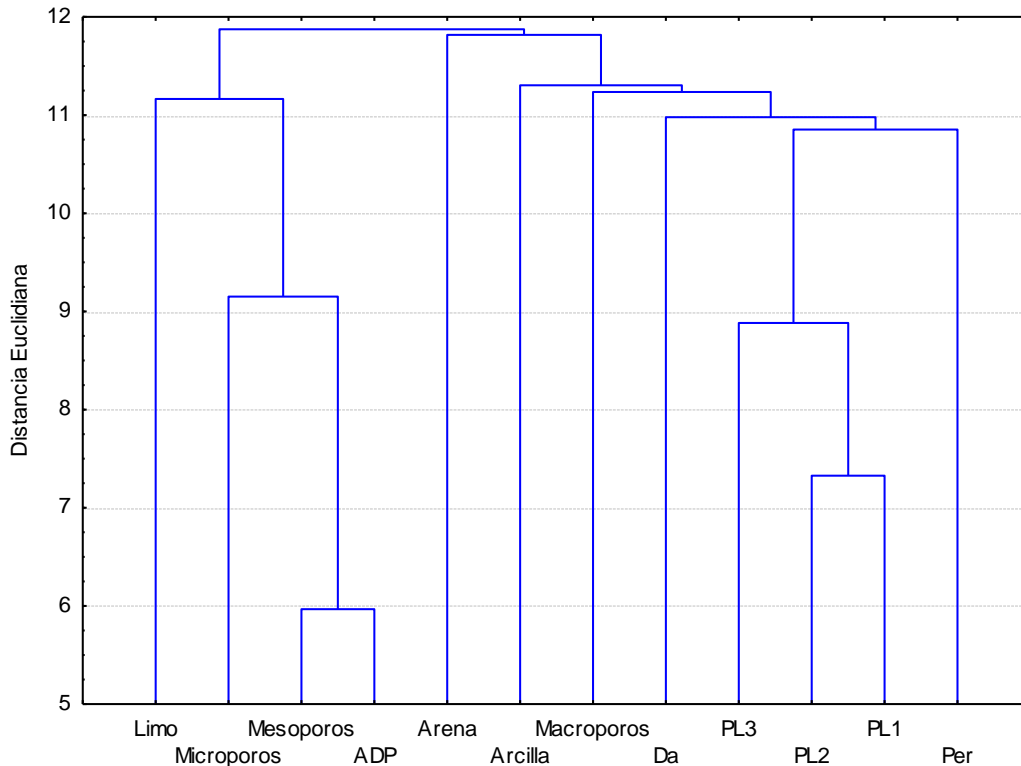
Cuando se presentan variables con mayor distancia Euclidiana y separación en forma independiente es necesario considerar un mayor número de grupos para dar mayor solución interpretable a éste tipo de fenómenos, pues con esto se informa la inestabilidad presente entre dichas variables (Ramos *et al.*, 2007; Casa y Castrignanò, 2008).

Figura 5-7: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades químicas del suelo.



El clúster para las propiedades físicas del lote 2, presenta dos grupos bien definidos, a una distancia Euclidiana por debajo del valor de 12 (Figura 5-8). El primer grupo se encuentra formado por las variables ADP, mesoporos, microporos y limo, ratificándose en éste lote la misma relación encontrada en el lote1 respecto de ADP con mesoporos. De igual manera, el segundo grupo se compone por los parámetros productivos PL1, PL2 y PL3, tal como se evidenció en el lote 1, las cuales están en función del Per del árbol de caucho, y todas ellas en función de la Da.

Figura 5-8: Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades físicas del suelo.



5.6.3 Análisis de factores de componentes principales

El análisis de factores de componentes principales (AFCP) se realizó con la finalidad de establecer relaciones entre los parámetros productivos del caucho y las propiedades químicas y físicas del suelo (Figuras 5-9, 5-10, 5-11 y 5-12). La proporción de la variación de cada variable explicada en los componentes principales relacionados es la suma de sus correlaciones al cuadrado; de allí que las variables que mejor se explican, se encuentran ubicadas por encima de las correlaciones de 0,5, como punto de referencia al 5% de la significancia, mientras que las menos explicadas se ubicarán cerca del origen (Hernández *et al.*, 2003).

En la Figura 5-9 se observan como las propiedades químicas analizadas formaron grupos definidos, acorde con lo obtenido en los análisis de componentes principales y análisis clúster referente al lote 1. En CP1 y CP2, las relaciones iónicas (Ca/Mg, Ca/K, (Ca+Mg)/K) muestran fuerte relación, mientras que éstas con Ac.I. y Al.I., presentan relación inversa debido a su lejanía. En CP1 y CP3 al igual que en CP2 y CP3 se destaca la fuerte relación sólo entre las producciones de látex (PL1, PL2, PL3) para el caso del clon RRIM 600; las variables Per del árbol de caucho y P disponible mostraron correlación no significativa.

Figura 5-9: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades químicas del suelo, mediante rotación de Varimax.

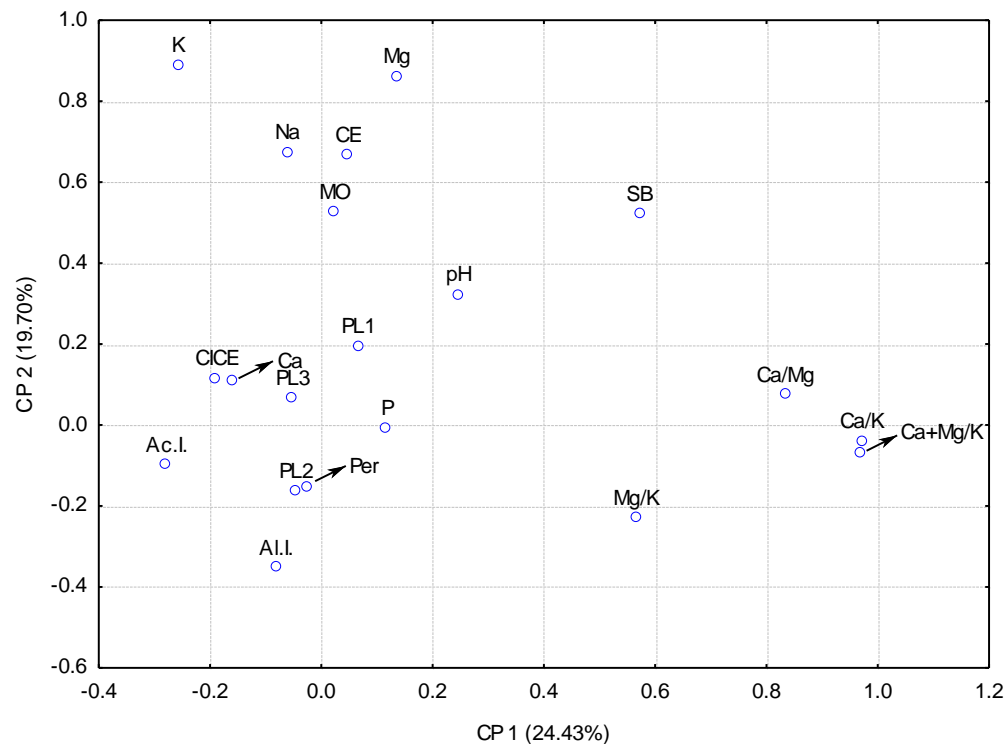
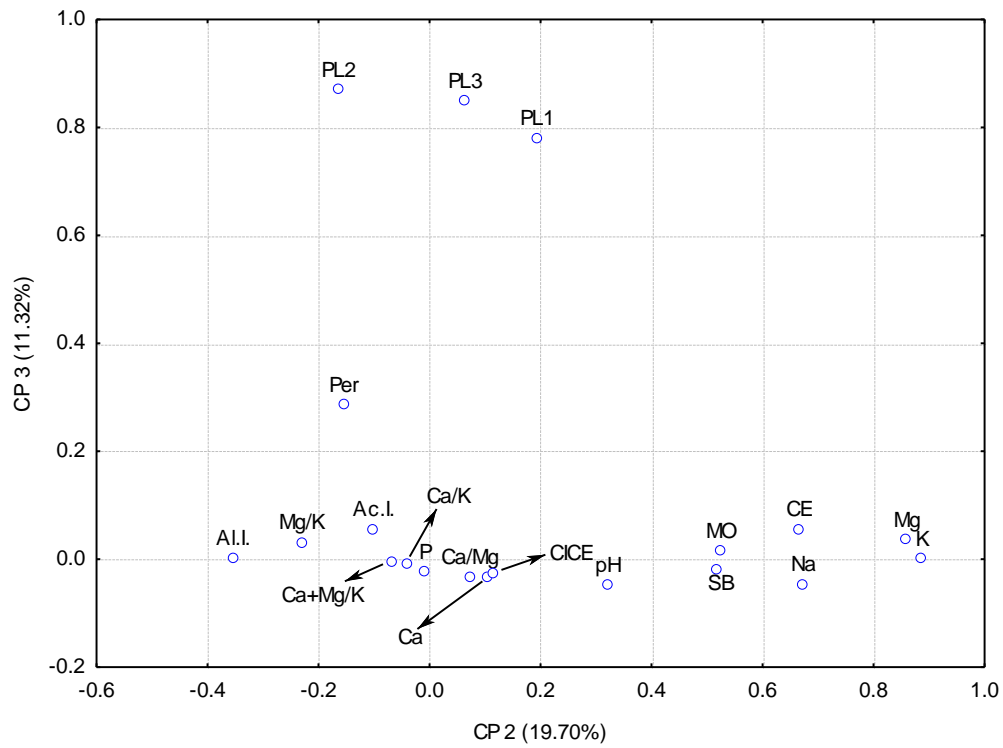
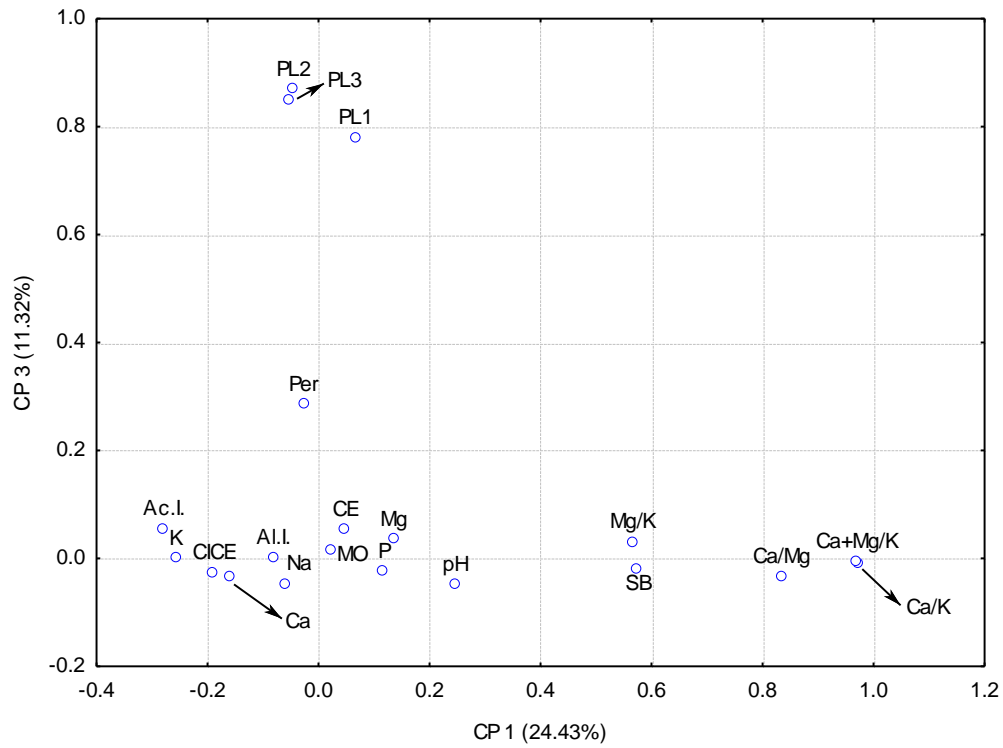


Figura 5-9. Continuación...



En el AFPC (Figura 5-10) de las propiedades físicas, se observan los tres grupos obtenidos en el análisis clúster para lote 1, al analizarse los tres primeros componentes principales y sus distintas interacciones. Se destacan entonces las relaciones entre ADP y mesoporos para un primer grupo, producciones de látex (PL1, PL2, PL3) en un segundo grupo, y macroporos con arena como tercer grupo; se muestra relación inversa entre los macroporos y microporos para las interacciones CP1-CP3 y CP2-CP3. Las variables Arcilla, Limo, microporos, Da y Per exhibieron correlación no significativa.

Figura 5-10: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon RRIM 600 (lote 1) y propiedades físicas del suelo, mediante rotación de Varimax.

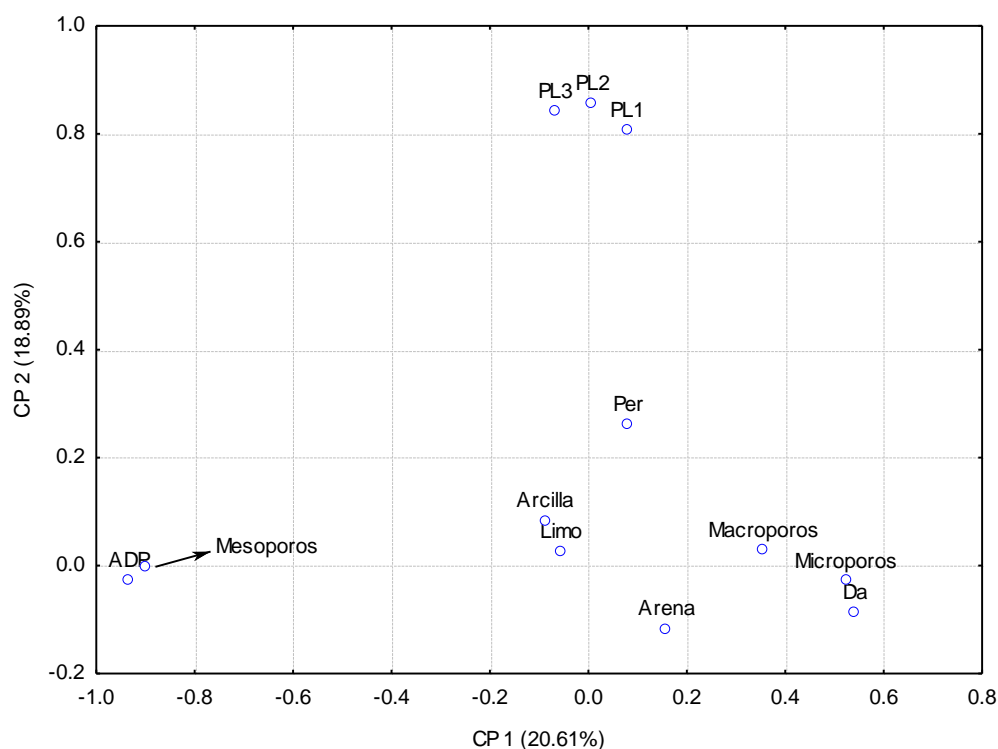
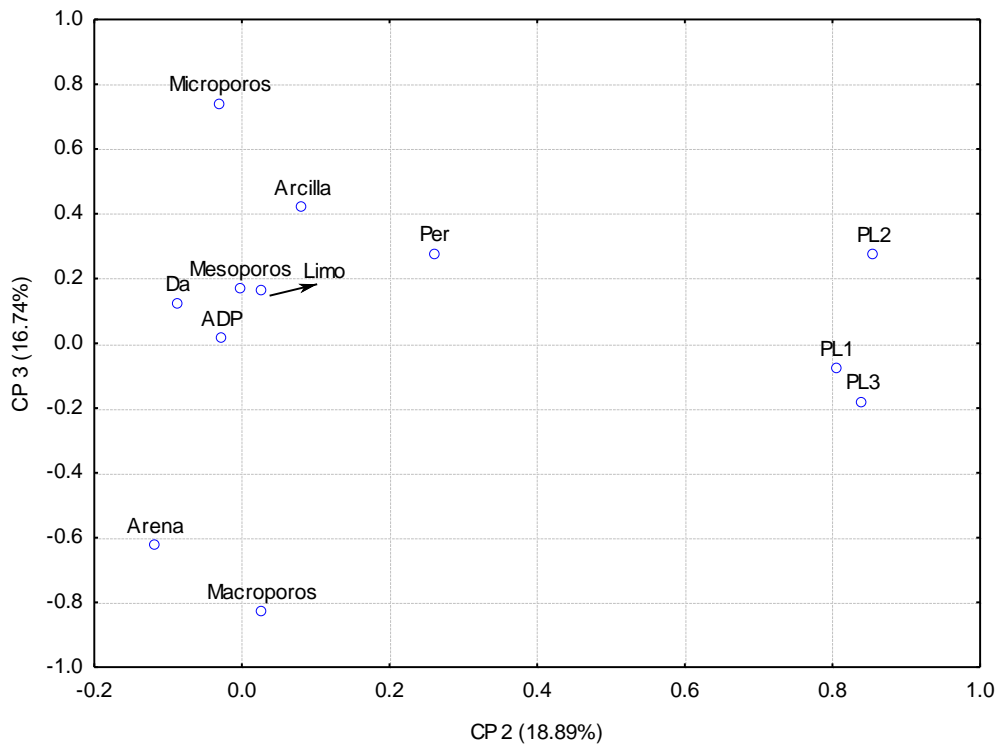
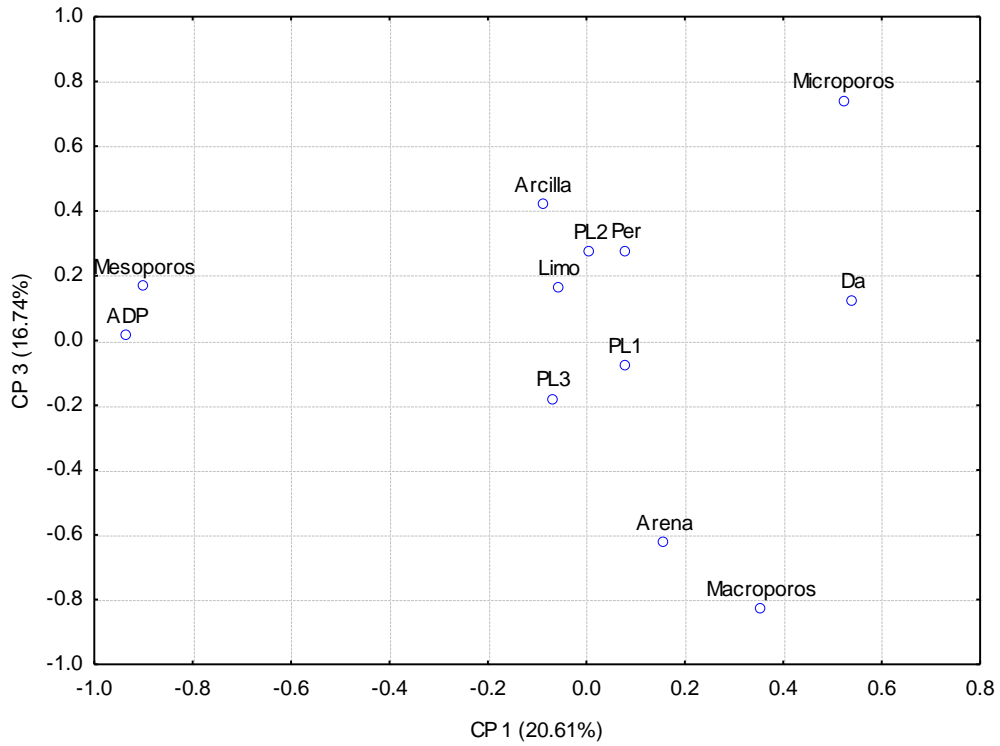


Figura 5-10. Continuación...



Para el AFCP (Figura 5-11) del lote 2, al analizarse los dos primeros componentes principales se observa dos grupos definidos; un primer grupo contenido por las variables Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K, y un segundo grupo formado por CICE, Ac.I., y Al.I., con fuerte relación entre ellas para cada caso. En las interacciones CP1-CP3 y CP2-CP3 se presenta un grupo formado por las variables Ca, Ca/Mg y SB, mostrando su fuerte relación debido a los mayores contenidos del ión Ca. Las variables Na, K, P y Per exhibieron correlación muy baja o no significativa.

Figura 5-11: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades químicas del suelo, mediante rotación de Varimax.

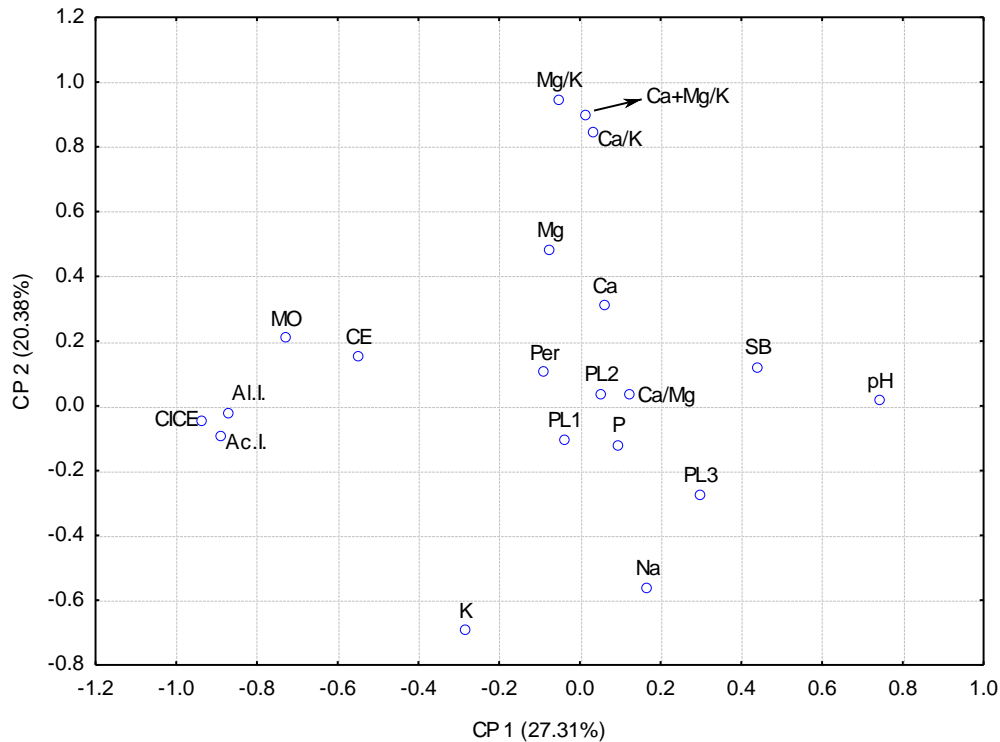
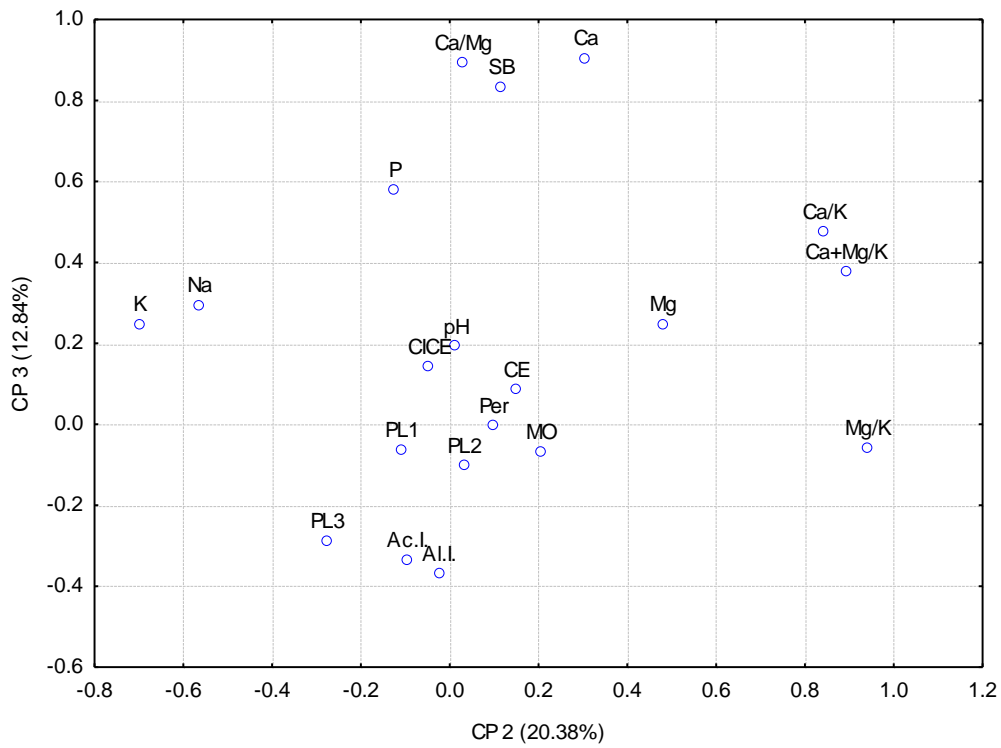
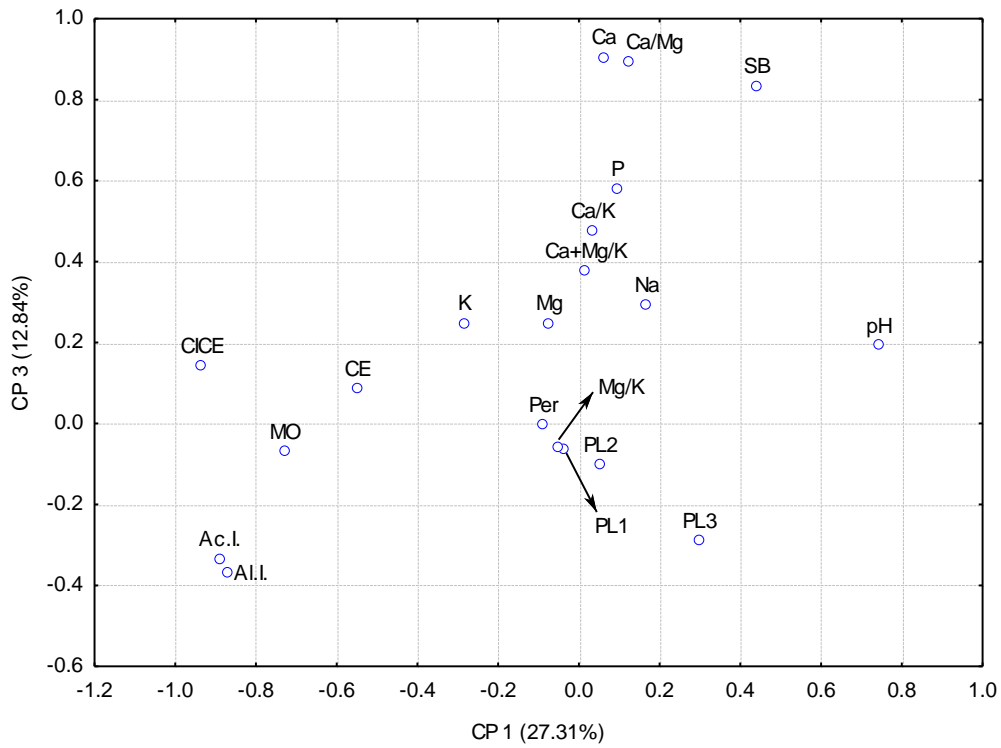


Figura 5-11. Continuación...



El AFPC (Figura 5-12) para el lote 2, se evidencia la formación de dos grupos expresados igualmente en el análisis clúster. Para todas las interacciones entre los tres primeros componentes principales se presenta un grupo que muestra fuerte relación entre ADP y mesoporos. Para las interacciones CP1-CP3 y CP2-CP3, las producciones de látex (PL1, PL2, PL3) evidencian su fuerte relación, mientras se presenta una relación inversa entre el limo respecto a la arcilla y la arena. Per evidenció una correlación estadística no significativa.

Figura 5-12: Análisis de factores de componentes principales para los parámetros productivos del clon FX 3864 (lote 2) y propiedades físicas del suelo, mediante rotación de Varimax.

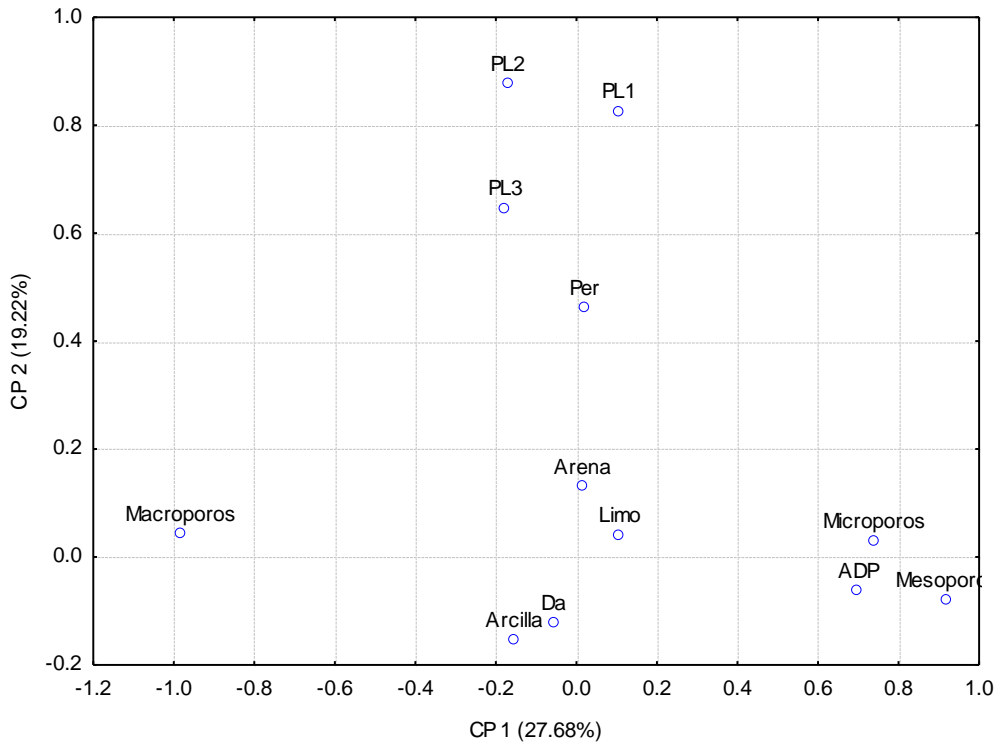
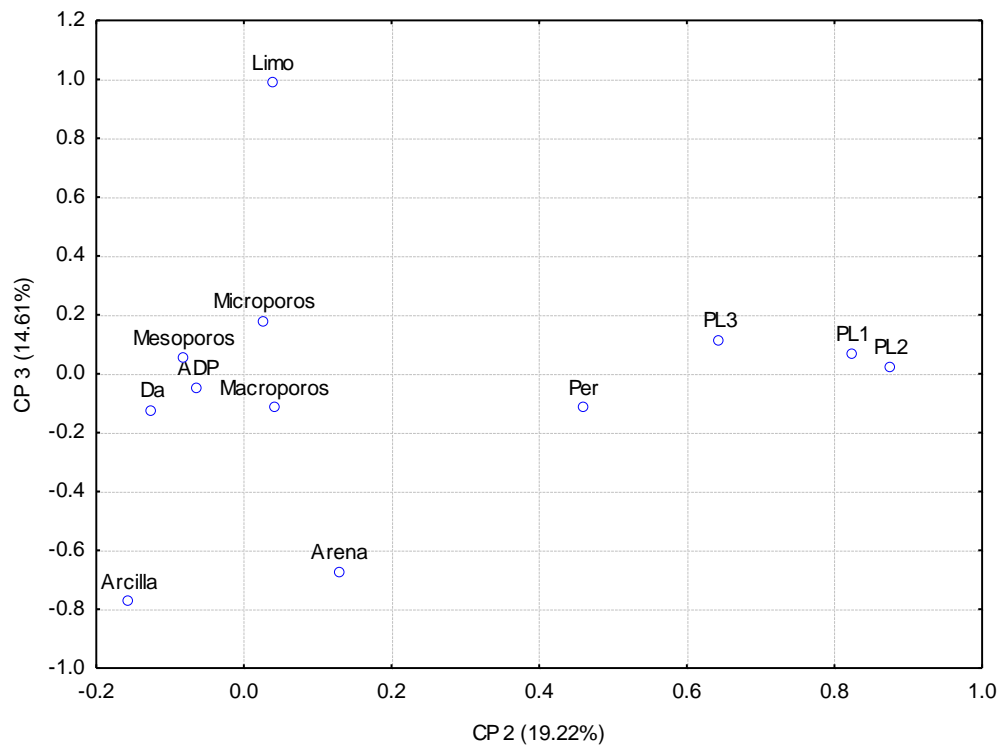
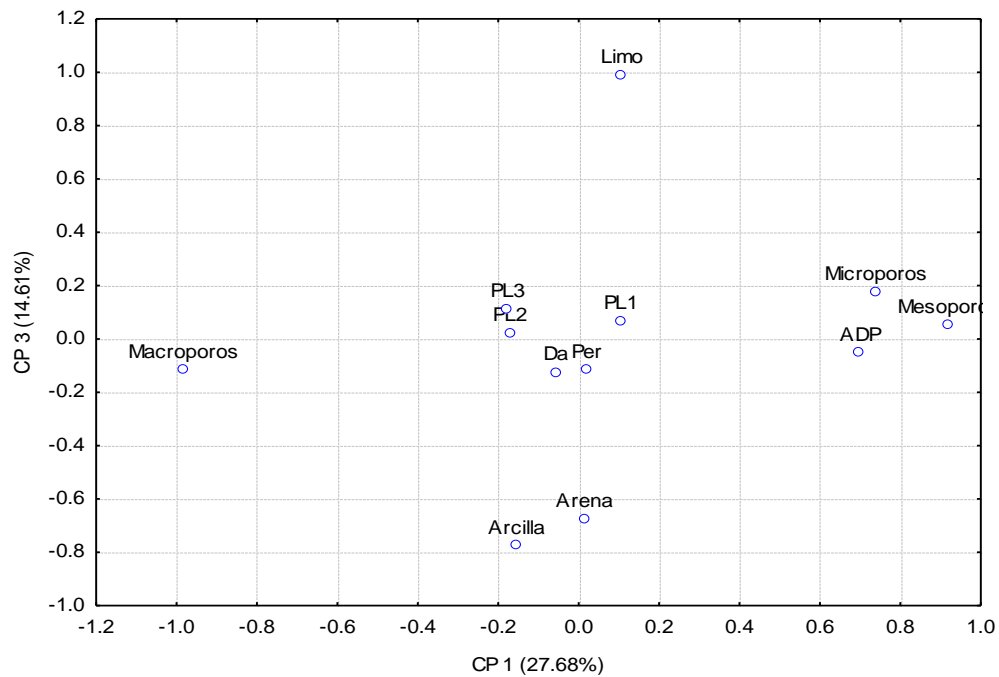


Figura 5-12. Continuación...



6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

Las propiedades físicas y químicas del suelo analizadas presentaron dependencia espacial; solamente el Ca del suelo en el lote 2, al igual que Per en el lote 1 y PL2 en ambos lotes, presentaron Efecto Pepita Puro, demostrando discontinuidad entre muestras ovariabilidad espacial no detectada durante el muestreo realizado.

La mayoría de las propiedades químicas y físicas analizadas presentaron rangos por encima de la distancia mínima de muestreo establecida, indicando la validez del diseño y número de muestras empleados para el estudio.

El porcentaje de microporos y arena del suelo son las variables físicas más preponderantes en cuanto a la Porosidad Total y la Textura del suelo para ambos lotes evaluados.

Los parámetros productivos de los clones RRIM 600 y FX 3864 mostraron correlaciones lineales de grado moderado y alto entre ellos mismos. En ambos lotes el Ca del suelo presentó mayor número de correlaciones lineales con propiedades químicas como SB, CICE y relaciones iónicas Ca/Mg, Ca/K, (Ca+Mg)/K.

Para ambos lotes, el ADP presentó correlación inversa con Da y macroporos; de igual forma el porcentaje de limo presenta éste tipo de correlación con el porcentaje de arena y arcilla del suelo.

Los mapas de contorno permitieron observar la variabilidad espacial de los parámetros productivos y de las propiedades físicas y químicas del suelo para cada lote evaluado; se resalta mayor número de áreas con deficiencia de nutrientes Ca, Mg, K, P, y zonas con contenidos muy bajos de Na, mostrando la poca o nula importancia de éste nutriente para el caucho.

El análisis de CP, análisis clúster y el análisis de factores por componentes principales muestran a las variables Ca/Mg, Ca/K y (Ca+Mg)/K como las de mayor influencia en el CP1 del lote 1, demostrando la importancia que tiene la aplicación de bases al suelo con el fin de para evitar desbalance de nutrientes.

Los resultados de los análisis de CP, clúster y de factores por componentes principales indicaron que las variables Ca/Mg, Ca/K y (Ca+Mg)/K, son las que tienen mayor influencia en el CP1 del lote 1, demostrando la importancia que tiene la aplicación de bases al suelo con el fin de evitar déficit de nutrientes para el cultivo.

El parámetro productivo Per (perímetro del árbol de caucho) fue la variable que presentó menor o nula correlación con las propiedades físicas y químicas del suelo. Se observa que las mayores producciones de látex están en función de éste parámetro productivo. De manera global, las producciones de látex (PL1, PL2 y PL3) presentaron correlación únicamente entre ellas mismas.

Las variables analizadas (parámetros productivos del caucho, propiedades químicas y físicas del suelo) presentan estructura de dependencia espacial, que permite su mapeamiento, por medio de técnicas geoestadísticas, posibilitando la identificación de zonas de manejo por sitio específico para el cultivo de caucho.

6.2 Recomendaciones

Es necesario implementar nuevas investigaciones con el fin de identificar la influencia directa de la densidad aparente sobre parámetros productivos del caucho, como son la producción y el perímetro.

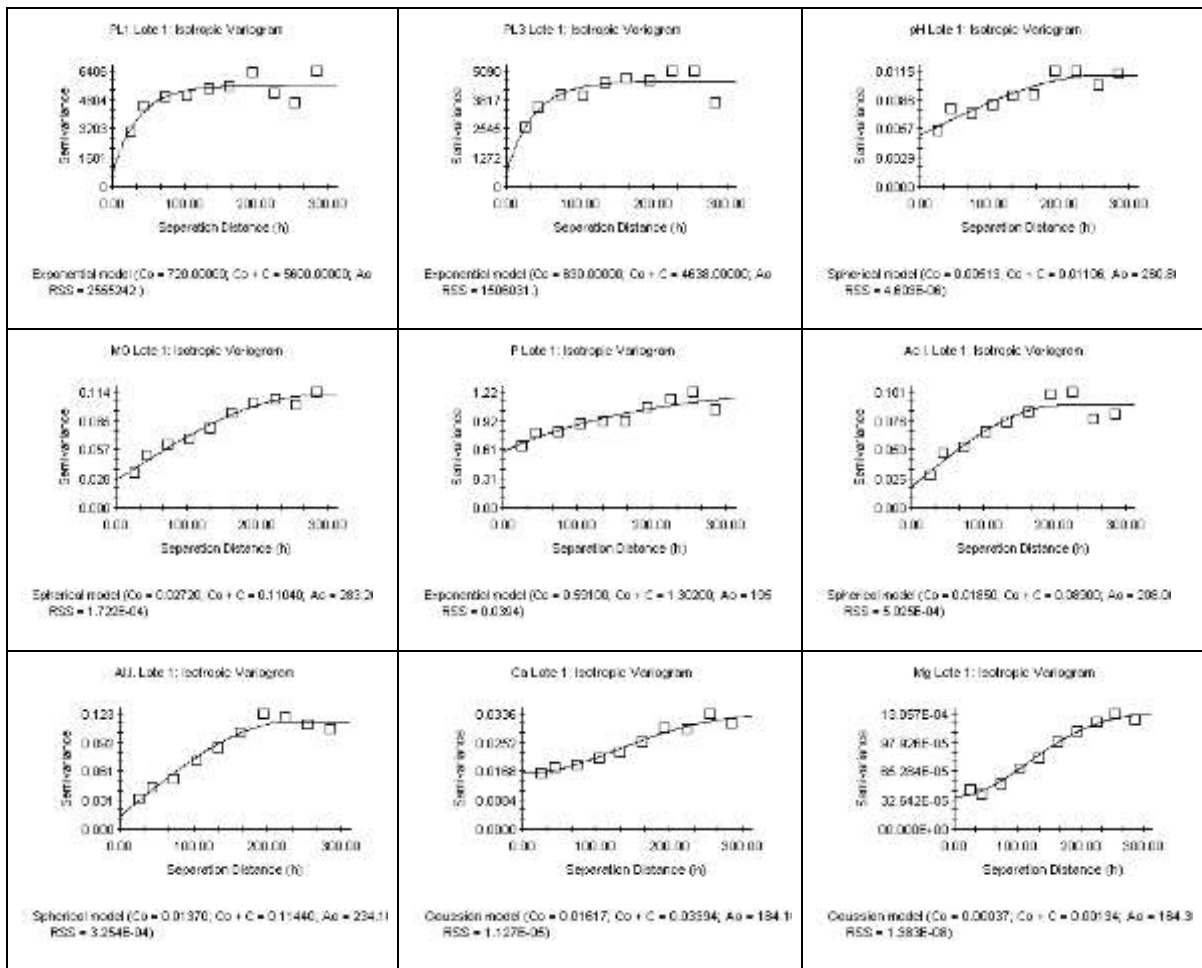
Se recomienda en posteriores estudios evaluar la influencia del Calcio en el suelo, sobre la producción de látex en cultivares de caucho para el clon RRIM 600.

Se recomienda realizar el muestreo de suelos acompañado con el muestreo de tejido foliar, con el objetivo de analizar la posible relación entre variables edáficas y variables foliares, con el fin de establecer prácticas de manejo por sitio específico más detalladas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis geoestadístico, es recomendable que se implementen las distancias de los rangos encontrados para cada atributo, con el propósito de lograr una adecuada caracterización de la variabilidad espacial del suelo en términos de los atributos estudiados y por ende, lograr un mejor manejo de la aplicación de nutrientes y correctivos por sitio específico.

Anexos

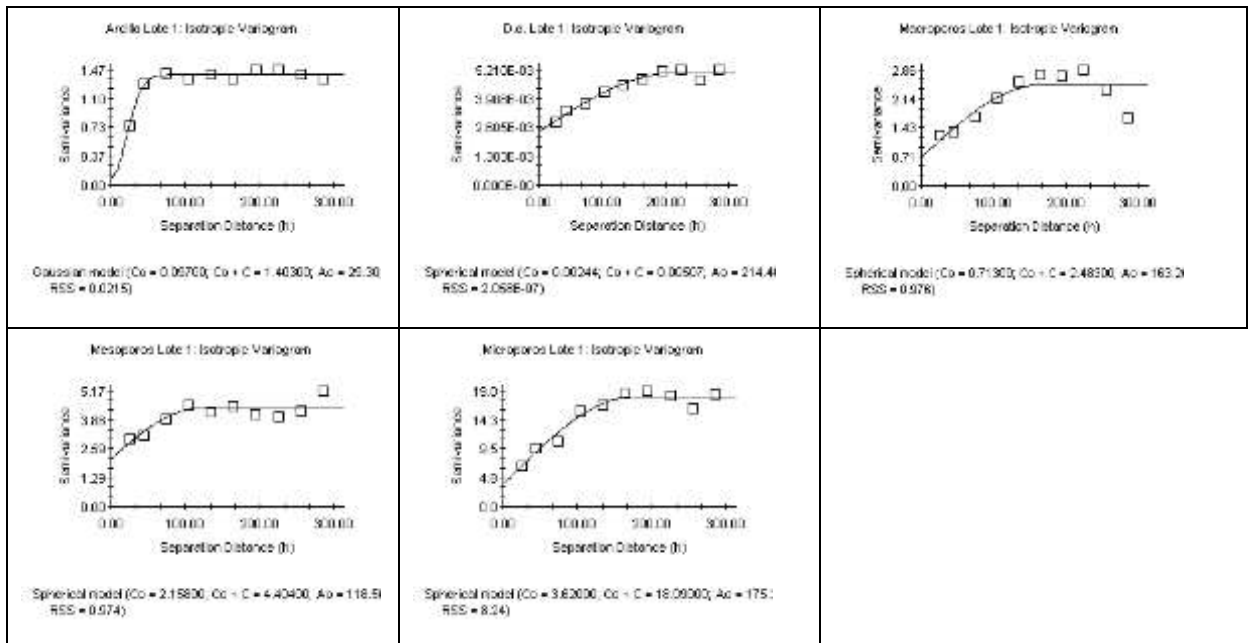
Anexo 1: Semivariogramas obtenidos para cada propiedades productivo del caucho y para cada propiedad química y física del suelo para el lote 1 (Clon RRIM 600).



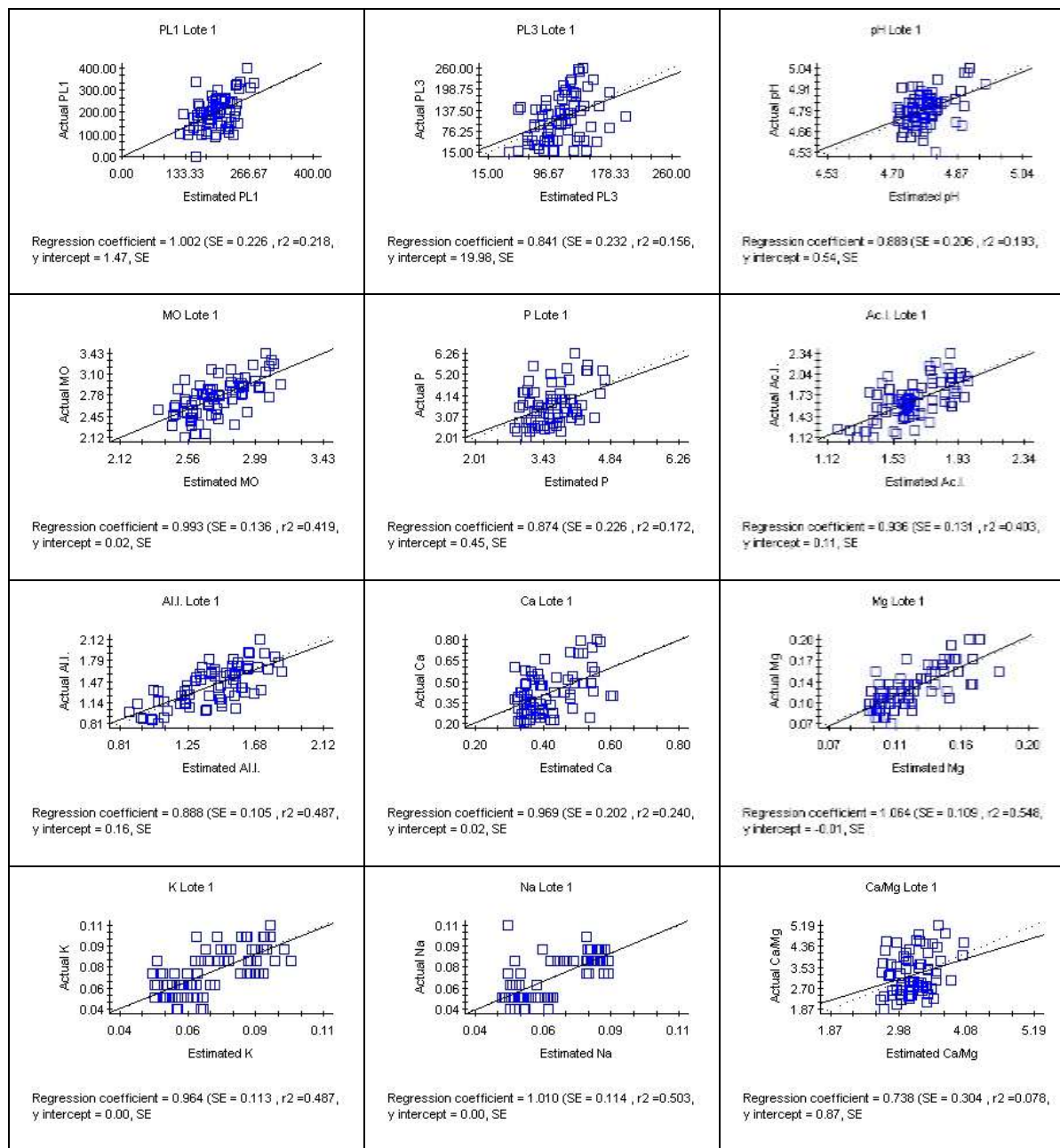
Anexo 1. Continuación...

| | | |
|---|---|--|
| <p>K/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Gaussian model (Co = 0.00011; Co + C = 0.00048; Ao = 122.7 RSS = 2.080E-09)</p> | <p>No/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Gaussian model (Co = 0.00010; Co + C = 0.00056; Ao = 185.0 RSS = 1.701E-09)</p> | <p>Ca/Mg/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Spherical model (Co = 0.00106; Co + C = 0.68200; Ao = 49.20; RSS = 0.0205)</p> |
| <p>Mg/K/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Gaussian model (Co = 0.01010; Co + C = 0.05870; Ao = 21.90; RSS = 7.505E-04)</p> | <p>Ca/K/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Spherical model (Co = 0.22000; Co + C = 3.90500; Ao = 59.80; RSS = 0.481)</p> | <p>Co-Mg/K/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Spherical model (Co = 0.05000; Co + C = 3.91900; Ao = 53.80; RSS = 1.29)</p> |
| <p>C.E./Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Gaussian model (Co = 0.00007; Co + C = 0.00020; Ao = 407.4 RSS = 9.195E-10)</p> | <p>EB/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Gaussian model (Co = 27.50000; Co + C = 92.32000; Ao = 155 RSS = 145.)</p> | <p>OCE/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Spherical model (Co = 0.01430; Co + C = 0.08430; Ao = 251.4 RSS = 3.806E-05)</p> |
| <p>ADR/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Exponential model (Co = 1.53000; Co + C = 3.72000; Ao = 71.0 RSS = 0.127)</p> | <p>Arroz/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Exponential model (Co = 0.53000; Co + C = 6.48800; Ao = 46.5 RSS = 0.516)</p> | <p>Limo/Late 1: Isotropic Variogram</p> <p>Exponential model (Co = 0.20000; Co + C = 3.48500; Ao = 19.5 RSS = 4.48)</p> |

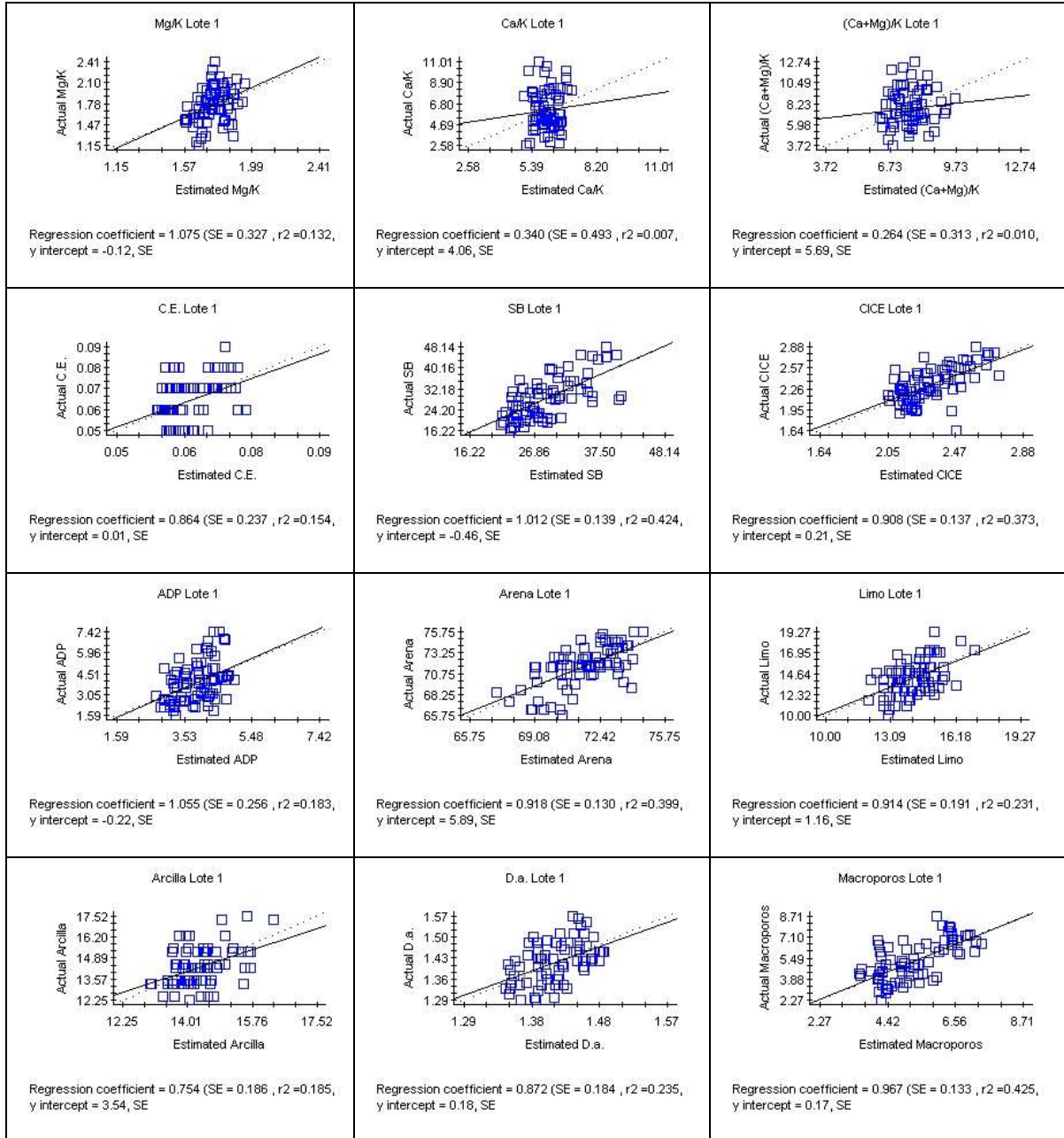
Anexo 1. Continuación...



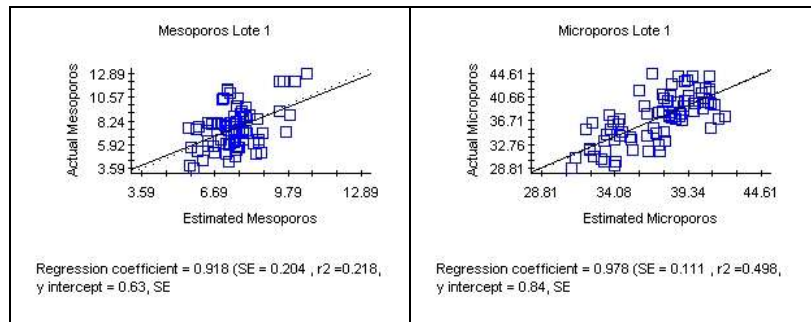
Anexo 2: Validaciones cruzadas obtenidas para cada propiedades productivo del caucho y para cada propiedad química y física del suelo para el lote 1 (Clon RRIM 600).



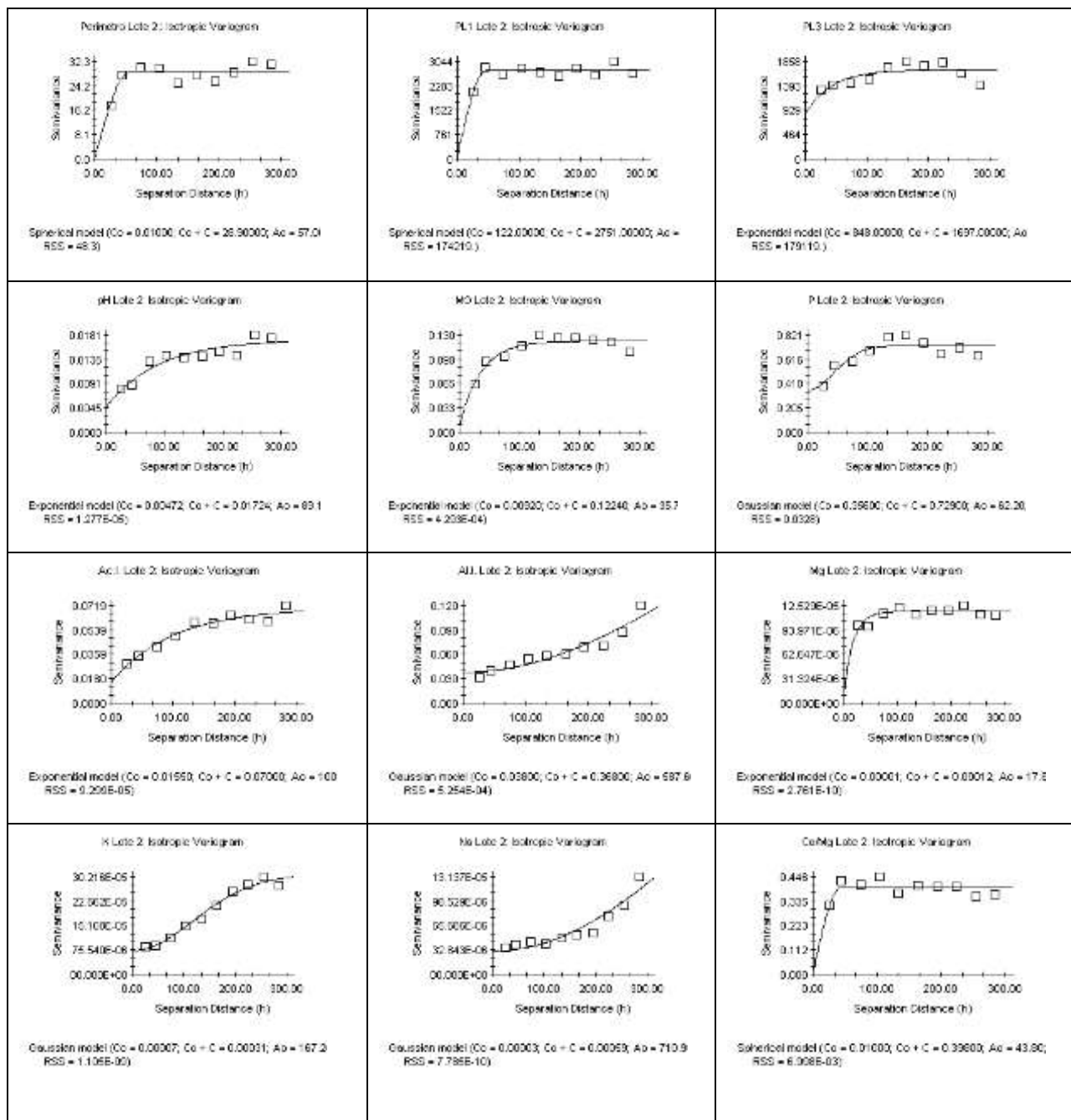
Anexo 2. Continuación...



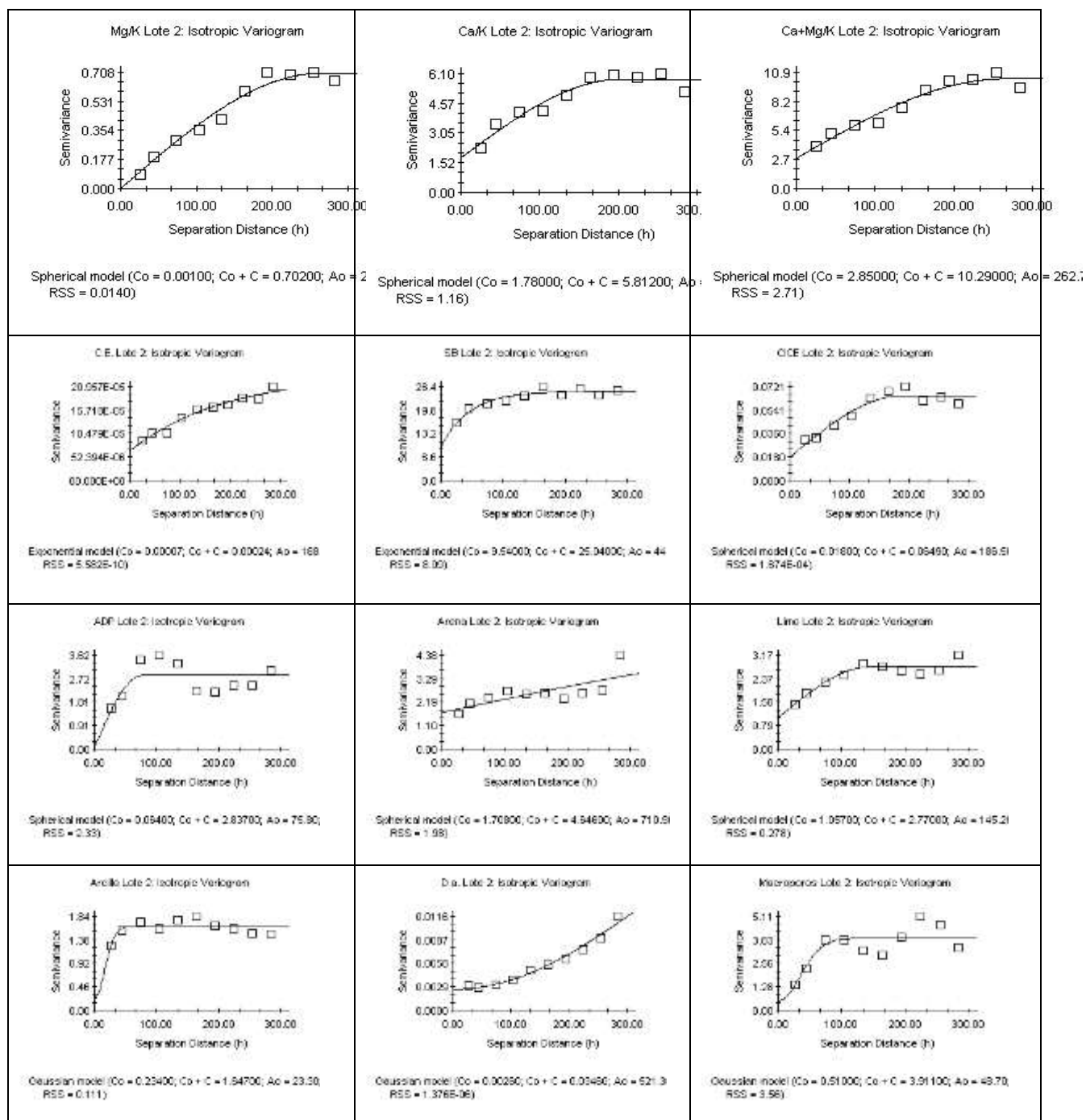
Anexo 2. Continuación...



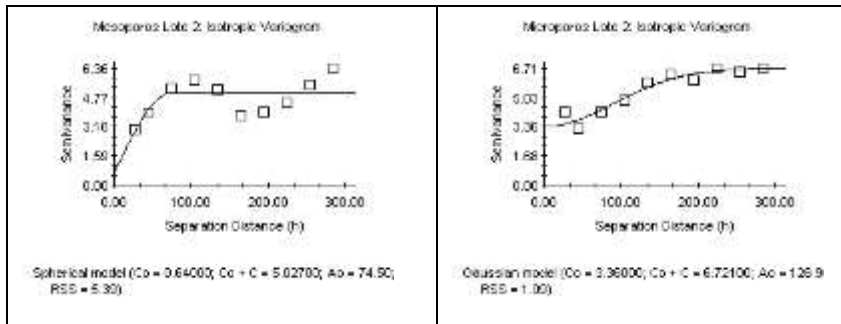
Anexo 3: Semivariogramas obtenidos para cada propiedades productivo del caucho y para cada propiedad química y física del suelo para el lote 2 (Clon FX 3864).



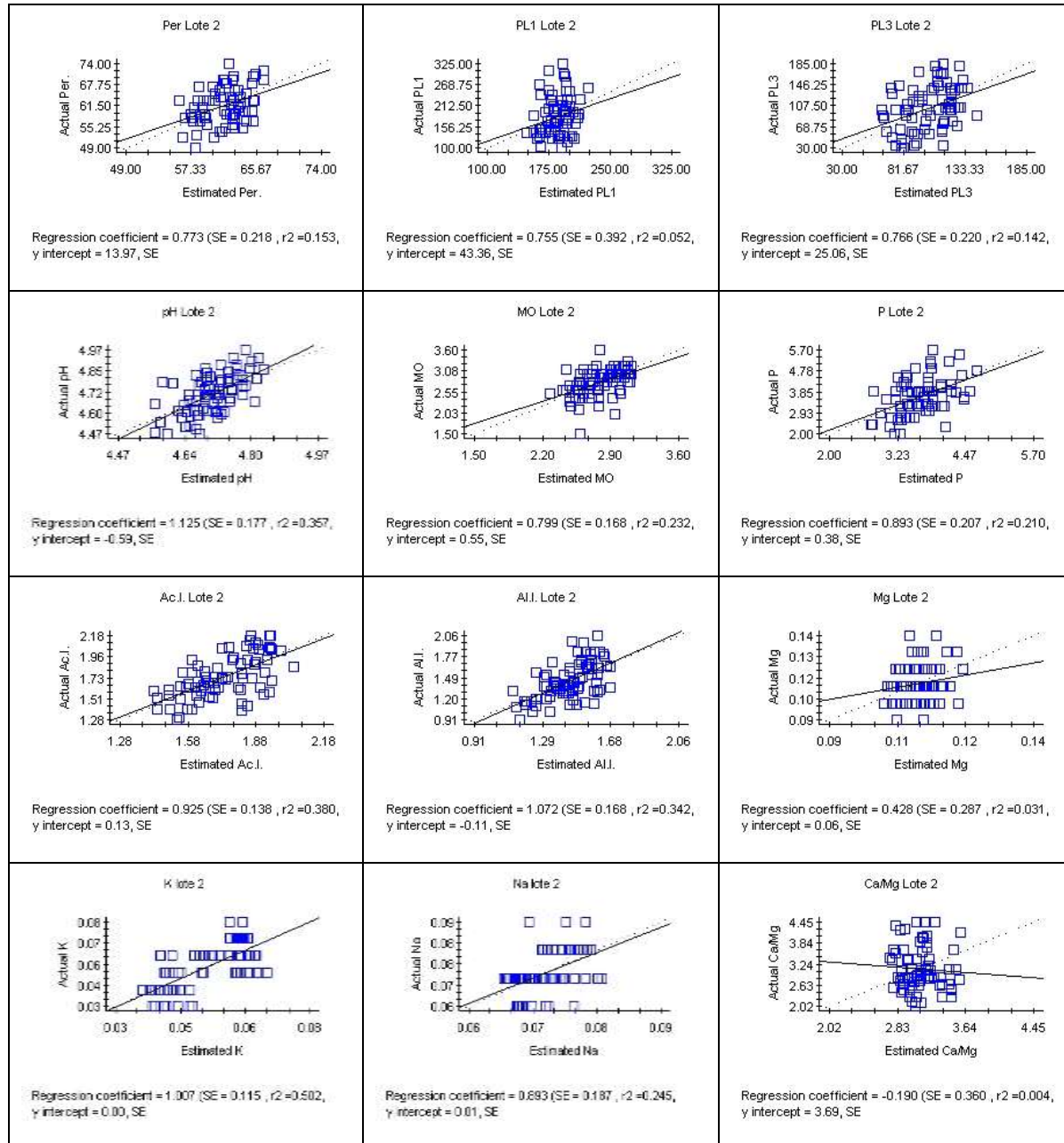
Anexo 3. Continuación...



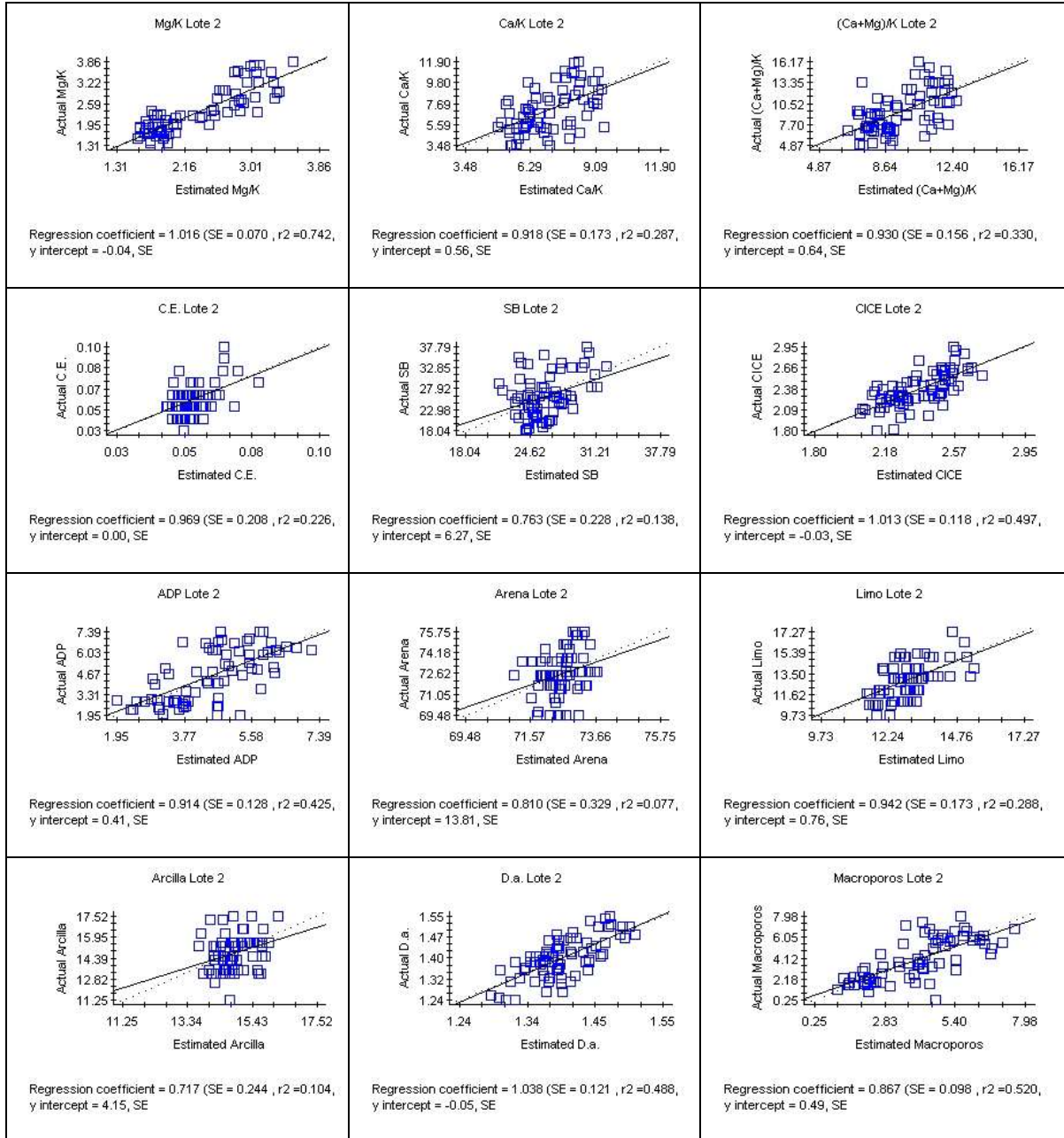
Anexo 3. Continuación...



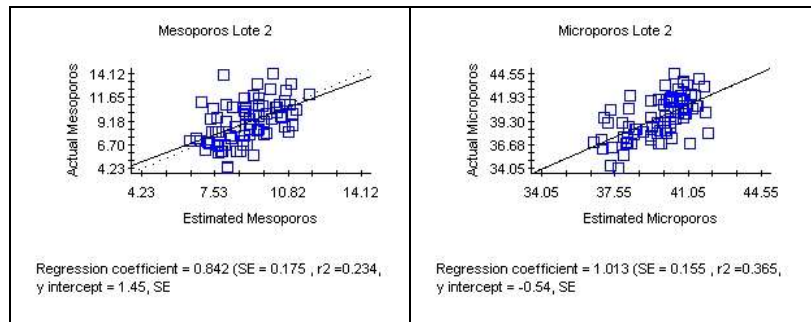
Anexo 4: Validaciones cruzadas obtenidas para cada propiedades productivo del caucho y para cada propiedad química y física del suelo para el lote 2 (Clon FX 3864).



Anexo 4. Continuación...



Anexo 4. Continuación...



Bibliografía

- Abu, S.T. y W.B. Malgwi. 2011. Spatial variability of soil physico-chemical properties in Kadawa irrigation project in Sudan Savanna Agroecology of Nigeria. *International Journal of Agricultural Research*. 6(10), 714-735.
- Adhikari, P., M.K. Shukla y J.G. Mexal. 2011. Spatial variability of electrical conductivity of desert soil irrigated with treated wastewater: implications for irrigation management. *Applied and Environmental Soil Science*. (2011), Article ID 504249.
- AGROCADENAS. 2005. La cadena del Caucho en Colombia: Una Mirada global a su estructura y dinámica (1991-2005). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Observatorio Agrocadenas de Colombia. Documento de Trabajo N° 94. Bogotá.
- Aishah, A.W., S. Zauyah, A.R. Anuar y C.I. Fauziah. 2010. Spatial variability of selected chemical characteristics of Paddy Soils in Sawah Sempadan, Selangor, Malaysia. *Malaysian Journal of Soil Science*. 14(2010), 27-39.
- Aitchison, J. 1986. *The Statistical Analysis of Compositional Data: Monographs on Statistics and Applied Probability*. Chapman y Hall Ltd. London Reprinted (2003) with additional material by The Blackburn Press, Caldwell, N.J. 416. p.
- Aitchison, J. y M. Greenacre. 2002. Biplots of compositional data. *Applied Statistics* 51. Part 4. pp. 375-392.
- Al-Omran, A.M., G. Abdel-Nasser, I. Choudhary y J. Al-Otuibi. 2004. Spatial variability of soil pH and salinity under date palm cultivation. *Research Built Agricultural Research Center, King Saud Univ*. 128, 5-36.
- Amaro Filho, J., R.F.D. Negreiros, R.N. Assis Júnior y J.C.A. Mota. 2007. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*. 31(3), 415-422.
- Amortegui Ferro, I. 2001. El cultivo del caucho. Módulo educativo para el desarrollo tecnológico de la comunidad rural. PROHACIENDO-PRONATTA. Ed. EL POIRA. Tolima, Colombia. 19. p.
- Ayoubi, Sh., S. Mohammad Zamani y F. Khormali. 2007. Spatial variability of soil properties for site specific farming in northern Iran. *International Journal of Plant Production*. 1(2), 225-236.
- Bataglia, O. C. 1987. Nutrição e adubação da seringueira. *Informações Agronômicas, Piracicaba, Brasil*. 38, 1-5.
- Bilibio, W.D., G.F. Corrêa y E.N. Borges. 2010. Atributos físicos e químicos de um Latossolo, sob diferentes sistemas de cultivo. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*. 34(4), 817-822.
- Bisquerra Alzina, R. 2009. *Metodología de la Investigación Educativa*. 2ª ed. Editorial La Muralla, S.A., Madrid. 459. p.
- Bolfe, E.L., J.B. Vasconcellos y H.R. Fontes. 2010. Geoestadística en la producción integrada de frutas en el Nordeste de Brasil. *Revista UD y Geomática*. 4(2010), 15-27.

- Bolton, J. y V.M. Shorrocks. 1961. The effects of magnesium limestone and other fertilizers on a mature plating of *Hevea brasiliensis*. *Journal of the Rubber Research Institute of Malaya, Kuala Lumpur*. 17, 31-39.
- Borůvka, L., L. Mladkova, V. Penizek, O. Drabek y R. Vasat. 2007. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. *Geoderma*. 140(4), 374-382.
- Camacho-Tamayo, J.H., C.A. Luengas, y F.R. Leiva. 2008. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the Eastern plains of Colombia. *Chilean Journal of Agricultural Research (Chile)*. 68(1), 42-55.
- Camacho-Tamayo, J.H., C.A. Luengas y F.R. Leiva. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica*. 59(3), 273-284.
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlen, R.F. Turco y A.E. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 58, 1501-1511.
- Campbell, G.P., J.M. Curran, G.M. Miskelly, S. Coulson, G.M. Yaxley, E.C. Grunsky y S.C. Cox. 2009. Compositional data analysis for elemental data in forensic science. *Forensic Science International*. 188(2009), 81-90.
- Carranza M, E.J. 2011. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*. 110(2011), 167-185.
- Casa, R. y A. Castrignanò. 2008. Analysis of spatial relationships between soil and crop variables in a durum wheat field using a multivariate geostatistical approach. *European Journal of Agronomy*. 28(3), 331-342.
- Caten, A., R.S. Diniz Dalmolin, F. Araújo Pedron y M.L. Mendonça-Santos. 2011. Estatística multivariada aplicada à diminuição do número de preditores no mapeamento digital do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 46(5), 554-562.
- Da Gama Bastos, J.R.C.A. 1994. Importancia da abubacao na cultura da seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Icon. Sao Paulo*.
- Cox, M.S., P.D. Gerard, M.C. Wardlaw y M.J. Abshire. 2003. Variability of Selected Soil Properties and Their Relationships with Soybean Yield. *Soil Science Society of America Journal*. 67(4), 1296-1302.
- Cruz, J.S., R.N. Assis Júnior, S.S. Rocha Matias, J.H. Camacho-Tamayo y R. Castro Tavares. 2010. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*. 34(2), 271-278.
- Cuadras, C.M. 2012. Nuevos métodos de análisis multivariante. Editorial CMC Editions. Barcelona, España. 304. p.
- Cucunubá-Melo, J.L., J.G. Álvarez-Herrera y J.H. Camacho-Tamayo. 2011. Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 11(1), 87-99.
- Duffera, M., J.G. White y R. Weisz. 2007. Spatial variability of Southeastern U.S. Coastal Plain soil physical properties; Implications for site-specific management. *Geoderma*. 137, 327-339.
- Egozcue, J.J., R. Tolosana-Delgado, E. Jarauta-Bragulat, M.I. Ortego y J.L. Díaz-Barrero. 2011. Análisis de datos composicionales: aguas, contaminantes, recursos,

- sociología. Recerca I Innovació a L'Escola de Camins. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. 1-4.
- Embrapa. 1998. Melhoramento Genético de espécies agroindustriais na Amazonia: estratégias e novas abordagens. Editorial Embrapa-SPI. Brasília. 135. p.
- Escobar Acevedo, J. 2004. El cultivo del caucho (*Hevea brasiliensis* Muell.) con enfoque agroforestal. Cartilla Divulgativa. CORPOICA-PRONATTA. 33. p.
- Evans, L. T. 1993. Crop evolution adaptation and yield. First Edition. Editorial Cambridge University Press. Cambridge, Great Britain. 500. p.
- FAO. 2013. Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://faostat.fao.org/DesktopDefault.aspx?PageID=567&lang=es#ancor>; consulta: octubre de 2013.
- Faraco, M.A., M.A. Uribe-Opazo, E.A.A. Silva, J.A. Johann y J.A. Borssoi. 2008. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de propriedades físicas do solo e produtividade da soja. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 32, 463-476.
- FEDECAUCHO. 2006. Federación Nacional de Productores de Caucho Natural. Cartilla promocional del cultivo de caucho natural. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Módulo Técnico. Bogotá. 26. p.
- Filzmoser, P. y K. Hron. 2009. Correlation analysis for compositional data. Mathematical Geosciences. 41(2009), 905-919.
- Filzmoser, P., K. Hron y C. Reimann. 2009a. Principal components analysis for compositional data with outliers. Environmetrics. 20(6), 621-632.
- Filzmoser, P., K. Hron y C. Reimann. 2009b. Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: problems and possibilities. Science of the Total Environment. 407(23), 6100-6108.
- Filzmoser, P., K. Hron y C. Reimann. 2010. The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data. Science of the Total Environment. 408(19), 4230-4238.
- García Bustamante, F. 2009. Fundamentos de Geoestadística. Universidad de Vigo. España. pp.1-6.
- Garzón, A.C., C.A. Cortes y J.H. Camacho-Tamayo. 2010. Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un Entisol. Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica. 13(1), 87-95.
- Giacomino, A., O. Abollino, M. Malandrino y E. Mentasti. 2011. The role of chemometrics in single and sequential extraction assays: A Review. Part II. Cluster analysis, multiple linear regression, mixture resolution, experimental design and other techniques. Analytica Chimica Acta. 688(2011), 122-139.
- Giraldo Henao, R. 2002. Introducción a la Geoestadística: Teoría y Aplicación, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística. Bogotá.
- Golden Software Inc. 1999. Surfer for Windows: release 7.0: contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide. Golden Software, New York, USA.
- Gonçalves, P. de S., y J.R.B. Marques. 2008. Melhoramento genético da seringueira: passado, presente e futuro. pp.401-407. En: Alvarenga, A. de P.; Carmo, C.A.F. de S. do. (Coord.). Seringueira. Viçosa: EPAMIG.
- Goovaerts, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. Biology and Fertility of Soils. 27(4), 315-334.
- Goovaerts, P. 2010. Handbook of applied spatial analysis: Software tools, methods and applications. pp.125-128. En: Part A-7. Geostatistical Software.

- Guerrero, R. 2004. El diagnóstico cuantitativo de la fertilidad del suelo. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 12-17. En: Boletín de suelos 42. Diciembre, Bogotá.
- Hernández, A., L. Lugo, A. Mora Garcéz, J. Sánchez y E. Arends. 2003. Variabilidad espacial edáfica en el sistema tradicional de conucos en el Amazonas de Venezuela. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 12(2), 43-54.
- Holmes, K.W., P.C. Kyriakidis, O.A. Chadwick, J.V. Soares y D.A. Roberts. 2005. Multi-scale variability in tropical soil nutrients following land-cover change. Biogeochemistry. 74, 173-203.
- Hurtado, S.M.C., C.A. Silva, A. Vilela De Resende, R. García Von Pinho, E. Borges Inácio y F. Satoshi Higashikawa. 2009. Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. Ciência e Agrotecnologia, Lavras. 33(5), 1351-1359.
- International Business Machines (IBM). 2010. Statistical Package for the Social Sciences. SPSS. Inc., EEUU.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1995. Suelos de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, Bogotá.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2004. Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Subdirección de Agrología, Bogotá.
- IRSG (International Rubber Study Group). 1999. International Rubber Study Group, Rubber Stat. Bull. 53(9).
- Iqbal, J., J.A. Thomasson, J.N. Jenkins, P.R. Owens y F.D. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. Soil Science Society of America Journal. 69(4), 1338-1350.
- Jaramillo, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. 1ª edición. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 67. p.
- Jaramillo, D.F. 2003. La variabilidad de las propiedades del suelo y su efecto sobre el manejo de la fertilidad. pp. 1-19. En: Curso teórico práctico sobre interpretación de análisis de suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Jabro, J.D., B.W. Stevens y R.G. Evans. 2006. Spatial relationships among soil physical properties in a grass-alfalfa hay field. Soil Science. 171(9), 719-727.
- Jenny, H. 1941. Factors of Soil Formation. McGraw Hill, New York.
- Johnson, R.A. y D.W. Wichern. 2007. Applied Multivariate Statistical Analysis. 6a ed. Editorial Pearson, Prentice Hall, New Jersey, United States of America. 773. p.
- Kravchenko, A.N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of America Journal. 67(5), 1564-1571.
- Kravchenko, A.N., G.P. Robertson, K.D. Thelen y R.R. Harwood. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. Agronomy Journal. 97(2), 514-523.
- Lakhankar, T., A.S. Jones, C.L. Combs, M. Sengupta, T.H. Vonder Haar y R. Khanbilvardi. 2010. Analysis of large scale spatial variability of soil moisture using a geostatistical method. Sensor. 10(1), 913-932.
- Li, Y., Z. Shi, F. Li y H.Y. Li. 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. Computer and Electronics in Agriculture. 56(2), 174-186.
- Luengas, C.A., J.H. Camacho-Tamayo y F.R. Leiva. 2007. Comportamiento de la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y su relación con el contenido

- de carbon orgánico. pp. 61-68. En: Memorias III Encuentro de Agricultura de Conservación, Junio 6-8 de 2007, Villavicencio, Colombia.
- MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). 2008. Cadena productiva del caucho y su industria. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Bogotá. 40. p.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, y S.A. de Oliveira. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas. Piracicaba: Potafos. 201. p.
- Malagón Castro, D. 2003. Ensayo sobre tipología de suelos colombianos. Énfasis en génesis y aspectos ambientales. Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 27(104), 319-341.
- Mann, K.K., A.W. Schuman, T.A. Obreza, W.G. Harris y S. Shukla. 2010. Spatial variability of soil physical properties affecting Florida Citrus Production. Soil Science. 175(10), 487-499.
- Martínez Garnica, A., y F. García Rubio. 2006a. Investigaciones en el cultivo de caucho (*Hevea brasiliensis*) en la Orinoquía y Norte Amazónico. En: CORPOICA-PRONATTA. Boletín de investigación No. 4, 75. p.
- Martínez Garnica, A. y F. García Rubio. 2006b. Sistemas agroforestales con caucho: alternativa sostenible para la Orinoquia Colombiana. CORPOICA. 4(4), 58-67.
- Martínez Garnica, A. 2007. Consideraciones técnicas para el establecimiento y manejo del cultivo del caucho (*Hevea brasiliensis*) en la Orinoquia Colombiana. CORPOICA. 39. p.
- Martins, A.L.S., E.G. Moura y J.H. Camacho-Tamayo. 2010. Variabilidad espacial y su relación con algunas propiedades físicas. Revista Ingeniería e Investigación. Viçosa. 30(2), 116-123.
- Mateu-Figueras, G., J.A. Martín-Fernández, V. Pawlowsky-Glahn y C. Barceló-Vidal. 2003. El problema del análisis estadístico de datos composicionales. En: 27 Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Lleida.
- Matheron, G. 1965. La théorie des variables régionalisées et ses applications; Masson et Cie: Paris, France.
- Melo, R.F., L.E. Oliveira, A.C. Mesquita y N.D. Filho. 2004. Variação sazonal de algumas características nutricionais e bioquímicas relacionadas com a produção de látex em clones de seringueira [*Hevea brasiliensis* (Wild.) Muell. Arg.], em Lavras-MG. Ciência e Agrotecnologia, Lavras. 28(6), 1326-1335.
- Millán, H., A.M. Tarquís, L.D. Pérez, J. Mato y M. González-Posada. 2012. Spatial variability patterns of some Vertisol properties at a field scale using standardized data. Soil & Tillage Research. 120(2012), 76-84.
- Minasny, B. y A.E. Hartemink. 2011. Predicting soil properties in the tropics. Earth-Science Reviews. 106(2011), 52-62.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010. Guía Ambiental para la Producción de Caucho Natural. Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. Bogotá, D.C. 93. p.
- Miranda, E.R., P.C. Rosand y J.L. Santana. 1975. Requerimentos nutricionais e adubação do cultivo da seringueira. Itabuna: Centro de Pesquisa do Cacau, s. d. Boletín técnico n. 33.
- Mohamed, M.Y. y B.M. Abdo. 2011. Spatial variability mapping of some soil properties El-Multagha agricultural project (Sudan) using geographic information systems (GIS) techniques. Journal of Soil Science and Environmental Management. 2(2), 58-65.
- Momtaz, H.R., A.A. Jafarzadeh, H. Torabi, Sh. Oustan, A. Samadi, N. Davatgar y R.J. Gilkes. 2009. An assesment of the variation in soil properties within and between landform in the Amol region, Iran. Geoderma. 149(1-2), 10-18.

- Montanari, R., M. Passos E Carvalho, M.C. Alves, J. Dafonte Dafonte, A. Paz González y G. Machado Siqueira. 2008. Variabilidad espacial de propiedades físicas de um Ferralsol em Selvíria (MS, Brasil). *Revista Científica Agropecuaria*. 12(1), 15-23.
- Montenegro G.H. 1990. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y agua para riego. SCCS. Bogotá. 324. p.
- Montero L., y I. Larraz. 2008. Introducción a la Geoestadística Lineal. Editorial NETBIBLO. pp. 1-142, España.
- Montezano, Z.F., E.J. Corazza y T. Muraoka. 2006. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa*. 30(5), 839-847.
- Moral, F.J., J.M. Terrón y J.R. Marques Da Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil & Tillage Research*. 106(2), 335-343.
- Moral, F.J., J.M. Terrón y F.J. Rebollo. 2011. Site-specific management zones based on the Rasch model and geostatistical techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*. 75(2011), 223-230.
- Morari, F., A. Castrignanò y C. Pagliarin. 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. *Computer and Electronics in Agriculture*. 68(1), 97-107.
- Motomiya, A.V.A., J.P. Molin, W.R. Motomiya y S.R. Vieira. 2011. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15(10), 996-1003.
- Mzuku, M., R. Khosla, R. Reich, D. Inman, F. Smith y L. Macdonald. 2005. Variability of measured soil properties across site-specific management zones. *Soil Science Society of America Journal*. 69, 1572-1579.
- Oliveira, P.C.G., P.R.S. Farias, V. Herdjanía, A.R. Fernandes, F.A. Oliveira y J.D. Pita. 2009. Variabilidade especial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 13(6), 708-715.
- Ortega, R.A. y O.A. Santibáñez. 2007. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) base on soil fertility. *Computer and Electronics in Agriculture*. 58, 49-59.
- Özgöz, E. 2009. Long-term conventional tillage effect on spatial variability of some soil physical properties. *Journal of Sustainable Agriculture*. 33(2), 142-160.
- Pardo C.E. y G. Cabargas. 2001. Métodos estadísticos multivariados en investigación social, principios y ejemplos de aplicación.
- Prado, R.M. y W. Natale. 2008. Effect of liming on the mineral nutrition and yield of growing Guava Trees in a Typic Hapludox soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39(13-14), 2191-2204.
- Pellegrino Cerri, D. y P.S. Graziano Magalhães. 2012. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47(4), 613-620.
- Pimentel-Gómez, F. y C.H. García. 2002. Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba. Brasil. FEALQ. 309. p.
- Prado, R.M. y W. Natale. 2008. Effect of liming on the mineral nutrition and yield of growing Guava Trees in a Typic Hapludox soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39(13-14), 2191-2204.

- Quarteroli Silva, J., E.J. Scaloppi Júnior, R.M. Biagi Moreno, G. Batista de Souza, P. de Souza Gonçalves y J.A. Scarpate Filho. 2012. Producción y propiedades químicas del caucho en clones de *Hevea* según los estados fenológicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47(8), 1066-1076.
- Quesada-Méndez, I., L. Quintero-Barrera, F.A. Aristizábal y O. Rodríguez-Acuña. 2011. Evaluación de la variabilidad genética de clones de caucho natural presentes en la colección clonal del Instituto SINCHI, mediante el uso de descriptores morfológicos. *Colombia Forestal*. 14(1), 69-79.
- Ramírez-Lopez, L., A. Reina-Sánchez y J.H. Camacho-Tamayo. 2008. Variabilidad especial de atributos físicos de un *Typic Haplustox* de los llanos orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola*. 28(1), 55-63.
- Rao, I., G. Rippstein, G. Escobar y J. Ricaurte. 2001. Capítulo 10: Producción de Biomasa Vegetal Epígea e Hipógea en las Sabanas Nativas. pp. 198-222. En: *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT-CIRAD. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Convenio CIAT-CIRAD. Cali, Colombia.
- Rezaei, S.A., y R.J. Gilkes. 2005. The effects of landscape attributes and plant community on soil physical properties in rangelands. *Geoderma*. 125(1-2), 145-154.
- Ribeiro, K.D., S.M. Menezes, M.G.B.F. Mesquita y F.M.T. Sampaio. 2007. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de lavras – MG. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*. 31(4), 1167-1175.
- Rippstein, G., E. Amézquita, G. Escobar y C. Grollier. 2001. Capítulo 1: Condiciones Naturales de la Sabana. pp. 1-21. En: *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Convenio CIAT-CIRAD. Cali, Colombia. 43. p.
- Rivas, L., P. Hoyos, E. Amézquita y D.L. Molina. 2004. Manejo y uso de los suelos de la Altillanura Colombiana, Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Proyecto de Evaluación de Impacto, Proyecto de Suelos. Convenio MADR-CIAT.
- Ramos, M.C., R. Cots-Folch y J.A. Martínez-Casasnovas. 2007. Effects of land terracing on soil properties in the Priorat region in Northeastern Spain: A multivariate analysis. *Geoderma*. 142(3-4), 251-261.
- Reid, M.K. y K.L. Spencer. 2009. Use of principal components analysis (PCA) on estuarine sediment datasets: The effect of data pre-treatment. *Environmental Pollution*. 157(8-9), 2275-2281.
- Robertson, G.P. 1998. *GS+ Geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide*. Plainwell: Gamma Design Software. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan, USA. 179. p.
- Rodríguez, J., A.M. González, F.R. Leiva y L. Guerrero. 2008. Fertilización por sitio específico em um cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la Sabana de Bogotá. *Agronomía Colombiana*. 26(2), 308-321.
- Rodríguez-Vásquez, A.F., A.M. Aristizabal-Castillo y J.H. Camacho-Tamayo. 2008. Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiakov em um suelo ándico. *Engenharia Agrícola*. 28(1), 64-75.
- Romano, E., R. Giraldo and J. Mateu. 2011. Clustering spatially correlated functional data. In *Recent advances in functional data analysis*. Springer Series: Contributions to Statistics. Ed: Ferraty, F. 277-282.
- Roque, C.G., R.M. Prado, W. Natale, A.N. Beutler y J.F. Centurion. 2004. Estado nutricional e produtividade da seringueira em solo com calcário aplicado superficialmente, *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*. 39(5), 485-490.

- Sağlam, M., H.S. Öztürk, S. Erşahin y A.I. Özkan. 2011. Spatial variability of soil physical properties in adjacent alluvial and colluvial soils under Ustic moisture regime. *Hydrology and Earth System Science Discussion*. 8(2), 4261-4280.
- Salamanca, C., F.R. Leiva y L. Guerrero. 2007. Evaluación del manejo de la fertilidad del suelo por sitio específico en un cultivo comercial de arveja (*Pisum sativum* L.) en la Sabana de Bogotá. 2007. pp. 38-45. En: Memorias III Encuentro de Agricultura de Conservación, Junio 6-8 de 2007, Villavicencio, Colombia.
- Sales Rodrigues, M., J.E. Corá y C. Fernandes. 2012. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 36(2), 599-609.
- Salvador Figueras, M. 2000. Introducción al Análisis Multivariante. En: 5campus.com. Estadística, <http://www.5campus.com/leccion/anamul>; consulta: agosto de 2011.
- Sánchez Espinosa, J.A. 2010. Los suelos de Colombia, Cap. VIII. pp. 485-552. En: Ciencia del Suelo, Principios básicos. SCCS, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Colombia.
- Sánchez, J.D., G.A. Ligarreto y F.R. Leiva. 2011. Spatial variability of soil chemical properties and its effect on crop yields: a case study in maize (*Zea mays* L.) on the Bogota Plateau. *Agronomía Colombiana*. 29(2), 265-274.
- Santi, A.L., T.J. Carneiro Amado, M.R. Cherubin, T.N. Martin, J.L. Pires, L. Pinto Della Flora y C.J. Basso. 2012. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes á produtividade de grãos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 47(9), 1346-1357.
- Santra, P., U.K. Chopra y D. Chakraborty. 2008. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in a agricultural farm. *Current Science*. 95(7), 937-945.
- SAS (Statistical Analysis System). 2000. SAS/STAT Software: Changes and Enhancements, Release 8.1. SAS Institute Inc. SAS Publishing. Cary, NC 27513.
- Schaufelberger, P. 1962. La clasificación natural de los climas. *Cenicafé*. 13(1), 3-22.
- SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje). 2006. El caucho natural. Caracterización ocupacional. Servicio Nacional de Aprendizaje. Ministerio de Protección Social. Bogotá, Colombia. 2006. 90. p.
- Sharma, S. 1998. Applied Multivariate Techniques. 1ª ed. Editorial John Wiley and Sons, Canada. 512. p.
- Sharma, P., M.K. Shukla y J.G. Mexal. 2011. Spatial variability of soil properties in agricultural fields in Southern New Mexico. *Soil Science*. 176(6), 288-302.
- Shi, W., J. Liu, Z. Du, Y. Song, Ch. Chen y T. Yue, 2009. Surface modeling of soil pH. *Geoderma*. 150(1-2), 113-119.
- Silva, V.R., J.M. Reichert, L. Storck y S. Feijó. 2003. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-amarelo distrófico arênico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa. 27(6), 1013-1020.
- Silva, F.M., Z.M. Souza, C.A.P. Figueiredo, J.M. Júnior, y R.V. Machado. 2007. Variabilidade espacial de propiedades químicas e de produtividade na cultura do café, *Ciência Rural*. 37(2), 401-407.
- Silva, F.M., Z.M. Souza, C.A.P. Figueiredo, L.H.S. Vieira y E. Oliveira. 2008. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras

- Simfukwe, P., P.W. Hill, B.A. Emmett y D.L. Jones. 2011. Soil classification provides a poor indicator of carbono turnover rates in soil. *Soil Biology y Biochemistry*. 43(2011), 1688-1696.
- Souza, Z.M., G.P.D. Cerri, P.S.G. Magalhães y D.S. Siqueira. 2010. Spatial variability of soil attributes and sugarcane yield in relation to topographic location. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 14(12), 1250-1256.
- Sun, B., S. Zhou y Q. Zhao. 2003. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*. 115(1-2), 85-99.
- Thio, S. 2004. CoDaPack software package. En: Departament d'Informàtica, Matemàtica Aplicada i Estadística, Universidad de Girona, España. <http://ima.udg.edu/~thio/#Compositional Data Package>; consulta: enero de 2013.
- Trangmar, B.B., R.S. Yost y G. Uehara. 1985. Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*. 38, 45-93.
- Tolosana Delgado, R. 2011. Guía para el análisis espacial de datos composicionales. *Boletín Geológico y Minero*. 122(4), 469-482.
- Torres, C. 1994. Diagnóstico del Caucho Natural en la Orinoquia. CORPES de la Orinoquia. Villavicencio. 89. p.
- Tusell, F. 2012. Análisis Multivariante. Curso Estadística: Análisis Multivariante. p. 164. En: Notas de asignatura. Universidad del País Vasco.
- Ulloa Guitián, M., E. Vidal Vázquez, O.E. Ingaramo, L.A. Morales y A. Paz González. 2003. Aplicación de la Geoestadística al estudio de las propiedades del suelo. Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Resumen: A-031, 1-4.
- Urricariet, S., M. Niborski y C.M. Kvolek 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la Pampa Arenosa. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 29(1), 49-59.
- USDA. 2004. Soil Survey Laboratory: Methods Manual. Investigations Report No. 42. Version 4.0. United States Department of Agriculture, Washington D.C. USA. 435. p.
- USDA. 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos. Soil Survey Staff. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). Onceava Edición. 366. p.
- Utset, A., T. López y M. Díaz. 2000. A comparison of soil maps, kriging and a combined method for spatially predicting bulk density and field capacity of ferralsols in the Havana-Matanzas Plain. *Geoderma*. 96(2000), 199-213.
- Vega Vilca, J.C. 2011. Introducción al Análisis Multivariado. pp. 1-11. Editorial Centro de Investigaciones Comerciales e Iniciativas Académicas. Instituto de Estadística y Sistemas Computarizados de Información, Facultad de Administración de Empresas, Universidad de Puerto Rico. San Juan, Puerto Rico.
- Veronese Júnior, V., M.P. Carvalho, J. Dafonte, O.S. Freddi, E.V. Vázquez y O.E. Ingaramo. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol. *Current Science*. 88(1-2), 166-177.
- Vieira, S.R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. Tópicos en ciencia do solo. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1, 1-54.
- Vieira, S.R. y A.P. Gonzalez. 2003. Analysis of the spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia, Campinas*. 62(1), 127-138.
- Vieira, V.A.S., C.R. Mello y J.M. Lima. 2007. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*. 31(5), 1477-1485.

- Villatoro, M., C. Henríquez y F. Sancho. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32(1), 95-105.
- Viviani, C.A., M.E. Marchetti, A.C. Tadeu Vitorino, J.O. Novelino y M.C. Gonçalves. 2010. Disponibilidade de fósforo em dois Latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*. 34(1), 61-67.
- Webster, R. y M.A. Oliver. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Second Edition. Wiley, New York, Chichester, Toronto and Brisbane. USA. 330. p.
- Worsham, L., D. Markewitz y N. Nibbelink. 2010. Incorporating spatial dependence into estimates of soil carbon contents under different land covers. *Soil Science Society of America Journal*. 74(2), 635-646.
- Yasrebi, J., M. Saffari, H. Fathi, N. Karimian, M. Emadi y M. Baghernejad. 2008. Spatial variability of soil fertility properties for precisión agricultura in southern Iran. *Journal of Applied Sciences*. 8(9), 1642-1650.
- Zacharias, S. 1998. *Modelling spatial variability of field-scale solute transport in the vadose zone*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, USA. 18. p.
- Zapata, R.D. y N.W. Osorio. 2010. La Materia Orgánica del Suelo, Cap. VI. pp.357-391. En: *Ciencia del Suelo, Principios básicos*. SCCS, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Colombia.
- Zuluaga Peláez, J.J., y C.J. Escobar Acevedo. 2000. Efecto del manejo agroforestal en el desarrollo y producción del caucho (*Hevea brasiliensis* Muell.) en dos áreas del piedemonte del Caquetá. pp.1-12. En: *Boletín divulgativo No. 2*. CORPOICA-PRONATTA.
- Xin-Zhong, W., L. Guo-Shun, H. Hong-Chao, W. Zhen-Hai, L. Qing-Hua, L. Xu-Feng, H. Wei-Hong y L. Yan-Tao. 2009. Determination of management zones for a tobacco field based on soil fertility. *Computer and Electronics in Agriculture*. 65(2), 168-175.