



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Milton Freddy Alarcón Jiménez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ing. Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia

2013

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Milton Freddy Alarcón Jiménez

Código: 02822374

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Ingeniería Agrícola

Director (a):

Ing. Agr. M. Sc. Jesús Hernán Camacho Tamayo

Línea de Investigación:

Adecuación de tierras y manejo sostenible

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ing. Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2013

A mi esfuerzo y al de todos aquellos que siempre me han apoyado, especialmente mi madre.

Agradecimientos

Esta investigación se logró gracias al apoyo de Corpoica La Libertad, La Universidad Nacional de Colombia; al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la sede Bogotá, que permitió la utilización de los Laboratorios de Suelos y Poscosecha; al Laboratorio Nacional de Física de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que consintió para realizar los análisis de las muestras; al Ingeniero Jesús Hernán Camacho Tamayo Profesor Asistente del Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la sede Bogotá por el acompañamiento en este proceso; al Doctor Jaime Bernal Riobo, Investigador de Corpoica por facilitar el personal, los equipos y la logística para el muestreo del suelo; a la Doctora Yolanda Rubiano Sanabria, profesora del Departamento de Ingeniería Agronómica sede Bogotá por sus conocimientos aplicados en este estudio; al Doctor Jorge Sánchez y a la Ingeniera Agrícola Janeth González por su colaboración.

Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos (químicos y físicos) en la altillanura plana. Se diseñaron mallas rectangulares de 70 * 70 m y dos profundidades de muestreo (0 a 10 cm y 10 a 20 cm) en un lote de 37 ha. El análisis descriptivo mostró alta acidez y contenidos de Al, valores de RP (1.32 MPa) a valores altos de RP (1.98 MPa), confirmando la existencia de una capa dura en la segunda profundidad. La zona presentó bajos contenidos de elementos menores. La mayoría de los atributos estudiados presentaron dependencia espacial. Las zonas de manejo se determinaron por análisis clúster, índice de suelo por coeficiente de variación e índice de suelo por componentes principales para generar recomendaciones de manejo sitio específico para el cultivo del maíz.

Palabras clave: zonas de manejo, atributos del suelo, rendimiento, geoestadística.

Abstract

The objective of this study was to determine agricultural management zones based on corn yield and its relationship with soil attributes (chemical and physical) in the flat high plains. Were designed rectangular mesh 70 * 70 m and two sampling depths (0-10 cm and 10-20 cm) in a batch of 37 hectares. Descriptive analysis showed high acidity and content of Al, RP values of (1.32 MPa) and high values of RP (1.98 MPa), confirming the existence of a hard coating on the second depth. Low content of minor elements, most of the attributes studied showed spatial dependence, the management zones were determined by cluster analysis, soil index by coefficient of variation and soil index by principal components to generate site-specific management recommendations for the crop corn.

Keywords: management zones, soil properties, performance, geostatistics

Contenido

	Pág.
Resumen IX	
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	19
1. Estado del arte.....	22
1.1 Atributos físicos y químicos del suelo	22
1.2 Geoestadística y la variabilidad espacial de los atributos del suelo	24
2. Materiales y métodos	27
2.1 Área de estudio.....	27
2.2 Diseño experimental	30
2.3 Mediciones de campo y toma de muestras	31
2.4 Análisis de laboratorio.....	33
2.4.1 Humedad gravimétrica	33
2.4.2 Textura.....	33
2.4.3 Porosidad y conductividad hidráulica	33
2.4.4 Densidad Aparente y Real.....	34
2.4.5 Preparación de la muestra de suelo carbono total y nitrógeno total.....	35
2.4.6 Características de los granos de maíz	36
2.5 Procesamiento y análisis de datos.....	36
3. Análisis de resultados	39
3.1 Análisis descriptivo	39
3.2 Análisis de variabilidad espacial	45
3.3 Correlación entre atributos del suelo.....	52
3.3.1 Correlación de Pearson.....	52
3.3.2 Análisis cluster	59
3.3.3 Análisis de componentes principales.....	61
3.4 Determinación zonas de manejo.....	68
3.4.1 Análisis clúster	68
3.4.2 Índice de suelo según coeficiente de variación.....	74
3.4.3 Índice de suelo por componentes principales.....	80
3.4.4 Zona de manejo por rendimiento.....	85
4. Conclusiones.....	89
4.1 Conclusiones	89

XII Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz
y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

A. Anexo: Perfil descrito, morfología y nomenclatura de los horizontes.....	91
B. Anexo: Interpretación de algunas propiedades físicas y químicas del suelo	95
C. Anexo: Mapas de contorno de atributos físicos, químicos y características de cosecha. 98	
D. Anexo: Modelos de semivariogramas ajustados para los atributos químicos y físicos del suelo y características de cosecha	112
Bibliografía	123

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Perfil descrito, morfología y nomenclatura de los horizontes. Foto: Milton Alarcón.	29
Figura 2-2: Ubicación espacial del lote de estudio, Finca Versailles lote Carlos 1. Foto: CORPOICA. 2013	31
Figura 2-3: Penetrologger Eijkelkamp, con sonda de humedad DELTA (Izq.) y TDR Fieldscout (der.).	31
Figura 2-4: Muestra inalterada (cilindro metálico, izq.), muestras alteradas (humedad campo centro, atributos químicos der.).	32
Figura 2-5: Cosecha de maíz. Contenido de humedad del grano (izq.), desgrane (centro), toma de datos de peso de grano (der.).	32
Figura 2-6: Equipo de retención de humedad (izq.); saturación de muestras en platos porosos (centro); secado horno 24 h (der.).	33
Figura 2-7: Saturación de muestras (izq); equipo de conductividad hidráulica saturada (centro); toma de datos (der).	34
Figura 2-8: Metodología para hallar densidad aparente, muestras en el horno a 105°C (izq.); muestras inalteradas (der).	35
Figura 2-9: Metodología para hallar densidad real, muestra en pipeta (izq.); equipo para hallar densidad real (centro); muestras (der).	35
Figura 3-1: Mapas de contorno de la RP del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).	49
Figura 3-2: Mapas de contorno de la PT del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).	50
Figura 3-3: Mapas de contorno de la PT del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).	50
Figura 3-4: Mapas de contorno de Ar del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).	51
Figura 3-5: Mapas de contorno de Ar del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).	52
Figura 3-6: Análisis clúster de los atributos químicos del suelo estudiado (A) 0-10 cm de profundidad y (B) 10-20 cm de profundidad.	60
Figura 3-7: Análisis clúster de los atributos físicos del suelo estudiado (A) 0-10 cm de profundidad y (B) 10-20 cm de profundidad.	60
Figura 3-8: Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos químicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.	63

Figura 3-9:	Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos químicos del suelo para la profundidad 10-20 cm	63
Figura 3-10:	Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm	67
Figura 3-11:	Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm	67
Figura 3-12:	Mapa de interpolación lineal para las zonas de manejo definidas según análisis clúster para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.	70
Figura 3-13:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según análisis clúster para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.	73
Figura 3-14:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según coeficiente de variación para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.	75
Figura 3-15:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según coeficiente de variación para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.	78
Figura 3-16:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según componentes principales para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.	81
Figura 3-17:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según componentes principales para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm	81
Figura 3-18:	Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas por rendimiento.	86
Figura C-1:	Mapas de contorno de los atributos químicos del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).....	99
Figura C-2:	Mapas de contorno de los atributos físicos del suelo (relacionar A con la profundidad 0-10 y B con la profundidad 10-20 cm).....	105
Figura C-3:	Mapas de contorno de características de cosecha.....	109

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Medidas descriptivas de las variables pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 0-10 cm de profundidad.	40
Tabla 3-2: Medidas descriptivas de las variables pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 10-20 cm de profundidad.	41
Tabla 3-3: Medidas descriptivas de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map, Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 0-10 cm de profundidad.....	42
Tabla 3-4: Medidas descriptivas de las variables RP (MPa), hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map. Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 10-20 cm de profundidad.	43
Tabla 3-5: Medidas descriptivas de las variables poscosecha	45
Tabla 3-6: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 0-10 cm de profundidad.....	46
Tabla 3-7: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 10-20 cm de profundidad.....	47
Tabla 3-8: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map. Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 1-10 cm de profundidad.....	48
Tabla 3-9: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map. Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 10-20 cm de profundidad.....	48
Tabla 3-10: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de poscosecha	49
Tabla 3-11: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos químicos y rendimiento del suelo en la profundidad 0-10 cm	54
Tabla 3-12: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos químicos y rendimiento del suelo en la profundidad 10-20 cm	55
Tabla 3-13: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos físicos y rendimiento en el suelo para profundidad 0-10 cm	57

Tabla 3-14:	Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos físicos y rendimiento en el suelo para profundidad 10-20 cm	58
Tabla 3-15:	Valores de los análisis de componentes principales para los atributos químicos en el suelo para la profundidad 0-10 cm	64
Tabla 3-16:	Valores de los análisis de componentes principales para los atributos químicos en el suelo para la profundidad 10-20 cm	65
Tabla 3-17:	Valores de los análisis de componentes principales para los atributos físicos en el suelo para la profundidad 0-10 cm	66
Tabla 3-18:	Valores de los análisis de componentes principales para los atributos físicos en el suelo para la profundidad 10-20 cm	68
Tabla 3-19:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos químicos en la profundidad 0-10 cm del suelo	69
Tabla 3-20:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos químicos en la profundidad 10-20 cm del suelo	71
Tabla 3-21:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm	72
Tabla 3-22:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm	74
Tabla 3-23:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos químicos del suelo en la profundidad 0-10 cm.	76
Tabla 3-24:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos químicos del suelo en la profundidad 10-20 cm.	77
Tabla 3-25:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.	79
Tabla 3-26:	Medias y coeficientes de variación de zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.	79
Tabla 3-27:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos químicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.	82
Tabla 3-28:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos químicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.	83
Tabla 3-29:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.	84
Tabla 3-30:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales de los atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.	85
Tabla 3-31:	Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por rendimiento del lote muestreado	86

Introducción

La necesidad de aumentar el rendimiento y con ello los ingresos de los productores agropecuarios así como abastecer de alimentos a la creciente población busca prácticas más eficientes e innovadoras para cultivar. Esto hace que la producción agrícola sea continuamente influenciada por los desarrollos tecnológicos. La Agricultura de Precisión se puede definir como el uso de las "tecnologías de la información", así denominados (TI) para mejorar el proceso de toma de decisiones en la producción agrícola (Ortega *et al.*, 2007).

La Orinoquia colombiana comprende más de 26 millones de hectáreas, de las cuales el 53% son bien drenadas. De esta área 4.6 millones de hectáreas pertenecen a terrazas y altillanura plana, que tienen un alto potencial agrícola y pecuario y se encuentran actualmente subutilizadas en sistemas de ganadería extensiva, en pasturas con baja tecnología y escasa productividad (Valencia *et al.*, 2001).

El maíz es el tercer cultivo más importante del mundo, después del arroz y el trigo. Se cultiva en aproximadamente 130 millones de has, de las cuales más del 60% se encuentran en países en desarrollo. (Narro *et al.*, 2001). El rendimiento del cultivo de maíz en los llanos orientales fue descrito por Torres *et al.* (1994) en 2.93 ton ha^{-1} con una variedad mejorada Sikvani V-110 que tolera altos porcentajes de saturación de Al y bajos contenidos de P. La calidad del suelo determinada por aspectos físicos, químicos y biológicos se consideran importantes para evaluar el mejoramiento o la degradación de la tierra y de esta manera identificar las prácticas de manejo dirigidas a un manejo sostenible de la tierra (Dexter, 2004).

Tradicionalmente, el análisis y manejo de los atributos físicos y químicos del suelo se hace desconociendo los detalles del suelo, las condiciones en el momento del laboreo, así como los requerimientos del cultivo, siendo importante efectuar una evaluación previa dentro de los conceptos de sostenibilidad. Estas prácticas utilizadas en el manejo del suelo continúan favoreciendo su degradación (Amézquita, 2004). Por otra parte, el

muestreo aleatorio de baja intensidad, es insuficiente para expresar las relaciones entre los atributos del suelo, conduciendo en ocasiones a errores en la toma de decisiones, ya que pueden presentarse grandes variaciones de un mismo atributo debido a las alteraciones provocadas por las actividades agrícolas (Strudley *et al.*, 2008). Un adecuado manejo del suelo puede depender del conocimiento de la dependencia e interacción espacial de los atributos del suelo (Montenegro & Montenegro, 2006).

La AP o siembra de precisión es el manejo de la variabilidad espacial y temporal con el objetivo de incrementar los retornos económicos y reducir el impacto ambiental. Esto no implica, necesariamente, una estrategia de manejo específica o algún nivel de uso de tecnología. (Revista Nacional de Agricultura, 2007).

La agricultura de precisión (AP) permite mediante la recopilación de datos de campo debidamente georreferenciados, relacionarlos con las prácticas agronómicas, rendimiento y condiciones ambientales para ser analizadas espacialmente y luego plantear estrategias que permitan la aplicación de forma específica la fertilización, control de malezas, de plagas y enfermedades, y la adecuación del suelo. La caracterización de la variabilidad espacial del suelo permite mejorar la correcta comprensión de las complejas relaciones entre las características y el ambiente del suelo (Goovaerts, 1998), ayudando a determinar el uso de prácticas más adecuadas al suelo (Bouma *et al.*, 1999), que pueden contribuir a mejorar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

La intervención humana en la producción agrícola influye directamente en la calidad del suelo, causando alteraciones en los atributos físicos y químicos, mediante el uso de fertilizantes, correctivos y prácticas de labranza (Camacho-Tamayo *et al.*, 2010). La determinación de la distribución de la variabilidad espacial de algunos atributos químicos, incluidos los de carbono orgánico (CO), pH, acidez intercambiable, aluminio intercambiable, P, Ca, Mg, K, Fe, Cu, Zn, Mn y Na de un suelo Oxisol, también algunos atributos físicos, como curvas de retención de humedad, resistencia a la penetración (RP), humedad en campo (hum), densidades aparente (Da) y real (Dr), macro (Map), microporos (Mip), mesoporos (Mep) y contenidos de arena (A), limo (L) y arcilla (Ar), atributos físico-mecánicos del cultivo de maíz como el contenido de humedad (hum), pesos, densidades aparente (Da Grano), real (Dr Grano), tiene el propósito la

identificación de zonas de manejo (ZM) es decir, zonas de gestión uniforme dentro del cultivo para mejorar las prácticas agrícolas.

OBJETIVO GENERAL

Determinar zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento de parámetros productivos del maíz y su relación con los atributos físicos y químicos del suelo.
- Establecer las zonas de manejo, a partir de las relaciones encontradas, a través de diferentes técnicas estadísticas.
- Generar recomendaciones de manejo sitio específico para el cultivo del maíz.

1.Estado del arte

1.1 Atributos físicos y químicos del suelo

La variabilidad espacial y temporal de los rendimientos en los cultivos se ve afectada por varios factores como el clima, la genética, el suelo (atributos físicos y químicos), la topografía, las prácticas de manejo (densidades de siembra, fecha de muestreo, riego, tasa de fertilización y el tiempo, entre otros), plagas, enfermedades, condiciones de estrés, y la interacción dinámica entre estos factores. En este sentido, debido a la imposibilidad de determinar todos los factores que afectan el rendimiento, se debe identificar y medir sólo aquellas variables que son más relevantes para la determinación del mismo (Ortega & Santibáñez, 2007).

La variabilidad de los atributos del suelo, y específicamente su magnitud, depende de los factores , de los procesos formadores y del tiempo de intervención (cultivo); en consecuencia, se pueden encontrar variaciones altas de algunos atributos en distancias cortas, mientras otras pueden variar en distancias largas (Peña et al., 2009).

La relación entre el suelo y la productividad de los cultivos es todavía poco entendida, debido a la dificultad de cuantificar los diversos atributos físicos relacionados con la estructura del suelo. La variabilidad espacial y temporal es uno de los factores que dificultan esta cuantificación (Dexter, 1988). Además, algunos varían entre sí (Tormena et al., 1998).

Parr et al. (1992) observaron que diferentes atributos químicos, físicos y biológicos interactúan de manera compleja y su entendimiento es fundamental, para contribuir a la sostenibilidad y mejorar la capacidad productiva del suelo.

De acuerdo con Letey (1985), los atributos físicos relacionados con la productividad del suelo se pueden dividir en dos categorías: (a) los que están directamente relacionadas

con el desarrollo de la planta, es decir, el agua, el oxígeno, la resistencia a la penetración y la temperatura, y (b) los que tienen relación indirecta, como la textura, la agregación, la porosidad y la densidad.

Autores como Topp *et al.* (1997), Schoenholtz *et al.* (2000) y Singer & Ewing (2000), confirman que los atributos más utilizados como indicadores de la calidad física del suelo son aquellas que tienen en cuenta la profundidad efectiva del enraizamiento, la porosidad total, la distribución de tamaño de poros, la distribución de tamaño de las partículas, la densidad del suelo, la resistencia del suelo a la penetración, el agua disponible y la estabilidad de agregados.

Para Gho (2004) y Jaramillo (2002), la variabilidad del suelo depende del atributo que se analice, donde los químicos varían más que los físicos. A su vez, se encuentra menor variabilidad en su condición natural siendo, generalmente, mayor la variabilidad en los atributos afectados por el manejo del suelo. Por otra parte, el contenido de nitrógeno y fósforo, son más inestables y difíciles de predecir (Schepers *et al.*, 2004).

Los resultados del estudio realizado por Gho (2004), indican que la variabilidad se puede expresar a través del coeficiente de variación, y que hay atributos como el pH y la materia orgánica, que son más estables en el espacio, lo que permite hacer una predicción más clara de su comportamiento espacial y, por ende, de la influencia sobre el rendimiento de los cultivos. El pH presenta menor variación en comparación con otros atributos químicos de suelo. Para definir el manejo más adecuado de este, es importante conocer su variabilidad. La CIC es de gran interés en relación con la fertilidad del suelo, ya que indica la capacidad de retención de cationes, que en general se convertirá en disponible para las plantas (Chaves *et al.*, 2004).

El fósforo es un nutriente de escasa movilidad y baja solubilidad. A menudo se verifica que en la labranza cero, hay una mayor acumulación de este elemento en los primeros centímetros de la superficie (Bayer & Mielniczuk, 1997; Falleiro *et al.*, 2003). Estos resultados corresponden con los encontrados por Almeida *et al.* (2005), autores que estudiaron diferentes sistemas de manejo, encontrando diferencias a nivel superficial, donde los niveles de P fueron 10 veces mayores en labranza cero, en comparación con la labranza convencional.

La densidad aparente se ha definido como un parámetro que da indicios de la presencia de zonas endurecidas y compactadas ya que la reducción del espacio poroso presente

en el suelo acarrea un aumento en el valor de la D_a (Herranz *et al.*, 2000; Ramírez-López *et al.*, 2008; Veronese Junior *et al.*, 2006). En cuanto a la densidad real (D_r) está ligada con el tipo y cantidad de constituyentes minerales y orgánicos del suelo y la velocidad de sedimentación de las partículas (Henaó, 2010; Orjuela-Matta *et al.*, 2011). La densidad real y la densidad aparente tienen un papel predominante en la porosidad total y por consiguiente, en el movimiento y retención del agua en el suelo (Cruz *et al.*, 2010).

La caracterización de la variabilidad espacial del suelo permite mejorar la correcta comprensión de las complejas relaciones entre las características y el ambiente del suelo (Goovaerts, 1998), ayudando a determinar el uso de prácticas más adecuadas al suelo (Bouma *et al.*, 1999).

1.2 Geoestadística y la variabilidad espacial de los atributos del suelo

La estadística espacial es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios (puntos del espacio o agregaciones espaciales) de una región (Giraldo, 2002).

Los atributos del suelo son variables continuas, que se supone que fluctúan de acuerdo con la dirección y la distancia de separación y, por tanto, existe entre ellos, una dependencia espacial (Moura *et al.*, 1992). El estudio de la variabilidad espacial de los atributos físicos y químicos de los suelos es importante en áreas con manejos diferentes. Puede ser el indicio del manejo de suelos alternativos para reducir efectos de la variabilidad horizontal y vertical del suelo (Silva *et al.*, 2003).

La geoestadística se conforma de dos formas básicamente. La primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. La segunda se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de la técnica "Kriging" (Petitgas, 1996). En la geoestadística se comprueba la presencia de dependencia espacial entre los atributos del suelo. Esta dependencia espacial entre las muestras adyacentes puede estimarse por medio del semivariograma. El semivariograma es un gráfico que relaciona la semivarianza de una variable dada, a una distancia (h). Los semivariogramas tienen tres parámetros comunes que son: el efecto pepita (C_0), la

meseta (C_0+C_1) y el rango o alcance (a). El efecto pepita indica la discontinuidad entre las muestras, es decir la variabilidad espacial no detectada durante el proceso de muestreo. La meseta es el valor de la semivarianza donde el modelo se estabiliza, exhibiendo un valor constante. El rango representa la distancia hasta la cual existe correlación espacial. Después de hallar el semivariograma de la variable en estudio y no encontrar dependencia espacial, se pueden interpolar los valores en cualquier posición en el área de estudio, sin tendencia y con una variación mínima. (Vieira, 2000). No obstante, en ciencias del suelo, el semivariograma se ha utilizado para definir, de manera más precisa, distancias de muestreo (Van Es *et al.*, 1989; Fagroud & Van Meirvenne, 2002).

Gandah *et al.* (2000) encontró que el conocimiento de la variación de los atributos con el uso de productos químicos es importante para el estudio, manejo del suelo, la programación de planes de muestreo y la gestión de las prácticas agrícolas. La variabilidad de estos atributos puede ser responsable de la oscilación de la productividad. Antes de la búsqueda de cualquiera de estos elementos, es importante evaluar el alcance y la intensidad de la dependencia espacial de esta variación, ya sea sola o en combinación con otros parámetros.

A través de geoestadística, numerosos estudios de campo han demostrado la importancia de estudiar las variaciones de las condiciones del suelo como un aspecto fundamental para implementar una agricultura más eficiente y rentable, mostrando que la variabilidad del suelo no es puramente al azar, sino que manifiesta una correlación o dependencia espacial (Souza *et al.*, 2004).

Silva *et al.* (2003) estudió la variabilidad espacial de las características químicas del suelo y la productividad del maíz en Ultisoles, encontrando que todos los atributos estudiados mostraron una condición de moderada a fuerte dependencia espacial. El alcance de la dependencia espacial fue de 4.5 m de la productividad de maíz y estaba muy cerca del rango de saturación de aluminio, Al + H y aluminio intercambiable. Para el pH, el potasio intercambiable, el calcio intercambiable, el magnesio y la CIC efectiva y saturación de bases, el alcance fue de 20 m. Es probable que el manejo reciente de la zona afecte la variabilidad en las características como el fósforo y el potasio.

Camacho-Tamayo *et al.* (2008) estudiaron la distribución espacial en un suelo en la Altillanura colombiana en propiedades químicas como pH, carbono orgánico, P, Al, Ca,

Mg, K y Na de las cuales la mayoría presentó dependencia espacial, donde el K y Na presentaron variogramas de efecto pepita puro o rangos bajos. Peña *et al.* (2009) realizaron estudios en un Inceptisol de la Orinoquia colombiana, hallando una fuerte dependencia espacial en variables como A, CICE, CIC, Ar, Al, L, K, Bases totales y pH, que según el rango del semivariograma, la distancia óptima de muestreo es, en promedio, 547.33 m, y según el análisis de varianza es superior a 279 m. Ramírez López *et al.* (2008) estudiaron la distribución espacial en un Typic Haplustox de los Llanos Orientales en profundidades de 0-10 y 10-20 cm, encontrando que para la resistencia a la penetración, la densidad real, la porosidad total, y los contenidos de arena solo presentaron dependencia espacial a una profundidad de 0-0.10 m. de igual manera, a la profundidad de 0.10-0.20 m no presentaron dependencia espacial, mostrando una variabilidad espacial aleatoria.

La agricultura de precisión (AP) o siembra de precisión es el manejo de la variabilidad espacial y temporal con el objetivo de incrementar los retornos económicos y reducir el impacto ambiental. Esto no implica, necesariamente, una estrategia de manejo específica o algún nivel de uso de tecnología (Revista Nacional de Agricultura, 2007). La agricultura de precisión (AP) permite, mediante la recopilación de datos de campo debidamente georreferenciados, relacionarlos con las prácticas agronómicas, rendimiento y condiciones ambientales; analizarlos espacialmente y luego plantear estrategias que permitan la aplicación de una forma específica del sitio, a través prácticas agronómicas como la fertilización, control de malezas, de plagas y enfermedades, y la adecuación del suelo.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Puerto López (Meta), en la finca Versailles, en el lote Carlos 1, ubicada en el Km 5 vía Cabuyaro con coordenadas 4°09'51.31 de latitud norte y 72°48'38.86 de longitud oeste, a una altura aproximada de 232 msnm. El suelo actualmente se encuentra bajo cultivo de maíz, en un sistema de rotación (maíz-soya) y manejo de mecanización de siembra directa. De acuerdo a la clasificación de Köppen, la región corresponde al clima tropical lluvioso (o megatermal) de bosque (Ami) (Eslava *et al.*, 1986). Las lluvias medias anuales de esta zona están entre 2200 y 2400 mm, en los meses de abril y noviembre, las temperaturas máxima media anual promedio de la región de 32.1 °C y la mínima media anual de 22.5 °C (Bernal *et al.*, 2013). La humedad relativa de 75 % (Jaimes *et al.*, 2003). La evotranspiración en época seca es relativamente alta (>200 mm) (Rippstein *et al.*, 2001).

Para la descripción de las características morfológicas se realizó una calicata, acorde a las especificaciones del manual de campo para el levantamiento de suelos y tierras del IGAC (2006) (Anexo A). Con base en información climática, vegetación, geomorfología y materiales parentales, tomadas en la zona y basados en bibliografía, se procedió a hacer un modelo de génesis y evolución del suelo Typic Hapludox presente en la finca Versailles.

El suelo estudiado se encuentra ubicado sobre un paisaje de altiplanicie, un relieve de ondulaciones y la forma del terreno corresponde a la ladera de la ondulación. El material parental son sedimentos aluviales plioleistocenos, provenientes de la cordillera oriental, aunque no se descartan sedimentos provenientes del escudo guayanés (Gaviria & Faivre, 2005).

El perfil descrito para este estudio corresponde al código AP2 y el suelo que representa fue identificado como Typic Hapludox. Este suelo presentó una profundidad efectiva > 150 cm (muy profunda), y a 7 cm de profundidad se evidenció una capa endurecida, que

genera limitantes en el crecimiento de las raíces del maíz. Los horizontes diagnosticos fueron un epipedon ócrico, sobre un endopedon óxico (Figura 2-1).

Los horizontes maestros fueron: un horizonte Ap, de espesor de 41 cm, según la tabla Munsell, se tiene un color de 5YR 3/3 (pardo rojizo oscuro). La estructura corresponde a bloques subangulares y granulos, finos y medios con un grado de expresión fuerte, de textura Arcillo-limosa (ArL). La consistencia en húmedo es firme; muy pegajosa y muy plástica en mojado. En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos ($> 10 \text{ dm}^{-2}$) de tamaño fino a grueso (<0.5 a $>5\text{mm}$), de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre los agregados. Presento reacción ligera al H_2O_2 y el pH por el método del colorímetro es de 4.3. El límite entre el horizonte Ap y el horizonte Bo_1 es difuso y de topografía ondulada. Las raíces son muchas ($>10 \text{ dm}^{-2}$), finas a gruesas (<0.1 a $> 5 \text{ mm}$) se encuentran vivas entre los agregados, sobre la capa endurecida con una distribución anormal y la actividad de los microorganismos es mucha.

Un horizonte Bo_1 , de espesor de 27 cm, según la tabla Munsell, se tiene un color de 2.5YR 4/8. La consistencia en húmedo es friable; muy pegajosa y muy plástica en mojado; la estructura corresponde a bloques subangulares medios y gruesos de expresión fuerte, de textura arcillosa (Ar). En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos, de tamaño fino a grueso, de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre los agregados. No presento reacción positiva al H_2O_2 y el pH es de 4.3. Las raíces son pocas, finas y se encuentran vivas entre los agregados, con una distribución normal y la actividad de los microorganismos es mucha.

Un horizonte Bo_2 de espesor > 130 cm, según la tabla Munsell, se tiene un color rojo sucio 10R 4/8. La consistencia en húmedo es friable; muy pegajosa y muy plástica en mojado. La estructura corresponde a bloques subangulares medios y gruesos de expresión fuerte, de textura arcillosa (Ar). En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos, de tamaño fino y medios, de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre agregados. No presento reacción positiva al H_2O_2 y el pH es de 4.3. No hay raíces y la actividad de los microorganismos es poca.

Figura 2-1: Perfil descrito, morfología y nomenclatura de los horizontes. Foto: Milton Alarcón.



Análisis químico:

Horizonte Ap, de espesor de 41 cm, textura FAr, pH de 4.16, saturación de Al.I de 71.8 %, contenidos de MO de 2.93 %, P de 9.8 mg kg⁻¹, S 36.7 mg kg⁻¹, Ca de 0.34 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg de 0.16 cmol₍₊₎ kg⁻¹, K de 0.17 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Na de 0.04 cmol₍₊₎ kg⁻¹, CE de 0.09 dS m⁻¹, CICE de 2.95; y elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.4, Fe de 9.2, Mn de 1.0 y Zn de 0.3 mg kg⁻¹.

Horizonte Bo₁, de espesor de 27 cm, textura FAr, pH de 4.44, saturación de Al.I de 65.2 %, contenidos de MO de 1.82 %, P de 1.5 mg kg⁻¹, S 7.5 mg kg⁻¹, Ca de 0.32 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg de 0.10 cmol₍₊₎ kg⁻¹, K de 0.08 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Na de 0.04 cmol₍₊₎ kg⁻¹, CE de 0.17 dS m⁻¹,

CICE de 1.89; y elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.3, Fe de 9.7, Mn de 1.0 y Zn de 0.1 mg kg⁻¹.

Horizonte B_{O2} de espesor > 130 cm, textura FAr, pH de 4.5, saturación de Al.I de 55.2 %, contenidos de MO de 0.47 %, P de 1.5 mg kg⁻¹, S 3.8 mg kg⁻¹, Ca de 0.39 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg de 0.15 cmol₍₊₎ kg⁻¹, K de 0.04 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Na de 0.05 cmol₍₊₎ kg⁻¹, CE de 0.05 dS m⁻¹, CICE de 2.04; y elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.2, Fe de 5.9, Mn de 0.7 y Zn de 0.1 mg kg⁻¹.

Análisis físicos:

Horizonte Ap, de espesor de 41 cm, con clasificación cero en conductividad hidráulica de 0 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 43.48, Da de 1.31 de g cm⁻³, Dr de 2.66 g cm⁻³ y porosidad total de 51 %.

Horizonte Bo₁, de espesor de 27 cm, con clasificación lenta en conductividad hidráulica de 0.36 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 47.95, Da de 1.26 de g cm⁻³, Dr de 2.69 g cm⁻³ y porosidad total de 53 %.

Horizonte B_{O2} de espesor > 130 cm, con clasificación cero en conductividad hidráulica de 0.0 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 38.69, Da de 1.41 de g cm⁻³, Dr de 2.68 g cm⁻³ y porosidad total de 47 %.

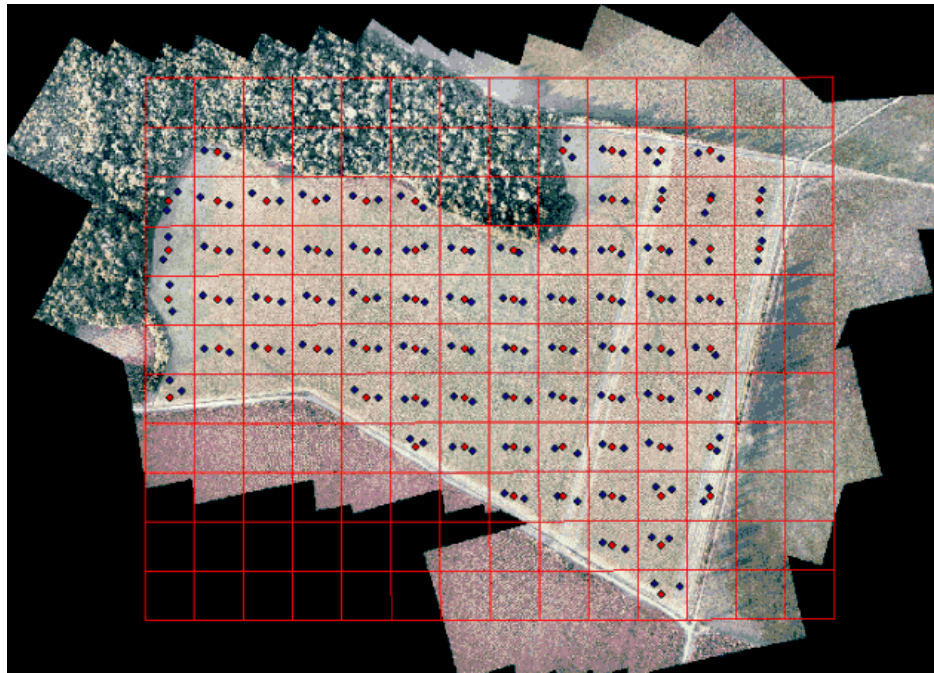
De acuerdo a las características morfológicas descritas anteriormente, este suelo es identificado a nivel categórico de subgrupo como Typic Hapludox, familia fina, isohipertermica.

El primer muestreo de los atributos físicos y químicos se realizó en el mes de julio de 2012, en este suelo se practica siembra directa y el lote se encontraba recientemente sembrado con maíz. El segundo muestreo de rendimiento de cultivo se hizo en el mes de diciembre del mismo año (Figura 2-2).

2.2 Diseño experimental

La unidad experimental contó con un área de uso agrícola con cultivos de rotación como: arroz, soya y maíz. Se estableció una malla de 70 m por 70 m, compuesta por 75 puntos de muestreo. Cada punto fue georreferenciado y se tomaron muestras a profundidades teniendo en cuenta el tipo de cultivo entre 0 y 10 cm y entre 10 y 20 cm (Figura 2-2).

Figura 2-2: Ubicación espacial del lote de estudio, Finca Versailles lote Carlos 1. Foto: CORPOICA. 2013



2.3 Mediciones de campo y toma de muestras

En cada punto de la malla, se realizaron lecturas de RP hasta 0.60 m de profundidad mediante el Penetrologger Eijkelkamp de punta cónica con 2 cm² de base y ángulo de 60°(Figura 2-5, izq.). Con el equipo TDR Fieldscout se tomaron los contenidos de humedad para las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm (Figura 2-3, der.).

Figura 2-3: Penetrologger Eijkelkamp, con sonda de humedad DELTA (Izq.) y TDR Fieldscout (der.).



Mediante la utilización de cilindros metálicos de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro se extrajeron muestras inalteradas a profundidades de 0-10 cm y 10-20 cm para la determinación de propiedades físicas como la porosidad (PT), retención de humedad, densidad aparente (Da) y conductividad hidráulica (Ks). también muestras alteradas para la determinación de propiedades químicas, humedad (hum) y textura (A, L, y Ar) (Figura 2-4).

Figura 2-4: Muestra inalterada (cilindro metálico, izq.), muestras alteradas (humedad campo centro, atributos químicos der.).



Al momento de la cosecha, en cada punto se construyó un cuadro de 5 m * 3.6 m, donde se tomaron muestras para estimar el mapa de rendimiento. De allí se tomaron datos de humedad en campo del grano con el equipo AgraTronix MT-PRO, se pesó el bulto y se escogieron 10 mazorcas representativas para pesarlas completas y desgranadas (figura 2-5).

Figura 2-5: Cosecha de maíz. Contenido de humedad del grano (izq.), desgrane (centro), toma de datos de peso de grano (der.).



2.4 Análisis de laboratorio

Las muestras de campo se procesaron en los laboratorios de física de Suelos de Corpoica La libertad en Villavicencio, Meta; el Laboratorio Nacional de suelos del IGAC y el Laboratorio de Suelos y Poscosecha del Departamento de ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

2.4.1 Humedad gravimétrica

La humedad gravimétrica de los puntos muestreados se determinó mediante la diferencia entre la humedad saturada y la secada al horno a 105°C durante 24 h dividida por esta.

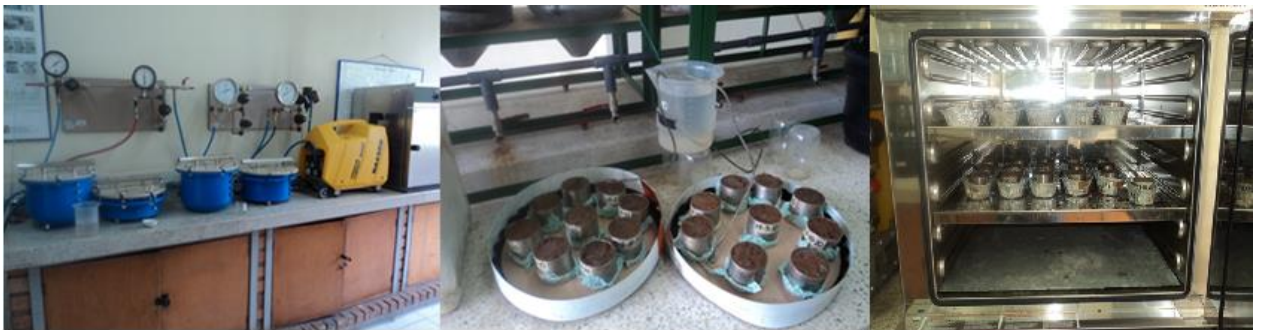
2.4.2 Textura

El análisis de textura se realizó mediante el método de densímetro (Bouyoucos) (IGAC, 2006).

2.4.3 Porosidad y conductividad hidráulica

Para la determinación de estas propiedades físicas se empleó la olla de presión del equipo de retención de humedad. El procedimiento que se utilizó en orden fue: la saturación de las muestras durante 24 horas para luego ser introducidas a presiones de 0.1, 0.3, 0.6, 1, 5, 10, y 15 bar para obtener las curvas de retención de humedad en contenido volumétrico contra presión, ajustadas al modelo de Van Genuchten con la ayuda del software de uso libre RETC (Figura 2-6).

Figura 2-6: Equipo de retención de humedad (izq.); saturación de muestras en platos porosos (centro); secado horno 24 h (der).



La conductividad hidráulica se determinó mediante el método de carga constante saturada, siguiendo la metodología del IGAC, con muestras saturadas por 24 h y luego de ser preparadas se pasaron al equipo de carga constante, donde se colocaron bajo un flujo de agua constante tomando datos en tiempos determinados para medir el agua drenada (IGAC, 2006) (Figura 2-7).

Figura 2-7: Saturación de muestras (izq); equipo de conductividad hidráulica saturada (centro); toma de datos (der).



La porosidad total se determinó mediante la diferencia del punto de saturación y la muestra seca a 105°C por 24 h dividido por el volumen de la muestra inalterada. La macroporosidad se obtuvo mediante la diferencia del punto de saturación la humedad a 0.1 bar; la microporosidad se determinó entre la diferencia del PMP y la muestra seca, por otro lado la mesoporosidad se calculó mediante la diferencia entre el punto 0.1 y 15 bar, cuyo resultado se usó para establecer el agua disponible (Mejía, 1996).

2.4.4 Densidad Aparente y Real

La densidad aparente se determinó mediante la relación del peso de la muestra seca a 105°C y el volumen del anillo de muestreo utilizado por Grossman & Reinsch (2002) y (Orjuela-Matta *et al.*, 2011)(Figura 2-8).

La densidad real se determinó mediante el método del picnómetro, siguiendo la metodología del IGAC (Figura 2.9), donde las muestras secas se pasaron por el tamiz de 2 mm y procesadas en un picnómetro de 25 mL, con una solución de agua destilada para luego ser colocadas en una campana de vacío para la extracción del aire durante un tiempo determinado (IGAC, 2006).

Figura 2-8: Metodología para hallar densidad aparente, muestras en el horno a 105°C (izq.); muestras inalteradas (der).



Figura 2-9: Metodología para hallar densidad real, muestra en pipeta (izq.); equipo para hallar densidad real (centro); muestras (der).



2.4.5 Preparación de la muestra de suelo carbono total y nitrógeno total

La preparación de las muestras de suelo se realizó en el laboratorio de Ing. Agrícola con los implementos necesarios como tamiz, rodillo, estufa, entre otros. Las muestras secas y desagregadas pasadas a través de un tamiz de 250 μm son llevadas al Laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional, sede Bogotá para que se realizaran los respectivos análisis de Carbono y Nitrógeno Total. Las propiedades químicas determinadas fueron carbono total (CT) y nitrógeno total (NT), mediante determinador elemental (TruSpec CN Carbon Nitrogen Determinator, LECO co., St. Joseph, Mi, USA).

2.4.6 Características de los granos de maíz

En el laboratorio de poscosecha, se determinó la densidad aparente mediante el peso del grano sobre el volumen conocido; la densidad real del grano mediante la diferencia de volumen en la sumersión del grano en agua, la velocidad terminal y la porosidad total.

2.5 Procesamiento y análisis de datos

Con los datos obtenidos, se realizó el análisis estadístico descriptivo con el programa SPSS V.20 donde se determinó la media, mediana, máximo, mínimo, coeficiente de variación (CV), asimetría y curtosis. De esta manera se verifico tanto empírica como numéricamente el ajuste a la normalidad para cada variable, para mejores predicciones cuando se asocia a técnicas geoestadísticas (Diggle & Ribeiro, 2000). En cuanto al análisis del CV se consideró el criterio de Warrick & Nielsen (1980), autores que definen variabilidad baja para CV menores de 12%, variabilidad media entre 12 y 60% y variabilidad alta para CV mayores a 60%.

Para el análisis geoestadístico se utilizó el software GS+ v. 9 (Gamma Design Software, LLC, Plainwell, MI), a partir del cual se seleccionaron los modelos teóricos de semivariograma con base en el menor valor de la suma de los cuadrados residuales (SQR), el mayor valor de coeficiente de determinación (R^2) de la ecuación de ajuste y los valores más cercanos a uno del coeficiente de validación cruzada (Faraco *et al.*, 2008; Johann *et al.*, 2010).

A partir de los modelos de semivariogramas de los atributos que expresaron dependencia espacial, se realizó la interpolación por el método de Kriging ordinario, utilizado para hacer predicción en sitios no muestreados, presentándose los resultados mediante mapas de contorno. Este procedimiento fue realizado con el programa Surfer v.9 (Golden Software Inc., Golden, CO)

Para definir las zonas de manejo agrícola (ZM), se emplearon tres métodos. El primer método es el análisis clúster, mientras que el segundo y tercer métodos están relacionados a partir de la estimación de un índice del suelo (SI) con dos procedimientos diferentes: el análisis de componentes principales (CP) y el coeficiente de variación (CV). En el análisis clúster se incluyeron los resultados obtenidos de cada atributo y se consideró todos los sitios de muestreo (observaciones o casos). Este análisis permite

identificar grupos de observaciones que poseen algunas semejanzas entre sí (Ferreira, 2011).

De acuerdo con Ortega & Santibáñez (2007), un (SI) corresponde a una combinación lineal de las atributos del suelo seleccionado, donde se elige el peso de cada atributo, de manera que la diferencia (variación) entre los puntos de muestreo se maximiza, de acuerdo a la ecuación (1).

$$SI_Z = \sum w_i P_{iz} \quad (1)$$

Donde, SI_Z es el índice del suelo en la posición Z de muestreo; w_i es el peso de la variable estandarizada P_{iz} en la posición Z de muestreo. Este SI es una variable continua formada por los atributos del suelo que se pueden clasificar y delimitar, con una representación en un mapa.

En el caso del CP, un SI se puede obtener a partir de la varianza de cada componente (w_i) y del factor de calificación (factor score) (P_{iz}). En este caso, la obtención de zonas de manejo del suelo se pueden hacer mediante la consideración de percentiles, cuartiles o de la media y su relación con la desviación estándar.

Para la estimación del SI a partir del coeficiente de variación (CV), se supone que los atributos que mostraron una mayor variabilidad en el campo, expresada a través del (CV) tendrán un mayor peso estadístico en la combinación lineal. La estandarización de cada variable se realizó dividiendo los valores de cada atributo por su valor máximo, de tal manera que los valores estándar puede variar entre 0 y 1, manteniendo el valor del CV. El peso relativo de cada variable se obtuvo de la siguiente manera: Ecuación (2).

$$w_i = \frac{CV_i}{\sum CV_i} \quad (2)$$

donde, w_i es el peso de la variable i y CV_i es el coeficiente de variación de la variable i .

Una vez identificadas las zonas de manejo por cada método, se elaboraron los mapas de las (ZM). Finalmente, se estimó la correlación entre las ZM y cada atributo, para establecer la correspondencia e influencia de estas en las ZM.

3. Análisis de resultados

3.1 Análisis descriptivo

En las Tablas 3-1, 3-2, 3-3 y 3-4, se encuentran en valores similares de la media y la mediana en la mayoría de las variables estudiadas esto sugiere que el comportamiento de las distribuciones tiende a la normalidad, también los valores para la asimetría y la curtosis son cercanos a 0 en las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm para los atributos químicos: pH, Mo, Ac.I, K, C.E y N; físicos: resistencia a la penetración (RP), humedad de campo y TDR (hum campo, hum TDR), densidad aparente (Da) y mesoporosidad (Mep), confirmando mediante la prueba de Anderson-Darling que estos atributos pertenecen a una distribución normal. Esta aproximación a la distribución normal, expresado por la asimetría y la curtosis, aunque no es indispensable para el análisis geoestadístico, permiten una mayor confiabilidad, dado que la varianza es más estable y el semivariograma obtenido muestra una dependencia espacial mejor definida (Camacho-Tamayo *et al.*, 2008).

El pH extremadamente ácido (< 4.5) en las dos profundidades indica una elevada acidez que puede derivar de la pérdida continua de minerales de fácil intemperismo, producto de la lixiviación (Rippsteins *et al.*, 2001), valores semejantes reportados por Camacho-Tamayo *et al.* (2010), Jaimes *et al.* (2003) y Rubiano (2005).

El pH en la profundidad 0-10 cm es ligeramente mayor, esto puede ser debido a los tratamientos de encalado que se realizan al suelo antes de la siembra, aspecto que se observa en el menor valor de Al.I en esta profundidad. Camacho-Tamayo *et al.* (2008).

La alta disponibilidad de Al.I (0.93 y 1.11 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$) en las profundidades estudiadas respectivamente aumenta el riesgo de toxicidad para las plantas (Jaimes *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2003). Los valores encontrados se asemejan a los reportados por Amézquita *et al.* (2013) en dos suelos con texturas contrastantes (liviana y pesada) de un oxisol en los llanos orientales de Colombia.

Tabla 3-1: Medidas descriptivas de las variables pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 0-10 cm de profundidad.

ATRIBUTO	Media	Mediana	Asim.	Curtosis	Mín	Máx	CV	A-D
pH	4.59	4.57	0.45	0.17	4.26	5.05	3.31	*
MO, %	2.98	3.23	-0.32	0.11	1.18	4.34	29.14	*
P, mg kg^{-1}	40.77	38.20	0.94	0.73	10.46	81.45	35.95	NS
S, mg kg^{-1}	7.68	7.31	0.75	-0.02	4.48	13.57	28.77	NS
Ac.I, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	1.13	1.16	-0.15	-0.85	0.29	1.90	35.58	*
Al.I, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	0.93	0.94	-0.23	-0.74	0.06	1.82	44.05	*
Ca, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	0.69	0.66	0.28	-0.43	0.90	1.20	29.54	*
Mg, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	0.23	0.24	-0.09	-0.48	0.08	0.38	30.59	*
K, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	0.29	0.28	0.18	-0.29	0.11	0.50	28.97	*
Na, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	0.07	0.07	-0.13	-0.56	0.03	0.11	27.74	NS
C.E, dS m^{-1}	0.14	0.13	-0.03	-0.58	0.08	0.19	18.18	NS
Fe, mg kg^{-1}	25.95	25.72	0.77	0.15	19.40	38.80	18.69	NS
Cu, mg kg^{-1}	0.57	0.56	0.65	0.38	0.20	1.24	39.42	*
Mn, mg kg^{-1}	1.55	1.40	0.77	-0.44	0.36	3.40	52.36	NS
Zn, mg kg^{-1}	2.89	2.74	1.29	2.70	1.04	6.60	34.58	NS
B, mg kg^{-1}	0.23	0.23	0.69	0.47	0.14	0.42	25.71	NS
CIC, $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$	10.80	11.26	-0.81	0.24	4.94	15.01	22.44	NS
C, %	1.72	1.86	-1.02	0.20	0.67	2.41	25.35	NS
N, %	0.12	0.12	-0.38	-0.44	0.05	0.19	27.17	NS

Normal: *; No normal: NS

Para esta propiedad (pH) y la RP a la profundidad 10-20 cm de acuerdo al criterio de Warrick & Nielsen (1980), se demostró tener variabilidad baja con CV inferiores al 12 % para las demás propiedades mostraron CV media inferiores a 60%. Esta condición está relacionada con las prácticas de labranza mínima empleadas en el cultivo, así como en el

aumento en el contenido de P en la profundidad 0-10 cm con respecto a la profundidad 10-20 cm (40.77 y 7.56 mg kg⁻¹), esto sugiere la aplicación reiterada de fertilizantes en el suelo. Silveira *et al.* (2000), Silva *et al.* (2003), Carvalho *et al.* (2003), que encontraron una concentración mayor de P en capas superiores en un oxisol del Cerrado brasileiro que fue incorporado a la producción agrícola mediante siembra directa. La manipulación mecánica del suelo durante la labranza puede aumentar las posibilidades de contacto entre la solución del suelo o el P proveniente del fertilizante y exponer las partículas del suelo; esto facilita la formación de compuestos estables de P insolubles (Hinsinger, 2001; Picone *et al.*, 2003).

Tabla 3-2: Medidas descriptivas de las variables pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 10-20 cm de profundidad.

ATRIBUTO	Media	Mediana	Asim.	Curtosis	Mín	Máx	CV	A-D
pH	4.50	4.50	-0.21	-0.31	4.23	4.73	2.48	*
MO, %	2.40	2.55	-0.51	-0.46	1.06	3.64	27.42	NS
P, mg kg ⁻¹	7.56	6.81	0.90	0.00	1.67	18.99	55.32	NS
S, mg kg ⁻¹	23.46	23.64	-0.01	-0.13	4.78	44.75	36.48	*
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.30	1.28	-0.21	-0.85	0.46	2.03	31.23	*
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.11	1.11	-0.02	-0.71	0.33	2.08	37.32	*
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.44	0.43	0.77	0.34	0.27	0.70	23.18	NS
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.14	0.13	0.68	0.29	0.08	0.21	21.47	NS
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.12	0.12	0.24	0.25	0.05	0.19	23.55	NS
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.06	0.05	0.86	0.36	0.03	0.11	29.27	NS
C.E, dS m ⁻¹	0.11	0.11	-0.24	0.78	0.06	0.15	14.93	NS
Fe, mg kg ⁻¹	17.85	17.40	0.78	0.48	10.68	29.32	22.32	NS
Cu, mg kg ⁻¹	0.42	0.40	0.21	-1.25	0.16	0.68	36.37	NS
Mn, mg kg ⁻¹	0.66	0.56	1.01	0.37	0.24	1.52	47.28	NS
Zn, mg kg ⁻¹	0.92	0.84	0.72	0.12	0.20	1.80	38.07	NS
B, mg kg ⁻¹	0.26	0.25	0.87	-0.10	0.14	0.47	34.04	NS
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	8.90	9.38	-0.20	-0.96	4.15	13.82	27.54	NS
C, %	1.47	1.54	-0.69	-0.34	0.70	2.13	23.67	NS
N, %	0.10	0.10	0.45	0.61	0.04	0.18	27.18	NS

Normal: *; No normal: NS.

En las profundidades estudiadas se observa los contenidos de Ca entre 0.44 y 0.69 ($\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$), Mg entre 0.14 y 0.23 ($\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$) y K entre 0.12 y 0.29 ($\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$), estos datos son menores a los registrados por la estación experimental Taluma no intervenidos y la finca Santa Cruz en este tipo de oxisoles (Camacho-Tamayo *et al.*, 2008) (Tabla 3-1 y 3-2).

El CV medio próximo a 27 % en las dos profundidades, con valores bajos observados en las Tablas 3-1 y 3-2 para NT, son una consecuencia de la dinámica del N en el suelo que dependen de la actividad microbiana que a su vez se ve afectada por muchos factores, como la especie del cultivo, la cantidad y calidad de los residuos, la historia antes de la aplicación de fertilizantes y factores externos como la humedad, temperaturas, pH y el suelo (Ortega *et al.*, 2007; Martins *et al.*, 2011), ya que el N liberado de las fuentes orgánicas puede perderse del sistema por las mismas vías, volatilización como amonio, denitrificación de nitratos y lixiviación que reducen la eficiencia del N proveniente de fertilizantes (Friesen *et al.*, 2013).

Tabla 3-3: Medidas descriptivas de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map, Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 0-10 cm de profundidad.

ATRIBUTO	Media	Mediana	Asim.	Curtois	Mín	Máx	CV	A-D
RP, MPa	1.32	1.31	0.11	-0.53	0.79	1.85	18.50	*
Hum Campo, % Vol	26.62	26.90	-0.23	-0.59	9.40	39.20	25.88	*
Hum TDR, % Vol	26.20	26.83	-0.59	0.37	12.83	35.83	17.93	*
A, %	51.28	48.90	1.89	3.40	40.17	76.96	14.98	NS
Ar, %	25.74	26.37	-1.49	2.65	12.37	33.71	15.50	NS
L, %	22.55	23.95	-1.29	0.97	7.33	30.00	23.81	NS
Dr, g cm^{-1}	2.57	2.56	0.58	0.23	2.36	2.81	3.27	NS
Da, g cm^{-1}	1.47	1.45	0.19	-0.81	1.08	1.84	12.45	*
Ks, cm dia^{-1}	17.57	15.5	0.98	0.35	4.1	47	58.98	NS
PT, %	46.46	48.15	-0.67	-0.67	34.27	56.69	12.13	NS
Map, %	9.52	8.45	0.74	-0.58	3.89	18.03	37.41	NS
Mep, %	8.00	8.12	0.13	-0.51	5.47	11.48	17.31	*
Mip, %	29.23	30.16	-0.55	0.18	17.37	38.79	16.80	NS

RP: Resistencia a la penetración; Hum: humedad; A: arena; Ar: arcilla; L: limo; Dr: densidad real; Da: densidad aparente; Ks: conductividad hidráulica; PT: porosidad total; Map: macroporosidad; Mep: mesoporosidad; Mip: microporosidad; Normal: *; No normal: NS.

Tabla 3-4: Medidas descriptivas de las variables RP (MPa), hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map, Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 10-20 cm de profundidad.

ATRIBUTO	Media	Mediana	Asim.	Curtosis	Mín	Máx	CV	A-D
RP, MPa	1.98	1.99	-0.02	-0.36	0.50	2.48	11.10	*
Hum Campo, % Vol	26.83	26.60	-0.12	-0.90	11.30	38.50	24.59	*
Hum TDR, % Vol	26.05	26.70	-0.65	0.16	15.87	34.03	15.21	NS
A, %	50.66	48.53	1.83	1.03	40.83	77.63	15.14	NS
Ar, %	29.09	29.71	-1.08	1.51	16.19	35.71	14.61	NS
L, %	20.32	21.20	-1.13	0.82	9.33	26.59	21.11	NS
Dr, g cm ⁻¹	2.66	2.66	1.19	7.38	2.34	2.66	3.63	NS
Da, g cm ⁻¹	1.51	1.50	0.13	-0.61	1.10	1.91	11.52	*
Ks, cm dia ⁻¹	13.78	12	0.81	-0.21	2.5	34.6	58.48	NS
PT, %	45.43	46.67	-0.92	0.08	32.42	53.48	11.96	NS
Map, %	7.8	7.11	0.92	0.08	4.55	14.51	30.98	NS
Mep, %	7.74	7.58	0.42	-0.24	4.96	12.08	19.89	*
Mip, %	30.15	30.58	-0.55	0.21	17.8	38.87	15.7	NS

RP: Resistencia a la penetración; Hum: humedad; A: arena; Ar: arcilla; L: limo; Dr: densidad real; Da: densidad aparente; Ks: conductividad hidráulica; PT: porosidad total; Map: macroporosidad; Mep: mesoporosidad; Mip: microporosidad; Normal: *; No normal: NS.

Los valores de RP en la profundidad 0-10 cm (Tabla 3-3) se encuentran por debajo de los reportados para la altillanura colombiana por Rubiano (2005) y Jaimes *et al.* (2003), quienes encontraron que estos valores para la sabana nativa oscilan entre 1.73 y 3.37 MPa, esto muestra la diferencia de los valores en este atributo cuando se realiza manejo de suelos y preparación del terreno para la siembra. En la profundidad de 10-20 cm promedian los 1.98 MPa, mostrando probablemente una capa endurecida teniendo en cuenta que un valor de 2.7 MPa es considerado como límite crítico para la penetración de raíces en cultivos comerciales (Corrales *et al.*, 2003). También puede ser producida por la siembra directa empleada en este cultivo, esta genera limitantes para el crecimiento de las raíces, las cuales restringen su exploración a esta capa, lo cual hace que se presente un mayor estrés hídrico en el cultivo y no pueda aprovechar las demás capas del suelo con mejores condiciones (Medina *et al.*, 2012).

Los contenidos de L y Ar están entre valores de 20 y 30 % y son menores al contenido de A, que presento valores promedios de 51 % datos superiores a los obtenidos por

Ramírez-Lopez *et al.* (2008) para un Typic Haplustox de los Llanos orientales de Colombia.

Para este tipo de suelo de textura entre franco arcillosa y franco arenosa el agua disponible o Mep es de 8 % en volumen para las dos profundidades (Tabla 3-3 y 3-4), mientras que para un tipo de suelo en la Altillanura plana bajo sabana nativa es de 14 y 9 % respectivamente, valores mayores a los obtenidos en este estudio (Amézquita *et al.*, 2000), esto probablemente debido a mayor contenido de humedad a capacidad de campo.

La densidad aparente presento valores de 1.47 y 1.51 gr cm⁻³ y PT de 46 % para las dos profundidades 0–10 cm y 10-20 cm, este atributo muestra un CV bajo puesto que, de acuerdo con los criterios de Warrick & Nielsen (1980), los valores están cercanos al 12 % mientras que un sistema arroz-caupí con labranza mínima presentó valores de 1.30 gr cm⁻³ para densidad aparente normal y una buena porosidad total (47 %) (Valencia *et al.*, 2001). Diversos estudios en oxisoles de Hawai y Puerto Rico (El-Swaify, 1980) mostraron que la densidad aparente de estos suelos por lo general fluctúan entre 0.7 y 1.7 g cm⁻³ y que casi invariablemente, tiende a aumentar con la profundidad. La Da denota valores medios, indicando la presencia de procesos naturales de adensamiento de los agregados del suelo que disminuye cuando el suelo es intervenido (Jaimes *et al.*, 2003).

La PT presento valores entre 45 y 46 %, que se ubican dentro de los datos encontrados por Jaimes *et al.* (2003) y Ramírez-Lopez *et al.* 2008, en un oxisol de los Llanos orientales de Colombia, y en un sistema agropastoril (basados en maíz), en Carimagua presento valores de 52 %, esto probablemente debido a que el sistema maíz-soya, cuando la leguminosa se incorporó como abono verde, presento mayor PT, Ks, Map, condiciones en general favorables para la producción agrícola (Amézquita *et al.*, 1997; Spain *et al.*, 2007).

En la Tabla 3-5, se encuentran en valores similares de la media y la mediana en la mayoría de las variables estudiadas esto sugiere que el comportamiento de las distribuciones tiende a la normalidad, también los valores para la asimetría y la curtosis son cercanos a 0 para las características: CP, PMAZ, PGR, Hum del grano, Da grano, Dr grano y Rdto, confirmando mediante la prueba de Anderson-Darling que estos atributos pertenecen a una distribución normal.

El valor de Rdto (6.33 ton ha⁻¹) es mayor a los obtenidos bajo siembra directa (4.71 ton ha⁻¹) en la rotación maíz-soya incorporada como abono verde en el Ensayo Culticore, fase II, Carimagua, en los Llanos Orientales de Colombia (Rivera et al., 2013).

Tabla 3-5: Medidas descriptivas de las variables poscosecha

ATRIBUTO	Media	Mediana	Asim.	Curt.	Min	Max	CV	A-D
AP, cm	238.23	240	-0.11	-0.44	204.7	271.7	5.66	NS
NP	102.51	104	0.08	0.93	81	136	9.36	NS
DS, planta ha ⁻¹	56707	57963	-0.52	-0.59	45185	65185	8.63	NS
CP, kg	14.116	14.45	-0.39	-0.59	9.9	17.7	13.09	*
PMAZ, g	911.95	911.3	-0.52	0.92	643.3	1096	9.08	*
PGR, gr	756.51	756.7	-0.03	0.67	596.7	934.7	8.3	*
Hum, (%Vol)	16.769	16.7	0.37	-0.05	15.2	18.4	4.03	*
Da, kg m ⁻³	773.72	770.81	-0.01	-0.3	719.81	813.13	2.79	*
Dr, kg m ⁻³	1275.9	1274.9	0.06	0.04	1214.8	1337.8	2.11	*
Rdto, ton ha ⁻¹	6.329	6.4	-0.08	-0.47	4.3	8.6	14.19	*

AP: altura planta; NP: número de plantas; DS: densidad de siembra; CP: cosecha punto; PMAZ: peso mazorcas; PGR: peso grano; Hum: humedad; Da: densidad aparente; Dr: densidad real; Rdto.: rendimiento

3.2 Análisis de variabilidad espacial

Con el análisis descriptivo se procede con el análisis geoestadístico (Tablas 3-6, 3-7, 3-8 y 3-9). Se puede afirmar que las variables estudiadas cumplen con la hipótesis de estacionalidad fuerte, dado que los modelos obtenidos son acotados (Biau *et al.*, 1997; Samper & Carrerra, 1990).

Los resultados muestran variedad en los modelos, excepto para el contenido de P en la profundidad 10-20 cm que presentó un efecto pepita puro (EPP) indicando carencia de correlación espacial entre las observaciones de una variable (Giraldo, 2002). Para las demás propiedades predomina el modelo gaussiano en la profundidad 0-10 cm y para la profundidad 10-20 cm se presenta paridad entre modelos con valores de R² medio de 0.95 y 0.90 y un coeficiente de validación cruzada (CVC) de 0.94 y 0.97 respectivamente. En cuanto al grado de dependencia espacial (GDE), se observó que en la mayoría de los atributos estudiados se obtuvieron valores superiores al 0.75 para las dos profundidades,

exceptuando algunas bases intercambiables como Na, K, Mg, Fe y el contenido de limo (L) de 0.51 demostrando una dependencia espacial fuerte (Cambardella *et al.*, 1994).

Tabla 3-6: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 0-10 cm de profundidad.

Atributo	Modelo	Co	C+Co	Rango, m	GDE	R ²	CVC
Ph	Esférico	2.0E-5	0.021	153	0.99	0.73	0.70
MO	Gaussiano	0.174	1.047	866	0.84	1.00	1.03
P	Gaussiano	332.0	1587.0	353	0.79	0.99	1.03
S	Exponencial	0.740	6.370	192	0.88	0.72	0.87
Ac.I	Gaussiano	0.062	0.428	1146	0.86	0.96	1.01
Al.I	Gaussiano	0.054	0.427	1200	0.87	0.97	0.99
Ca	Exponencial	1.0E-4	0.037	204	0.99	0.77	0.86
Mg	Esférico	0.002	0.005	393	0.50	0.95	1.01
K	Gaussiano	0.004	0.007	530	0.51	0.90	0.91
Na	Gaussiano	3.0E-4	0.001	587	0.53	0.98	1.09
CE	Exponencial	2.0E-4	0.001	189	0.84	0.66	0.63
Fe	Gaussiano	12.96	39.81	413	0.67	1.00	1.06
Cu	Gaussiano	0.028	0.207	1558	0.87	0.94	0.96
Mn	Gaussiano	0.217	0.791	580	0.73	1.00	0.97
Zn	Esférico	0.610	1.325	417	0.54	0.82	0.69
B	Esférico	0.001	0.009	169	0.87	0.75	0.78
CIC	Gaussiano	1.210	9.520	715	0.87	0.97	0.99
C	Gaussiano	0.035	0.140	475	0.77	0.99	0.99
N	Exponencial	0.0002	8.0E-4	316	0.70	0.93	0.86

Desde el punto de vista teórico un alto valor en el rango permite obtener curvas de predicción más suavizadas reduciendo las magnitudes en varianzas (Díaz, 1993). Basándose en esto se observa que los rangos obtenidos de Cu y Al en la profundidad 10-20 cm y contenido de limo y K son superiores a la máxima distancia de muestreo (1170 m). Lo anterior es un indicador de fuerte dependencia espacial.

Los resultados de la interpolación se obtuvieron mediante Kriging ordinario, los resultados más significativos se encuentran a continuación y los demás se encuentran en el anexo C.

Tabla 3-7: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de pH, MO, acidez intercambiable (Ac.I), aluminio intercambiable (Al.I), elementos mayores y menores del suelo para 10-20 cm de profundidad.

Atributo	Modelo	Co	C+Co	Rango, m	GDE	R ²	CVC
Ph	Exponencial	5.5E-4	0.010	186	0.95	0.71	0.87
MO	Gaussiano	0.105	0.520	676	0.80	0.99	1.06
P	EEP	27.67	2767	441	0.99	0.50	-4E-3
S	Esférico	26.5	86.03	351	0.69	0.99	0.99
Ac.I	Gaussiano	0.032	0.413	1027	0.92	0.98	1.02
Al.I	Gaussiano	0.032	0.371	1018	0.91	0.98	1.01
Ca	Esférico	0.007	0.013	622	0.50	0.93	0.91
Mg	Gaussiano	8.3E-4	0.002	819	0.61	0.94	1.02
K	Exponencial	4.7E-4	0.001	1761	0.58	0.96	0.83
Na	Esférico	1.5E-4	3.2E-4	428	0.53	0.98	0.98
CE	Exponencial	5.1E-5	3.2E-4	261	0.84	0.87	0.91
Fe	Esférico	12.16	32.82	954	0.63	0.93	1.05
Cu	Gaussiano	0.005	0.031	661	0.82	0.99	1.04
Mn	Gaussiano	0.065	0.224	465	0.71	0.99	1.01
Zn	Exponencial	0.009	0.119	120	0.93	0.71	0.76
B	Exponencial	0.001	0.009	267	0.87	0.87	0.96
CIC	Gaussiano	0.95	7.909	727	0.88	0.95	1.00
C	Exponencial	1.0E-4	0.089	106.8	1.00	0.77	0.94
N	Exponencial	1.0E-5	5.2E-4	158.1	0.98	0.84	0.94

Para RP (Figura 3-1), muestra los mayores valores ubicados en el perímetro del lote donde se realiza el volteo del tractor con valores medios a altos, de 1.30 y 1.90 MPa y Dr que fluctúa entre 2.5 y 2.7 g cm⁻³ en las profundidades estudiadas respectivamente, esto contempla que probablemente existan capas endurecidas que generan limitantes para el crecimiento radicular, reducen la porosidad, y restringen la exploración a esta capa superficial.

Tabla 3-8: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map, Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 1-10 cm de profundidad.

Atributo	Modelo	Co	C+Co	Rango, m	GDE	R ²	CVC
RP	Exponencial	5.5E-3	0.06	258.00	0.91	0.96	0.91
Hum	Exponencial	7.60	51.76	243.90	0.85	0.80	0.85
Hum TDR	Gaussiano	5.99	30.27	947.43	0.80	0.99	1.03
A	Gaussiano	9.00	78.62	524.29	0.89	0.99	1.01
Ar	Gaussiano	3.96	14.99	306.57	0.74	1.00	1.01
L	Gaussiano	5.10	41.20	749.70	0.88	1.00	1.01
Dr	Exponencial	1.0E-4	0.01	188.70	0.98	0.83	0.90
Da	Gaussiano	0.01	0.07	1042.00	0.88	0.99	1.06
Ks	Exponencial	84.20	192.80	627.20	0.56	0.98	0.97
PT	Gaussiano	3.40	37.80	644.00	0.91	1.00	1.02
Map	Exponencial	0.64	12.65	173.10	0.95	0.98	0.92
Mep	Gaussiano	0.74	2.42	354.20	0.70	1.00	0.96
Mip	Gaussiano	6.99	22.79	502.12	0.69	1.00	1.02

Tabla 3-9: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables RP, hum campo y TDR, Da, Dr, PT, Map, Mep, Mip, contenidos de A, Ar, L, del suelo para 10-20 cm de profundidad.

Atributo	Modelo	Co	C+Co	Rango, m	GDE	R ²	CVC
RP	Exponencial	7.0E-4	0.04	183.00	0.98	0.82	0.92
Hum	Gaussiano	30.40	76.72	753.44	0.60	0.98	1.06
Hum TDR	Gaussiano	1.50	22.99	825.44	0.93	0.98	0.99
A	Gaussiano	6.00	59.03	493.63	0.90	1.00	1.00
Ar	Exponencial	1.80	18.03	493.80	0.90	0.99	1.01
L	Gaussiano	3.30	26.59	694.20	0.88	1.00	1.02
Dr	Exponencial	3.2E-3	0.01	1837.00	0.61	0.93	0.69
Da	Gaussiano	0.01	0.07	1031.00	0.91	0.99	1.07
Ks	Gaussiano	59.20	204.10	928.7	0.71	0.936	1.09
PT	Gaussiano	3.10	37.20	688.49	0.92	1.00	1.02
Map	Exponencial	3.58	11.17	2387.70	0.68	0.88	0.86
Mep	Esférico	0.33	3.08	438.60	0.89	1.00	1.03
Mip	Esférico	1.87	19.67	528.80	0.90	1.00	0.99

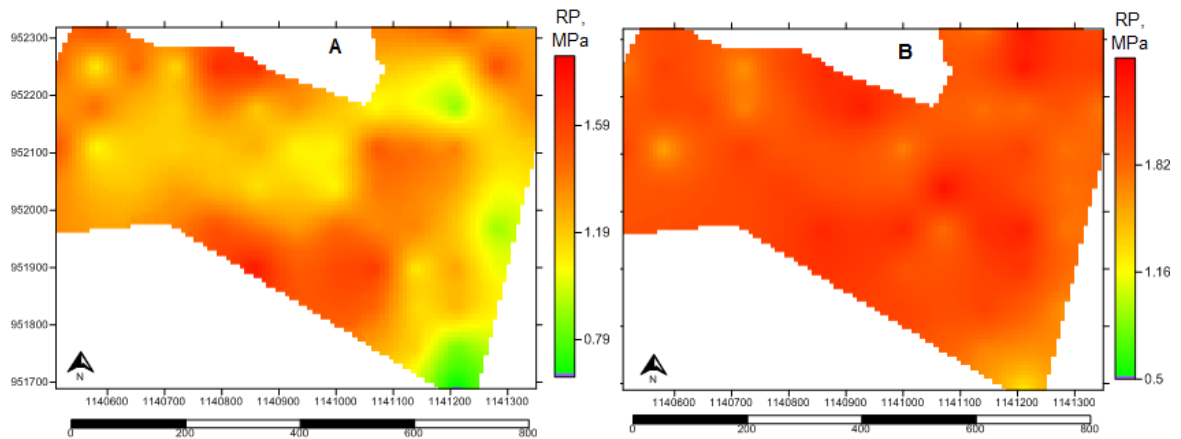
RP: Resistencia a la penetración; Hum: humedad; A: arena; Ar: arcilla; L: limo; Dr: densidad real; Da: densidad aparente; Ks: conductividad hidráulica; PT: porosidad total; Map: macroporosidad; Mep: mesoporosidad; Mip: microporosidad.

Tabla 3-10: Parámetros de los semivariogramas obtenidos de las variables de poscosecha

Atributo	Modelo	Co	C+Co	Rango, m	GDE	R ²	CVC
AP	Esférico	21.4	194.9	310	0.89	0.97	0.88
NP	Esférico	0.1	95.8	245	1.00	0.85	0.93
DS	Esférico	10000	2.95E7	245	0.99	0.85	0.93
CP	Esférico	0.25	3.319	231	0.92	0.77	0.94
PMAZ	Exponencial	4000	8318	1443	0.52	0.96	0.82
PGR	Exponencial	10	3467	162	1.00	0.87	0.80
Hum	Exponencial	0.004	0.407	117	0.99	0.65	0.62
Da	Exponencial	58	537.3	177.3	0.89	0.91	0.82
Dr	Exponencial	53	891.8	160	0.94	0.83	0.91
Rdto.	Esférico	0.013	0.892	263	0.99	0.75	0.93

AP: altura planta; NP: número de plantas; DS: densidad de siembra; CP: cosecha punto; PMAZ: peso mazorcas; PGR: peso grano; Hum: humedad; Da: densidad aparente; Dr: densidad real; Rdto.: rendimiento.

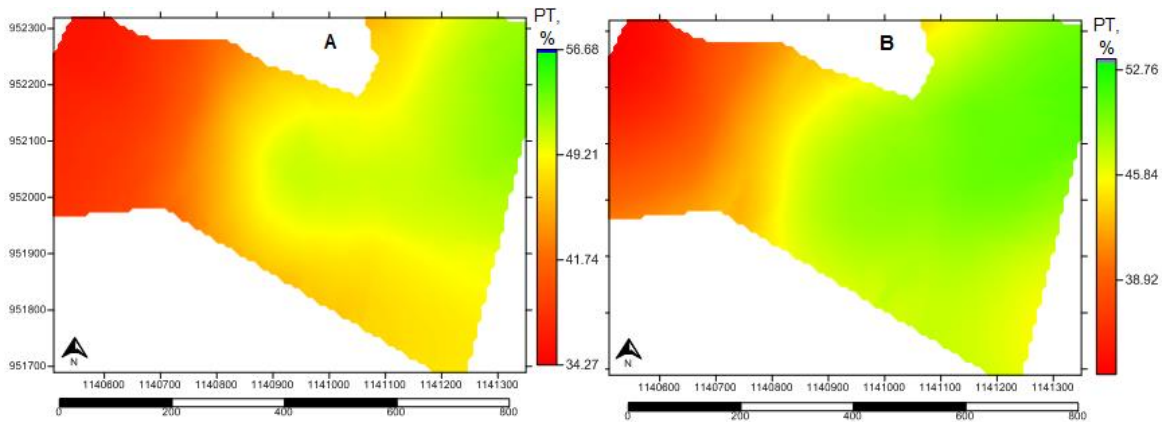
Figura 3-1: Mapas de contorno de la RP del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).



La densidad aparente es alta en las dos profundidades (1.47 g cm^{-3} y 1.51 g cm^{-3}) estando los valores más bajos en la zona occidente del lote estudiado, indicando suelos adensados. Por otro lado la mayor PT se encuentra en esta misma zona (Figura 3-2), con valores medios y altos (45 y 47 %); predomina la Mip (entre 29 y 30 %) pero con contenidos similares de Map y Mep (entre 7 y 10 %) que retienen buen oxígeno para las

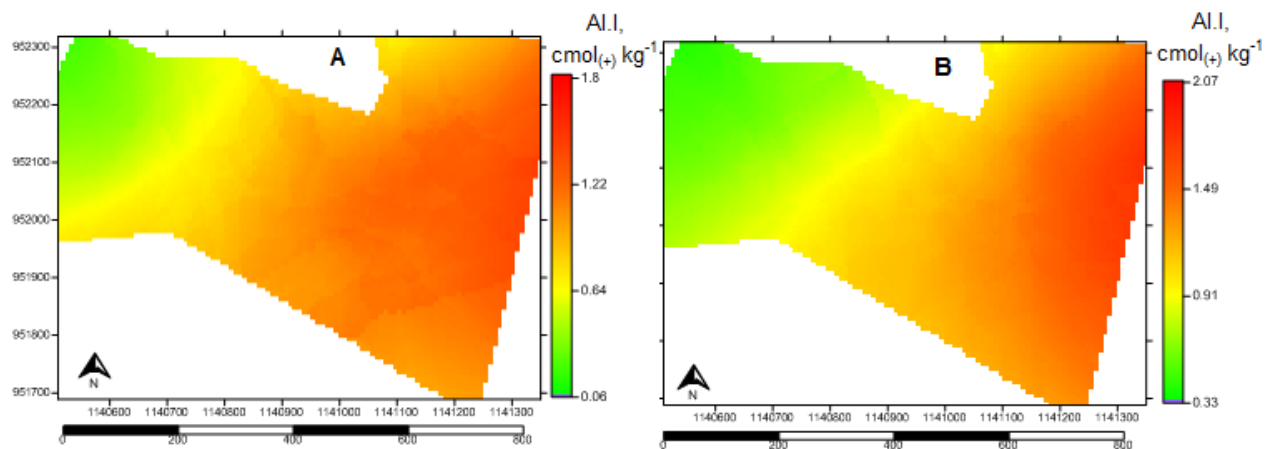
plantas aunque tienen una baja capacidad de agua aprovechable o disponible. La conductividad hidráulica, de acuerdo a la calificación Konke, varía entre lenta y muy rápida, con valores entre 2.5 y 63.3 cm día^{-1} .

Figura 3-2: Mapas de contorno de la PT del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).



La zona occidente del mapa presenta una reducción de MO, con una tasa de media de 2.98 % en la primera profundidad y 2.40 % en la segunda, disminuyendo su contenido con la profundidad al igual que la baja CIC (10.80 y 8.9 $\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}); el pH es muy ácido entre 4.5 y 5, la acidez intercambiable entre 1.13 y 1.30 ($\text{cmol}_{(+)}$ kg^{-1}), contiene saturaciones altas de Al.I (Figura 3-3) y Fe (25.95 y 17.85 mg kg^{-1}) tendiendo de igual manera a disminuir con la profundidad.

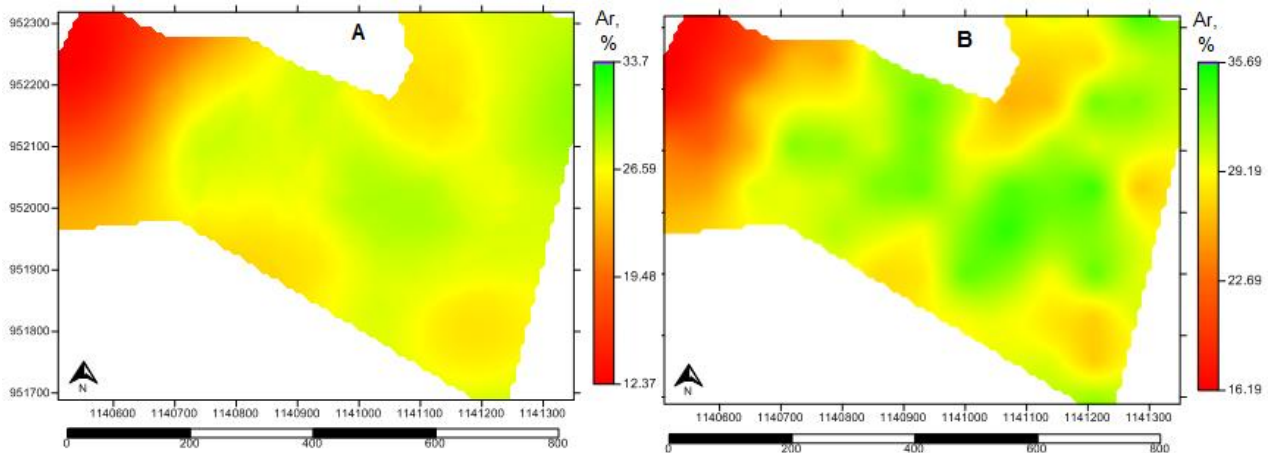
Figura 3-3: Mapas de contorno de la Al.I del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).



existe una deficiencia de Ca (0.69 y 0.44 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$) para las dos profundidades y los elementos menores se hallan en trazas, bajos contenidos de P (40.77 y 7.56 mg kg^{-1}), Mg ($\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$), K (0.07 y 0.12 $\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$), B (0.23 y 0.26 mg kg^{-1}), Cu (0.57 y 0.42 mg kg^{-1}), Mn (1.55 y 0.66 mg kg^{-1}) y Zn (2.89 y 0.92 mg kg^{-1}) y baja relación Ca: Mg.

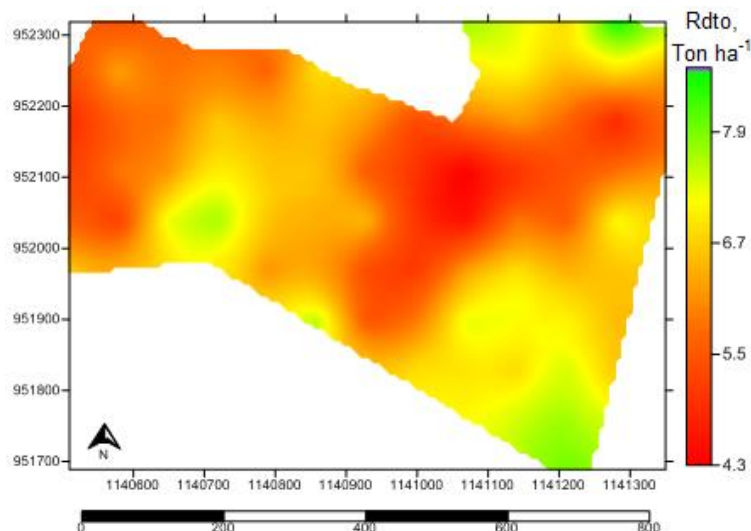
Los contenidos de Ar y L en las dos profundidades muestran valores altos en la mayoría del mapa exceptuando una pequeña área en la zona occidente del lote (Figura 3-4); por el contrario los altos contenidos de A se encuentran en la parte occidente del plano. Esto tiene relación directa con la pendiente del terreno, la cual tiene un gradiente de 3 a 5%, esto también influye en los niveles de concentración de elementos químicos a lo largo del terreno, siendo común encontrar concentraciones mayores en las zonas arcillosas.

Figura 3-4: Mapas de contorno de Ar del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).



El mapa de interpolación de kriging (Figura 3-5) muestra que los valores mayores de Rdto se encuentran ubicados en la periferia del lote, esto es causado porque en estas zonas hay una mayor densidad de plantas (mapa DS, Anexo C) debido probablemente al volteo repetido de la sembradora.

Figura 3-5: Mapas de contorno de Rdto del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).



3.3 Correlación entre atributos del suelo

Para definir el grado de relación que existe entre las variables, se procedió a correlacionarlas con Pearson para confirmar su correlación lineal ya sea directa o inversamente, la cual puede verificarse visualmente en los mapas de contorno.

3.3.1 Correlación de Pearson

En la primera profundidad y con los atributos químicos se encuentra una relación significativa positiva para la variable de Rdto con pH, Ca, Mg, K y Mn; negativa o inversa para Rdto con la Ac.I, (Tabla 3-11) esto tiene razón debido a que a mayor pH y Ca disminuye la acidez, lo que debería significar mayor rendimiento del cultivo, esto se puede observar en los mapas de contorno donde la zona norte (parte izd. de la gráfica) muestra los valores más altos de rendimiento y con ello las zonas más bajas de acidez (Figura 3-3, pH, Ac.I y Al.I; Figura 3-5, Rdto). Otras relaciones significativas son: inversas para pH con S, Ac.I, Al.I, CE CT; positivas para MO con Ac.I, Ca, Mg, K, Mn, CIC, NT y CT; positivas para Ac.I con Al.I, CE, Cu, Mn, CIC, NT y CT e inversas para Ac.I con Rdto. La explicación lógica se da porque la concentración de nutrientes es mayor en la MO.

De igual manera que en la primera profundidad, en la segunda profundidad (Tabla 3-12) se encuentra una relación significativa positiva para la variable de Rdto con Ca, Mg y K, y negativa o inversa con la Ac.I. Otras relaciones significativas positivas son pH con Ca y Mg; inversas para pH con MO, S, Ac.I, Al.I, Cu, CIC y CE; positivas para MO con Ac, Ac.I, Ca, K, Mn, CIC, Zn, Cu, NT y CT; positivas para Ac.I con Al.I, CIC, Zn, Mn, NT y CT; inversas para Ac.I con Fe; positivos para Al con Cu, Mn, Zn, CIC, NT y CT; inversos para Al.I con Fe.

En el caso de NT, en los casos estudiados, se correlacionó positivamente pero no hubo una relación significativa con el Rdto. Una explicación podría ser que la cantidad de NT del suelo en la mayoría de lote no fue un factor de limitación en el rendimiento y posiblemente, hay otros atributos del suelo que influyen más en el rendimiento del cultivo.

Tabla 3-11: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos químicos y rendimiento del suelo en la profundidad 0-10 cm

	pH	MO	P	S	Ac.I	Al.I	Ca	Mg	K	Na	CE	Fe	Cu	Mn	Zn	B	CIC	NT	CT	Rdto
pH	1																			
MO	-0.11	1																		
P	0.12	-0.11	1																	
S	-0.42	-0.19	-0.04	1																
AC.I	-0.67	0.66	-0.18	0.07	1															
Al.I	-0.64	0.67	-0.18	0.04	0.98	1														
Ca	0.55	0.41	-0.09	-0.36	-0.11	-0.07	1													
Mg	0.61	0.45	-0.04	-0.34	-0.11	-0.08	0.96	1												
K	0.23	0.55	-0.09	-0.18	0.22	0.24	0.62	0.67	1											
Na	-0.03	0.04	-0.22	-0.05	0.06	0.01	0.14	0.08	0.11	1										
CE	-0.31	0.19	0.14	0.26	0.23	0.19	-0.01	0.02	0.42	-0.05	1									
Fe	0.08	-0.02	0.21	0.04	-0.07	-0.06	0.05	0.09	0.09	-0.2	0.08	1								
Cu	-0.01	0.15	0.35	0.08	0.24	0.26	0.11	0.16	0.19	-0.11	0.03	0.09	1							
Mn	0.13	0.54	0.05	-0.29	0.33	0.36	0.45	0.52	0.48	-0.22	0.08	0.27	0.22	1						
Zn	0.04	0.11	0.79	-0.12	0.04	0.06	0.11	0.15	0.08	-0.18	0.15	0.16	0.53	0.25	1					
B	-0.01	0.07	-0.06	0.11	-0.02	0.02	-0.07	-0.09	-0.12	-0.12	-0.06	-0.06	0.26	-0.21	-0.01	1				
CIC	-0.12	0.63	-0.04	-0.06	0.61	0.63	0.39	0.41	0.52	0.16	0.08	-0.12	0.64	0.42	0.25	0.07	1			
NT	-0.08	0.65	-0.02	-0.17	0.49	0.54	0.41	0.39	0.45	0	0.02	-0.01	0.26	0.39	0.23	0.06	0.6	1		
CT	-0.25	0.79	-0.13	-0.09	0.71	0.75	0.41	0.39	0.55	0.09	0.19	-0.05	0.25	0.48	0.15	0	0.69	0.82	1	
Rdto	0.39	0.12	0	-0.12	-0.25	-0.2	0.57	0.58	0.34	-0.07	-0.05	0.2	0.13	0.34	0.2	0.03	0.13	0.12	0.1	1

Números en negrita, representan correlaciones significativas al nivel de 0.05 (bilateral).

Tabla 3-12: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos químicos y rendimiento del suelo en la profundidad 10-20 cm

	pH	Mo	P	S	Ac.I	Al.I	Ca	Mg	K	Na	Ce	Fe	Cu	Mn	Zn	B	CIC	NT	CT	Rdto	
pH	1																				
MO	-0.41	1																			
P	0.21	-0.17	1																		
S	-0.34	0.08	-0.24	1																	
AC.I	-0.57	0.83	-0.19	0.01	1																
Al.I	-0.56	0.81	-0.16	0.02	0.99	1															
Ca	0.40	0.29	0.20	-0.31	0.16	0.17	1														
Mg	0.37	0.22	0.21	-0.03	0.09	0.09	0.85	1													
K	0.04	0.46	0.29	-0.05	0.29	0.29	0.46	0.52	1												
Na	0.04	0.16	-0.07	-0.14	0.21	0.19	0.29	0.20	0.11	1											
CE	-0.23	-0.11	0.12	0.52	-0.13	-0.12	-0.11	0.30	0.26	-0.05	1										
Fe	0.19	-0.54	0.16	-0.25	-0.47	-0.48	-0.07	-0.05	-0.10	0.06	0.17	1									
Cu	-0.34	0.77	0.02	-0.16	0.85	0.85	0.46	0.39	0.45	0.29	-0.06	-0.34	1								
Mn	-0.09	0.45	0.14	-0.39	0.59	0.59	0.51	0.43	0.39	0.33	-0.07	0.05	0.74	1							
Zn	-0.22	0.36	0.47	-0.12	0.39	0.39	0.29	0.28	0.41	0.11	0.05	-0.02	0.54	0.51	1						
B	-0.23	0.19	0.01	0.08	0.20	0.21	0.06	-0.02	0.09	0.04	0.03	-0.12	0.17	0.15	0.13	1					
CIC	-0.38	0.83	-0.19	0.03	0.87	0.87	0.25	0.20	0.35	0.20	-0.17	-0.50	0.80	0.53	0.35	0.14	1				
NT	-0.14	0.47	-0.07	0.01	0.47	0.46	0.19	0.21	0.20	0.11	-0.09	-0.38	0.53	0.28	0.23	0.11	0.47	1			
CT	-0.07	0.51	0.07	0.04	0.45	0.45	0.32	0.34	0.26	0.12	-0.06	-0.47	0.58	0.23	0.23	0.16	0.45	0.73	1		
Rdto	0.17	0.08	0.00	-0.13	0.07	0.06	0.48	0.41	0.24	0.17	-0.04	-0.01	0.20	0.18	0.07	-0.01	0.04	0.04	0.09	1	

Números en negrita, representan correlaciones significativas al nivel de 0.05 (bilateral).

En la primera profundidad y con los atributos físicos se encuentra una relación significativa positiva entre las variables de Rdto con L y Mip (Tabla 3-13). Otras relaciones significativas inversas son Mep con Mip; positivas entre Mip con L, Ar y PT inversas entre Mip con A, Dr y Da. Aquí se observa alta correlación negativa, puesto que si la A, Dr y Da disminuyeran los porcentajes de Mip en el suelo se reducirían y por ende afectaría la cuantificación de la PT logrando una mayor distribución de los poros en el suelo.

En la segunda profundidad y con los atributos físicos no se presentó correlación significativa positiva entre las variables con Rdto; por otro lado si existe una relación negativa o inversa para Rdto con A y Mep la cual indica que entre mayor rendimiento hay menor proporción de Arena y mesoporos. Otras relaciones significativas positivas se dan para Mep con Hum y Da, inversas para Mep con Mip, Ks y Rdto; positivas para Mip con L, Ar y PT; inversas para Mip con A y Da.

Aunque la RP no presento en la primera profundidad correlación significativa con ningún atributo del suelo, si muestra una correlación positiva significativa en la segunda con PT y Ar y negativa con A, esto indica que las condiciones físicas del suelo en la primera profundidad son mejores que en la segunda. por otra parte, al comparar los mapas de contorno (Figura 3-2) de RP con los mapas de PT y Da, se observa que zonas que presentan altos valores de RP, corresponden a zonas de alta Da y baja PT.

En las dos profundidades la Mip mostro una correlación positiva directa con PT, esto significa una predominancia de esta sobre Map y Mep en relación con la PT, lo que coincide con Martins *et al.* (2010) y Raczkowski *et al.* (2012) quienes afirmaron que un suelo con pocas labores de preparación como es este caso donde se emplea el método de labranza mínima presentan un mayor porcentaje de Mip (Tablas 3-3 y 3-4).

Tabla 3-13: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos físicos y rendimiento en el suelo para profundidad 0-10 cm

	A	L	Ar	RP	Hum	Dr	Da	PT	Map	Mip	Mep	Ks	Rdto
A	1												
L	-0.94	1											
Ar	-0.91	0.73	1										
RP	0.15	-0.16	-0.10	1									
Hum	-0.19	0.18	0.17	0.03	1								
Dr	0.65	-0.59	-0.62	0.06	-0.09	1							
Da	0.59	-0.60	-0.49	0.18	0.14	0.39	1						
PT	-0.79	0.74	0.72	-0.18	0.01	-0.57	-0.79	1					
Map	-0.01	0.02	0.00	-0.17	-0.20	0.00	-0.59	0.45	1				
Mip	-0.82	0.78	0.77	-0.05	0.09	-0.58	-0.44	0.74	-0.23	1			
Mep	0.10	-0.08	-0.10	-0.08	0.22	0.00	0.11	-0.09	0.02	-0.36	1		
Ks	0.24	-0.15	-0.31	0.02	-0.33	0.21	-0.49	0.09	0.58	-0.26	-0.15	1	
Rdto	-0.23	0.24	0.17	-0.18	0.12	-0.13	0.01	0.04	-0.20	0.24	-0.22	-0.09	1

Números en negrita, representan correlaciones significativas al nivel de 0.05 (bilateral).

Tabla 3-14: Correlaciones de Pearson obtenidas para atributos físicos y rendimiento en el suelo para profundidad 10-20 cm

	A	L	Ar	RP	Hum	Dr	Da	PT	Map	Mip	Mep	Ks	Rdto
A	1												
L	-0.89	1											
Ar	-0.89	0.59	1										
RP	-0.25	0.19	0.26	1									
Hum	-0.17	0.15	0.16	0.07	1								
Dr	0.08	-0.06	-0.08	0.04	-0.06	1							
Da	0.57	-0.59	-0.43	-0.19	0.08	0.11	1						
PT	-0.84	0.79	0.70	0.23	0.17	-0.15	-0.76	1					
Map	-0.23	0.21	0.20	0.13	0.03	-0.13	-0.72	0.53	1				
Mip	-0.81	0.76	0.68	0.18	0.05	-0.07	-0.52	0.85	0.06	1			
Mep	0.12	-0.08	-0.14	-0.02	0.39	-0.09	0.25	-0.18	-0.02	-0.48	1		
Ks	-0.18	0.23	0.09	0.13	-0.17	-0.10	-0.75	0.36	0.61	0.17	-0.31	1	
Rdto	-0.23	0.22	0.19	0.02	-0.04	0.22	-0.06	0.05	-0.07	0.17	-0.26	0.01	1

Números en negrita, representan correlaciones significativas al nivel de 0.05 (bilateral).

3.3.2 Análisis cluster

El análisis de agrupamiento jerárquico (AJ), permite identificar grupos de observaciones que poseen algunas semejanzas entre sí. La divergencia entre los grupos es una distancia medida. En este estudio se utiliza la distancia Euclidiana para separar un conjunto de puntos muestreados en grupos y los resultados se presentan en forma gráfica (dendograma), para facilitar la identificación de los grupos y de esta forma se establecen zonas homogéneas. En general, este método se considera muy eficiente, aunque crea grupos de pequeñas dimensiones (Ferreira, 2011).

En la Figura 3-6 se puede apreciar el agrupamiento jerárquico mediante el análisis multivariado de los atributos químicos del suelo, (A para la profundidad 0-10 cm y B para la profundidad 10-20 cm), utilizando una distancia Euclidiana de 20 y 17 respectivamente.

En la primera profundidad el primer grupo está compuesto por los atributos Rdto con pH, Ca y Mg que presentaron valores de correlación significativa de 0.39, 0.57 y 0.58 respectivamente y un comportamiento similar en la zona occidente y central de los mapas de contorno (Anexo C); El segundo grupo está compuesto por MO, NT, CT, K, Mn, Ac.I y Al.I con correlaciones positivas significativas de Pearson y semejanzas en la parte sur o (der.) de los mapas de contorno. El tercer grupo está compuesto por los casos P, Zn, S, CE, Fe, Na, Cu, CIC y B, con correlaciones no apreciables.

En la segunda profundidad, el primer grupo está constituido por los atributos pH, Fe, Ca, Mg, Rdto, P, K, Mn, Zn, Na y B con correlaciones de Pearson significativas y comportamientos similares en la zona oriente de los mapas de contorno (Anexo C); El segundo grupo está compuesto por S y CE con correlación de Pearson significativa de 0.52. Para el grupo tres los atributos son MO, CIC, Ac.I, Al.I, Cu, NT y CT. Se comportan equivalente a la profundidad de 0-10 cm.

Nótese que en ambos casos los valores de pH, Ca, Mg y Rdto tienden a tener una relación directa.

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Figura 3-6: Análisis clúster de los atributos químicos del suelo estudiado (A) 0-10 cm de profundidad y (B) 10-20 cm de profundidad

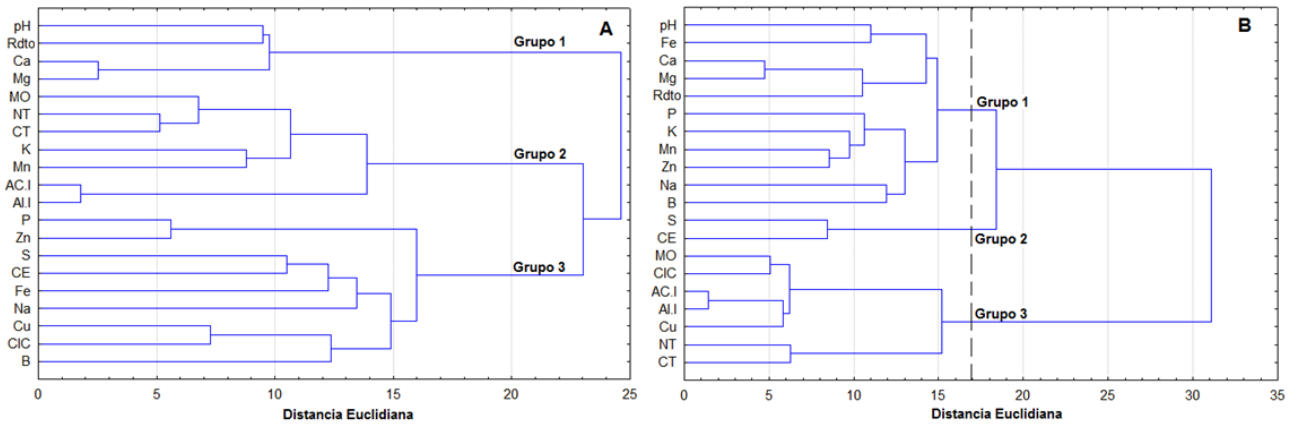
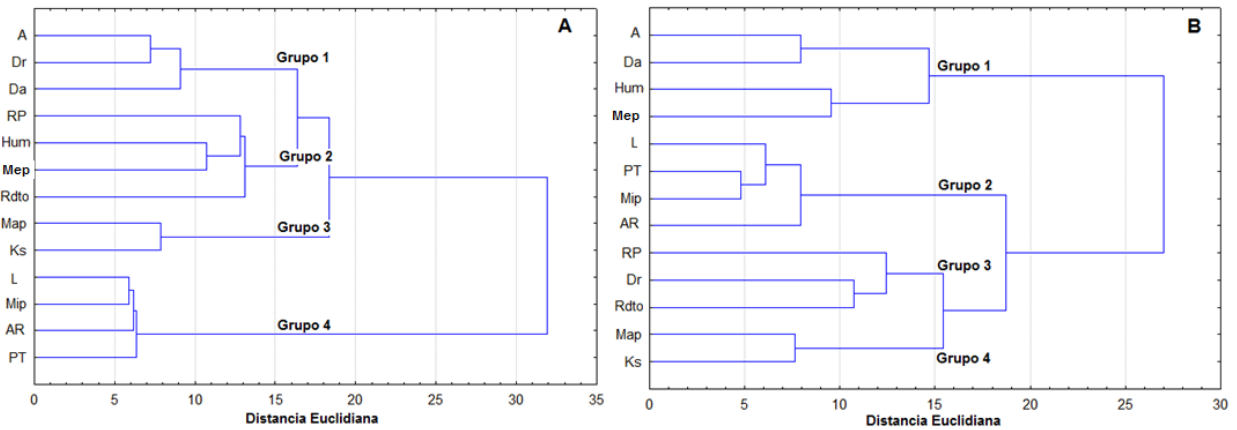


Figura 3-7: Análisis clúster de los atributos físicos del suelo estudiado (A) 0-10 cm de profundidad y (B) 10-20 cm de profundidad



En la Figura 3-7 se puede apreciar el agrupamiento jerárquico mediante el análisis multivariado de los atributos físicos del suelo, (A para la profundidad 0-10 cm y B para la profundidad 10-20 cm), utilizando una distancia Euclidiana de 15 para las dos profundidades.

En la primera profundidad se analizaron 4 grupos, el grupo uno está compuesto por los atributos A con Dr y Da con correlaciones de Pearson de 0.65 y 0.69 respectivamente y semejanzas en la zona occidental de los mapas de contorno (Anexo C). El segundo grupo está compuesto por RP, Hum, Mep y Rdto con correlaciones no significativas. El tercer grupo está constituido por Map y Ks con correlación de Pearson de 0.58 y comportamientos similares en la parte oriental y central de los mapas (Anexo C). El cuarto grupo por L con Mip, Ar y PT con correlaciones significativas de 0.78, 0.73 y 0.74 y semejanzas similares en todo el terreno.

En la segunda profundidad se analizaron 4 grupos, el grupo uno está compuesto por los atributos A, Da, Hum y Mep con correlaciones no significativas de Pearson. El segundo grupo está compuesto de igual manera que la primera profundidad por L, PT, Mip y Ar con correlaciones significativas y semejanzas en los mapas de contorno (Anexo C). El tercer grupo está constituido por RP, Dr y Rdto con correlaciones no significativas. El cuarto grupo por Map y Ks con 0.61 de correlación de Pearson y semejanzas en el comportamiento en la parte oriental y central de los mapas como sucede en la profundidad de 0-10 cm.

3.3.3 Análisis de componentes principales

La Tabla 3-15 muestra los valores de los análisis de componentes principales para los atributos químicos en la profundidad 0-10 cm del lote muestreado.

El ACP presento valores similares en ambas profundidades, característicamente en el componente uno (CP1) y el componente dos (CP2); en la primera profundidad se relacionaron los 6 primeros componentes debido a que presentaron valores propios superiores a 1 y representan más del 80 % de la varianza total. En cuanto a la segunda profundidad se relacionaron los 5 primeros componentes que representan más del 80.66 % de la varianza total (Tabla 3-16). El primer componente (CP1) representa el 30.45 y 33.88 % de la varianza total respectivamente, se observa que los atributos MO, Ac.I, Al.I, Ca, Mg, K, Mn, CIC, CT y NT muestran una relación estrecha entre si con correlación negativa corroborada por el coeficiente de Pearson (Tablas 3-11 y 3-12). El segundo componente (CP2) representa el 17.85 y 15.73 % de la varianza total respectivamente, con pH, Ca y Mg con correlación inversa en la primera y correlación positiva en la

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

segunda profundidad (Figura 3-8 y 3-9) al igual que el análisis cluster; los atributos Ac.I y Al.I son estrechamente relacionados con alta correlación positiva y con un coeficiente de Pearson de 0.978.

En la primera profundidad el tercer componente (CP3) con un 12.22 % de la varianza total es representado por P, Cu y Zn muestra una alta correlación negativa corroborada con el coeficiente de Pearson (Tabla 3-11). El quinto componente (CP5) con 6.54 % de la varianza total y es poco representativo. El cuarto componente (CP4) y sexto componente (CP6) con 7.67 y 5.93 % de la varianza total, B con correlación positiva es el que mejor que representa a estos componentes.

En la segunda profundidad, el tercer componente (CP3) con 9.53 % de la varianza total, los atributos que representan a este componente son S y CE muestran una alta correlación inversa con un coeficiente de Pearson de 0.52. El cuarto componente (CP4) y quinto componente (CP5) con 8.4 y 6.4 % de la varianza total, no presentan correlaciones significativas.

En ambas profundidades, los atributos químicos de mayor representatividad en el CP1, fueron MO, Ac.I, Al.I, Ca, Mg, K, Mn, CIC, CT y NT; en el CP2, fueron pH, Ca y Mg. Además, se encontró relaciones estrechamente ligadas entre Ac.I y Al.I con respecto a otros atributos. El Rdto presento correlaciones bajas con los demás atributos, así como poca representatividad en los componentes principales (Figura 3-8 y 3-9).

Figura 3-8: Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos químicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.

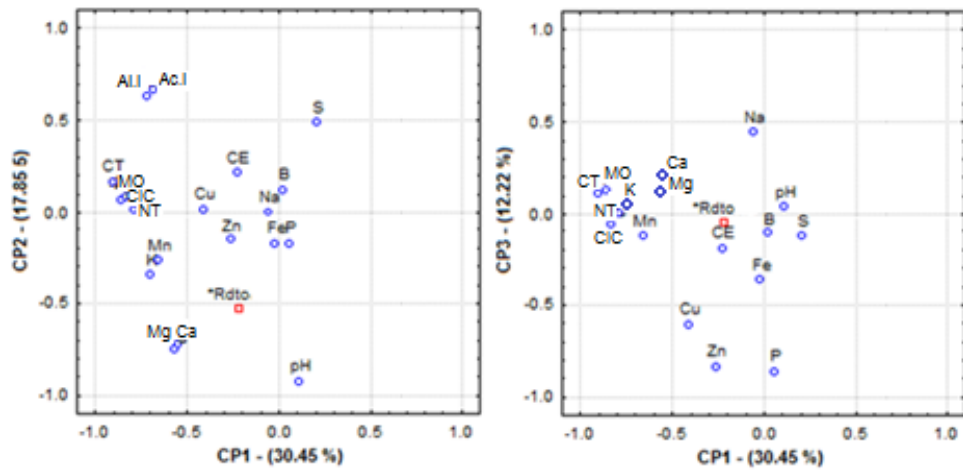
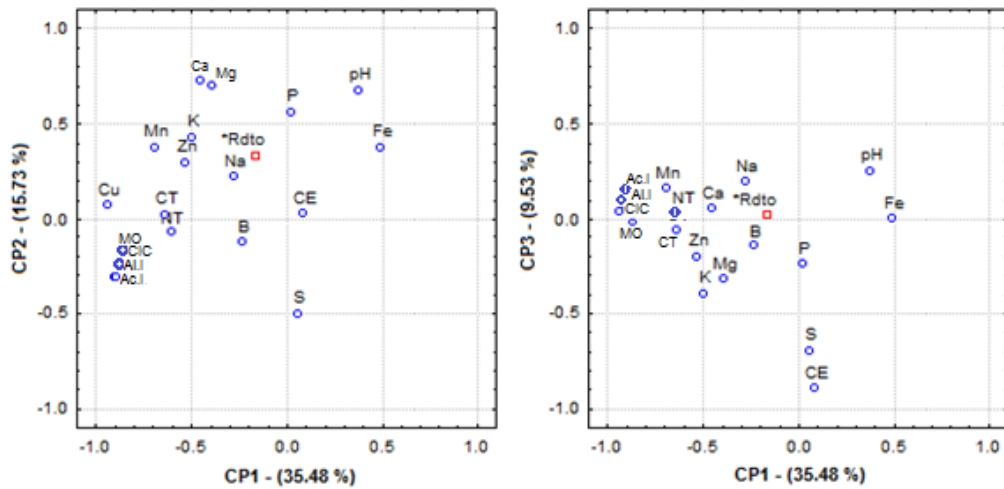


Figura 3-9: Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos químicos del suelo para la profundidad 10-20 cm



Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Tabla 3-15: Valores de los análisis de componentes principales para los atributos químicos en el suelo para la profundidad 0-10 cm

Atributos	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	Com.
pH	0.106	-0.921	0.043	0.158	0.025	0.077	0.893
MO	-0.860	0.072	0.136	-0.032	0.088	0.076	0.779
P	0.050	-0.172	-0.859	-0.033	-0.006	-0.305	0.865
S	0.200	0.490	-0.119	-0.124	-0.510	0.285	0.650
AC.I	-0.690	0.666	0.054	-0.041	0.149	-0.070	0.951
Al.I	-0.721	0.632	0.041	-0.009	0.186	-0.014	0.955
Ca	-0.551	-0.721	0.202	0.021	-0.147	0.035	0.887
Mg	-0.569	-0.751	0.139	-0.027	-0.146	0.072	0.934
K	-0.701	-0.343	0.125	-0.276	-0.345	0.054	0.823
Na	-0.059	0.002	0.447	0.184	-0.379	-0.558	0.692
CE	-0.232	0.218	-0.189	-0.587	-0.575	0.022	0.812
Fe	-0.025	-0.175	-0.363	-0.456	0.172	0.370	0.538
Cu	-0.415	0.020	-0.602	0.432	-0.207	0.075	0.771
Mn	-0.656	-0.265	-0.122	-0.303	0.357	0.109	0.747
Zn	-0.267	-0.153	-0.834	0.077	-0.007	-0.296	0.883
B	0.017	0.126	-0.108	0.586	-0.195	0.607	0.777
CIC	-0.835	0.086	-0.065	0.313	-0.158	-0.067	0.835
NT	-0.792	0.019	0.009	0.152	0.132	0.016	0.668
CT	-0.907	0.172	0.111	0.016	0.025	-0.008	0.866
Rdto.	-0.219	-0.529	-0.048	-0.025	-0.081	0.187	0.372
Valor prop.	5.786	3.392	2.321	1.457	1.243	1.127	
Total Var (%)	30.452	17.854	12.218	7.669	6.541	5.932	
Var. Acum.	30.452	48.305	60.523	68.192	74.733	80.665	

La Tabla 3-17 muestra los valores de los análisis de componentes principales para los atributos físicos en la profundidad 0-10 cm del lote muestreado. De igual manera que en los atributos químicos, el ACP presento valores similares en ambas profundidades, particularmente en el componente uno (CP1) y el componente dos (CP2).

Tabla 3-16: Valores de los análisis de componentes principales para los atributos químicos en el suelo para la profundidad 10-20 cm

Atributos	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Com.
pH	0.366	0.678	0.257	0.435	0.007	0.849
MO	-0.875	-0.202	-0.016	0.071	-0.042	0.813
P	0.018	0.565	-0.239	-0.282	0.591	0.805
S	0.055	-0.497	-0.691	0.249	-0.177	0.821
AC.I	-0.905	-0.309	0.093	-0.161	-0.068	0.953
Al.I	-0.901	-0.304	0.079	-0.159	-0.053	0.938
Ca	-0.454	0.735	0.058	0.259	-0.170	0.845
Mg	-0.392	0.706	-0.317	0.320	-0.236	0.912
K	-0.506	0.432	-0.391	-0.030	0.008	0.596
Na	-0.282	0.228	0.200	-0.069	-0.552	0.481
CE	0.082	0.036	-0.892	-0.100	-0.238	0.869
Fe	0.485	0.382	0.008	-0.511	-0.207	0.686
Cu	-0.944	0.077	0.044	-0.105	-0.031	0.912
Mn	-0.694	0.381	0.167	-0.369	-0.163	0.817
Zn	-0.535	0.303	-0.198	-0.451	0.337	0.733
B	-0.239	-0.122	-0.140	-0.137	0.146	0.132
CIC	-0.879	-0.214	0.096	0.006	-0.088	0.835
NT	-0.611	-0.072	0.028	0.392	0.262	0.602
CT	-0.640	0.029	-0.060	0.489	0.306	0.747
Rdto.	-0.170	0.335	0.024	0.131	-0.187	0.194
Valor prop.	6.742	2.988	1.811	1.595	1.210	1.127
Total Var (%)	35.482	15.726	9.530	8.396	6.369	5.932
Var. Acum	35.482	51.207	60.737	69.133	75.502	80.665

Para la primera profundidad, en el análisis de los componentes principales (ACP), se relacionaron los 3 primeros componentes debido a que presentaron valores propios superiores a 1 y representan más del 74.26 % de la varianza total. Para la segunda profundidad (Tabla 3-18), en el (ACP), se relacionaron los 4 primeros componentes que representan más del 79.26 % de la varianza total. El primer componente (CP1) representa el 43.5 y 45.54 % de la varianza total (Figura 3-8 y 3-9), donde los atributos que mejor representan a este componente, son L, Ar, PT y Mip con correlación negativa en la primera y positiva en la segunda profundidad; por otro lado los atributos A, Dr y Da muestran correlación positiva en la primera y negativa en la segunda profundidad

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

corroborado con el coeficiente Pearson (Tabla 3-13). El segundo componente (CP2) representa el 19.96 y 15.91 % de la varianza total respectivamente, con Map y Ks presentan correlación negativa en la primera y negativa en la segunda profundidad coincidiendo con lo visto en el análisis cluster (Figura 3-9);

Tabla 3-17: Valores de los análisis de componentes principales para los atributos físicos en el suelo para la profundidad 0-10 cm

Atributos	CP1	CP2	CP3	Com.
A	0.965	-0.144	0.030	0.953
L	-0.907	0.085	-0.047	0.831
AR	-0.887	0.195	-0.005	0.825
RP	0.181	0.157	0.419	0.233
Hum	-0.124	0.499	-0.449	0.466
Dr	0.722	-0.152	0.060	0.548
Da	0.707	0.630	0.066	0.784
PT	-0.897	-0.298	-0.074	0.929
Map	-0.136	-0.847	-0.279	0.898
Mip	-0.864	0.238	0.325	0.080
Mep	0.158	0.134	-0.842	1.542
Ks	0.127	-0.869	0.101	0.185
Rdto.	0.146	0.085	0.079	0.781
Valor prop.	5.220	2.395	1.297	
Total Var (%)	43.497	19.956	10.805	
Var. Acum	43.497	63.452	74.258	

En la primera profundidad, el tercer componente (CP3) representa el 10.81 % de la varianza total no presenta alta representatividad en los componentes principales. Por otro lado, en la segunda profundidad, el tercer componente (CP3) tiene un 12.27 % de la varianza total y lo representa los atributos Hum y Mep que muestran una alta correlación positiva y un coeficiente de Pearson de 0.39. En el cuarto componente (CP4) para la segunda profundidad, presenta 8.54 % de la varianza total con correlación positiva de los atributos RP y Dr.

En ambas profundidades, los atributos físicos de mayor representatividad en el CP1, fueron L, Ar, PT, Mip, A, Dr y Da. En el CP2, se encontró relaciones estrechamente ligadas entre Map y Ks ya sean con correlaciones positivas o inversas con respecto a otros atributos. Al igual que los atributos químicos en los físicos, el Rdto presento correlaciones bajas con estos, así como poca representatividad en los componentes principales (Figura 3-10 y 3-11).

Figura 3-10: Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm

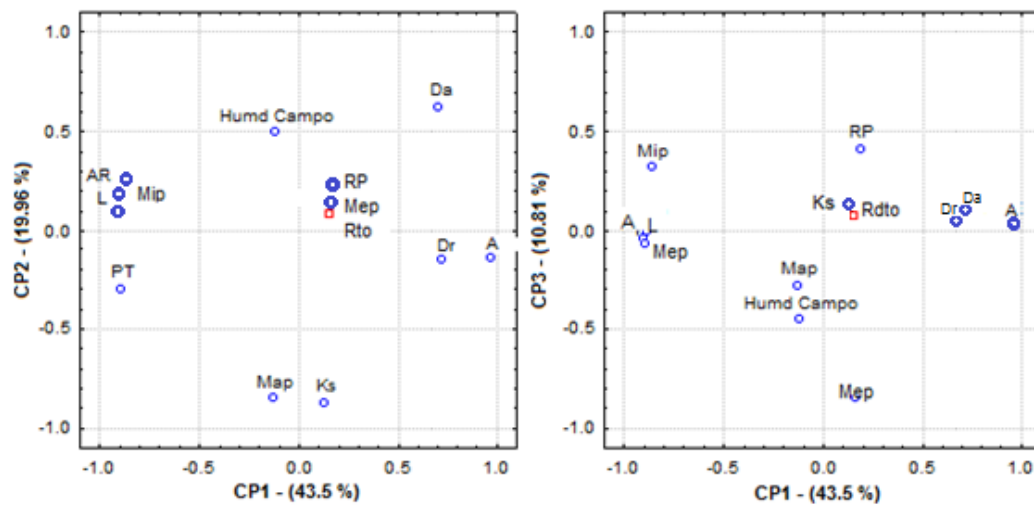
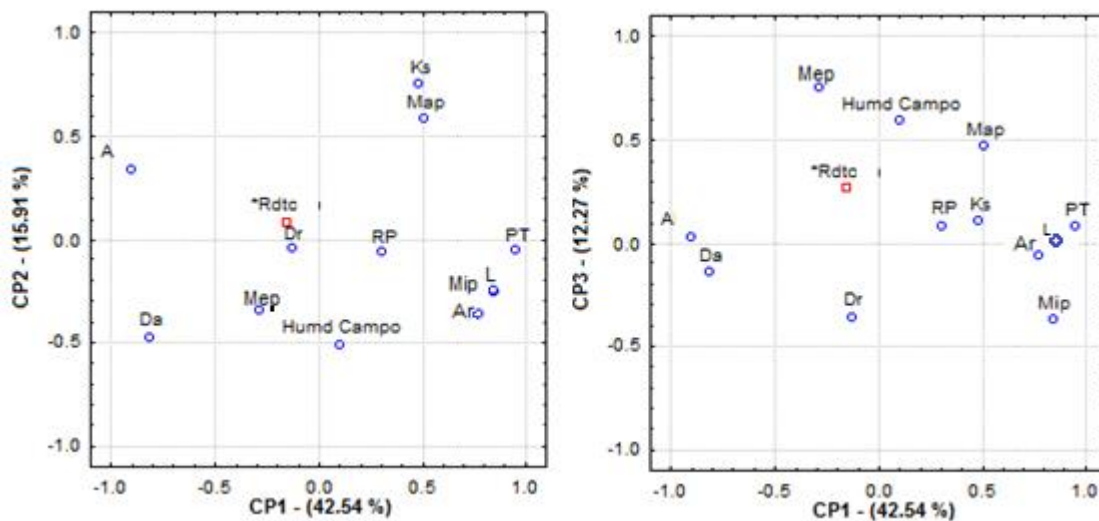


Figura 3-11: Análisis de componentes principales agrupamiento de atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm



Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Tabla 3-18: Valores de los análisis de componentes principales para los atributos físicos en el suelo para la profundidad 10-20 cm

Atributos	CP1	CP2	CP3	CP4	Com.
A	-0.909	0.348	0.039	0.015	0.949
L	0.844	-0.259	-0.010	-0.041	0.782
Ar	0.775	-0.363	-0.060	0.014	0.737
RP	0.302	-0.061	0.091	0.686	0.573
Hum	0.099	-0.509	0.597	0.097	1.397
Dr	-0.136	-0.047	-0.358	0.716	1.790
Da	-0.820	-0.471	-0.139	-0.023	0.158
PT	0.953	-0.055	0.086	-0.055	1.714
Map	0.498	0.589	0.474	0.083	0.932
Mip	0.841	-0.247	-0.370	-0.118	0.259
Mep	-0.289	-0.345	0.758	0.063	1.286
Ks	0.475	0.756	0.112	0.058	0.253
Rdto.	-0.155	0.089	0.271	-0.112	0.813
Valor Prop.	5.105	1.909	1.473	1.025	
Total Var (%)	42.538	15.908	12.273	8.544	
Var. Acum	42.538	58.446	70.719	79.263	

3.4 Determinación zonas de manejo

Para la determinación de zonas de manejo se utilizaron tres métodos: análisis clúster por asociación jerárquica (AJ), índice de suelo (SI) estimado mediante el análisis de los coeficientes de variación (SICV) y el índice de suelos mediante componentes principales (SICP).

3.4.1 Análisis clúster

Según al análisis clúster, en el lote de muestreo (Figura 3-12 (A)), para la primera profundidad se establecieron cuatro zonas donde la mayor área se encuentra en la zona 3 con 19,11 ha y la zona 2 con 8,82 ha La zona 1 posee los mayores valores de CV como es el caso de P, Zn, Cu y Mn con valores superiores al 60 % indicando una menor

uniformidad de dichos atributos químicos. Sin embargo, las medias se encuentran en proporciones iguales. La zona 1 y 4 tienen áreas de 2,45 y 6,37 ha respectivamente. La zona 2 muestra los menores valores CV lo que significa una mayor uniformidad en los atributos estudiados. En general las medias en todas las zonas son características de cada una (Tabla 3-19).

Tabla 3-19: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos químicos en la profundidad 0-10 cm del suelo

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha.)	2,45		8,82		19,11		6,37	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
pH	4.9	4.1	4.6	2.1	4.5	3.1	4.7	4.1
MO, %	3.0	17.0	3.7	14.6	3.1	18.5	1.6	23.7
P, mg kg ⁻¹	107.9	80.4	38.1	18.6	46.7	56.5	49.5	69.2
S, mg kg ⁻¹	7.6	28.0	6.4	25.6	9.4	44.5	7.1	28.2
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.6	30.9	1.3	17.1	1.3	27.1	0.6	34.3
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.5	53.2	1.2	18.0	1.1	30.8	0.4	51.1
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.2	45.6	0.9	18.2	0.7	25.8	0.5	33.9
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.4	41.5	0.3	16.0	0.2	27.7	0.2	37.9
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.4	38.3	0.4	16.8	0.3	26.2	0.2	34.3
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.1	42.4	0.1	31.8	0.1	51.3	0.1	32.2
C.E, dS m ⁻¹	0.2	19.1	0.1	13.9	0.1	26.9	0.1	22.1
Fe, mg kg ⁻¹	50.7	55.2	26.7	14.9	26.4	33.1	27.3	16.2
Cu, mg kg ⁻¹	1.1	62.3	0.7	17.0	0.8	89.0	0.3	30.4
Mn, mg kg ⁻¹	2.5	67.8	2.8	34.2	1.3	38.4	0.9	40.6
Zn, mg kg ⁻¹	7.9	103.4	3.6	17.6	3.2	60.8	2.2	26.7
B, mg kg ⁻¹	0.2	18.2	0.2	23.1	0.3	37.8	0.2	13.0
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	10.8	25.2	12.6	8.0	11.2	23.8	6.1	30.5
N, %	0.1	12.5	0.1	14.6	0.1	20.8	0.1	27.3
C, %	1.8	25.2	2.0	7.4	1.8	13.4	0.9	25.4

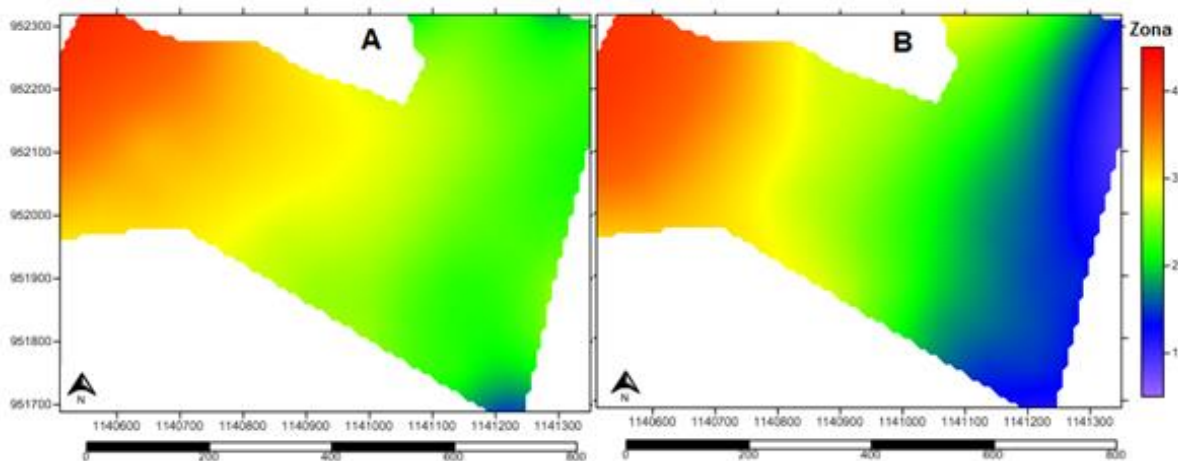
Al igual que en la primera profundidad, en la segunda profundidad (Figura 3-11 (B)) las mayores áreas están en las zonas 2 y 3 con 12,74 y 10,78 ha respectivamente. La zona

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

3 presenta los valores de CV más bajos mientras que los valores más altos se encuentran en la zona 4 que cuenta con 4,41 ha. (Tabla 3-20)

Para las dos profundidades se encuentran grandes similitudes por ejemplo, además de ser las áreas más pequeñas, la zona 1 presenta los valores más altos de MO, P, Ca, K, CIC, C, pH y bajo contenido de Al.I. La zona 4 presenta los valores más bajos de Al.I y pH de 4.7 y 4.59 respectivamente (Figura 3-12).

Figura 3-12: Mapa de interpolación lineal para las zonas de manejo definidas según análisis clúster para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.



En términos generales este suelo demostró tener niveles altos de acidez y contenidos relevantes de Al.I. Es necesario generar un plan de trabajo con técnicas y correctivos que lleven a estos parámetros a niveles adecuados para así mejorar las condiciones de fertilidad del suelo, encaminados al desarrollo y crecimiento óptimo de este tipo de cultivos. El uso de cal como enmienda cálcica podría ser apropiado para favorecer el comportamiento hidrológico del suelo, por un aumento en la porosidad que tendría efecto sobre la infiltración (Rienzi, 2003).

Tabla 3-20: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos químicos en la profundidad 10-20 cm del suelo

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha.)	6,86		12,74		10,78		6,37	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
pH	4.45	3.10	4.49	2.50	4.53	1.56	4.59	3.81
MO	3.06	9.56	2.73	11.56	2.19	17.68	1.26	26.01
P, mg kg ⁻¹	10.12	55.92	7.22	68.28	7.12	46.26	10.49	79.79
S, mg kg ⁻¹	20.26	32.44	23.89	33.82	29.73	19.12	18.91	86.79
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.82	15.89	1.55	15.37	1.12	16.09	0.72	25.49
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.56	17.74	1.32	17.58	0.90	22.89	0.55	31.55
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.56	21.72	0.46	28.24	0.39	13.63	0.41	23.45
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.18	24.17	0.15	26.60	0.13	12.37	0.14	33.07
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.15	23.09	0.12	20.77	0.12	18.51	0.10	26.39
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.11	93.43	0.06	25.43	0.05	23.47	0.06	20.44
C.E, dS m ⁻¹	0.12	15.58	0.11	15.75	0.11	17.56	0.14	77.87
Fe, mg kg ⁻¹	19.16	21.59	15.68	16.26	17.46	19.94	25.74	20.98
Cu, mg kg ⁻¹	0.64	7.58	0.49	16.73	0.31	18.38	0.24	20.41
Mn, mg kg ⁻¹	1.44	27.41	0.70	36.60	0.43	34.54	0.58	22.98
Zn, mg kg ⁻¹	1.54	34.20	0.96	37.21	0.74	36.94	0.78	25.58
B, mg kg ⁻¹	0.33	41.35	0.25	34.67	0.27	32.95	0.26	36.46
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	11.41	10.07	10.30	16.95	8.01	15.89	5.29	16.37
N, %	0.12	22.81	0.11	27.55	0.10	20.00	0.07	37.35
C, %	1.70	16.53	1.58	16.51	1.44	19.55	1.09	34.56

En estas regiones mejorar la agregación del suelo es una práctica recomendada, pero la acumulación de MO es muy difícil debido a las condiciones del medio; la agregación está condicionada porque dependen de puentes catiónicos, principalmente con Ca (Munier & Oades, 1989; Chenu, 1992). En los sectores como la zona 4 se recomienda el empleo de este tipo de técnicas que aumenten el contenido de MO tales como el empleo de compostaje y humus de lombriz, esto elevará los contenidos de los atributos que presentaron deficiencias. Además, se puede propiciar un mejoramiento biológico elevando la MO, mediante la promoción de raíces y la incorporación de residuos, incrementando la estabilidad de los agregados mediante la incorporación de materiales

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

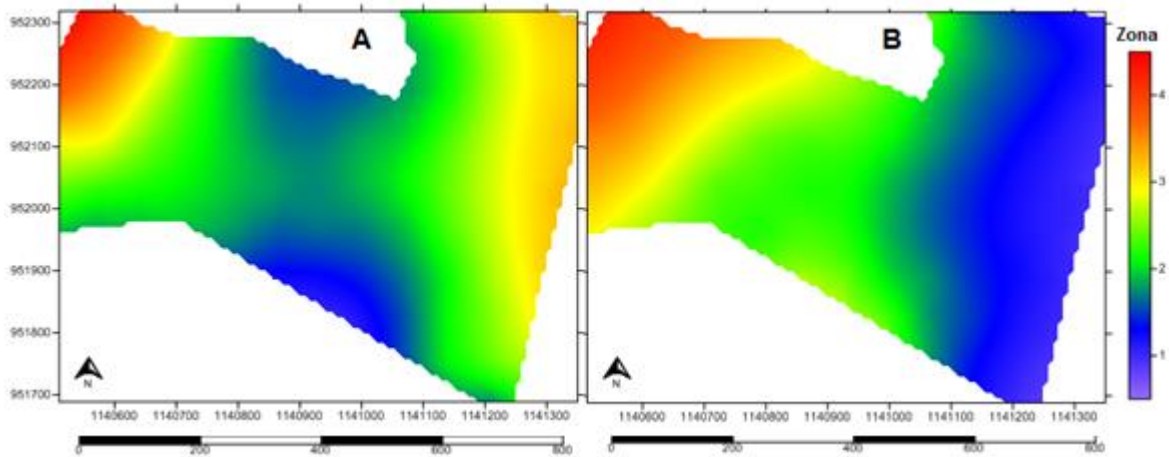
orgánicos lignificados y fragmentados (2-3 cm), también incrementando el reciclaje superficial de nutrientes a través del uso del mulch y propiciando el uso de plantas de raíces profundas para mejorar la condición estructural del suelo en profundidad (Amézquita, 2013). Estudios realizados en la Altillanura Colombiana (Corrales *et al.*, 2003), mostraron que los rendimientos en un cultivo de maíz bajo labranza cero se redujeron después del segundo año de evaluación con respecto a la labranza reducida (cincel rígido). Esto demuestra que el maíz es más sensible a los cambios físicos y químicos que se presentan en el suelo y lo manifiesta aumentando o disminuyendo el rendimiento.

La Tabla 3-21 muestra los resultados según el análisis clúster para los atributos físicos. En la primera profundidad se determinaron 4 zonas con 10,78, 8,33, 14,21 y 3,43 ha respectivamente. La zona 1 y 4 presenta los menores valores de CV, mientras la zona 3 los mayores. (Figura 3-13 (A)).

Tabla 3-21: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm

AREA ha.)	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
	10,78		8,33		14,21		34,3	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.38	23.32	1.33	14.08	1.22	19.09	1.34	17.66
Hum,% Vol	33.08	11.66	26.85	23.62	23.00	25.73	20.80	12.55
Dr, gr cm ⁻¹	2.53	1.69	2.61	3.46	2.55	2.81	2.71	1.57
Da, gr cm ⁻¹	1.47	6.09	1.69	5.69	1.32	9.82	1.70	5.38
PT, %	48.09	4.74	40.73	8.77	50.98	4.11	36.52	4.18
Map, %	8.64	28.05	6.09	23.16	12.17	30.02	11.18	31.15
Mip, %	30.56	8.54	26.91	13.52	31.49	13.09	16.60	15.98
Mep, %	8.89	12.13	7.72	15.21	7.32	18.23	8.74	14.61
K _s , cm dia ⁻¹	14.92	47.59	8.88	41.98	26.79	49.70	37.11	55.37
A, %	47.71	7.50	55.68	10.97	47.81	5.24	77.14	4.52
L, %	25.17	10.47	19.65	22.74	24.92	9.99	9.24	18.36
Ar, %	27.12	7.66	24.67	12.93	27.27	7.68	13.62	14.19

Figura 3-13: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según análisis clúster para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.



Para la segunda profundidad (Figura 3-13 (B)) se determinaron 4 zonas; la zona 1 con 16,66 ha siendo la mayor área del lote y la zona 2 con 3,92 presentan valores medios de CV; la zona 3 con 12,74 ha y la zona 4 con 3,43 ha donde se presentan los valores de CV más altos. (Tabla 3-22). En las profundidades estudiadas, la RP es alta entre (1.33 y 1.38 MPa) y (1.7 y 2.1 MPa) respectivamente, lo que evidencia una capa dura en la segunda profundidad sin embargo, es bajo con relación a valores de 2.7 MPa que es considerado como límite crítico para la penetración de raíces en cultivos comerciales (Corrales *et al.*, 2003). Se recomienda el uso de cincel rígido para romper esta capa dura para prevenir limitaciones en el desarrollo de las raíces. La zona 1 posee alta PT y Mep esto puede ser debido a altos contenidos de Ar. La zona 2 presenta una baja Da, alta PT y Ks moderada en la segunda profundidad de acuerdo a la calificación Konke; la zona 3 presenta Da baja y PT alta; la zona 4 contiene los valores más altos de Mep y bajos porcentajes de Mip aún en presencia de altos contenidos de A, Da y baja PT.

La K_s del suelo se comporta de forma aleatoria con valores de entre lenta y rápida no obstante, la zona 4 presenta una supuesta K_s moderada, el uso de cal busca disminuir la acidez y así mejoraría el comportamiento hidrológico del suelo, debido a un aumento en la porosidad que tendría efecto sobre la infiltración (Rienzi, 2003; cucunubá-Melo *et al.*, 2011). La rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas es una alternativa promisoría,

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

ya que las leguminosas proveen N adicional al sistema y mejoran la calidad del suelo mediante el aumento de residuos orgánicos, favoreciendo el almacenamiento de agua en el perfil y la capacidad de infiltración y reduciendo la escorrentía (Brady & Weil, 2002; Stanger & Laurer, 2008).

Tabla 3-22: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por análisis clúster para los atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha.)	16,66		3,92		12,74		3,43	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.924	12.534	2.106	10.439	2.008	10.539	1.705	40.212
Hum,% Vol	24.419	24.808	27.028	29.454	31.261	16.488	21.861	8.256
Dr, gr cm ⁻¹	2.702	14.320	2.643	2.344	2.591	16.002	2.686	2.859
Da, gr cm ⁻¹	1.486	7.620	1.218	5.160	1.630	7.917	1.742	4.524
PT, %	47.823	5.583	50.201	3.180	44.069	10.129	33.441	2.259
Map, %	7.389	23.373	13.005	11.679	7.308	30.112	6.788	23.704
Mip, %	33.642	8.510	30.108	5.191	27.634	9.781	18.708	10.468
Mep, %	6.793	15.044	7.088	12.786	9.127	13.834	7.945	17.196
K _s , cm dia ⁻¹	16.581	56.263	38.738	35.931	8.613	45.546	15.882	43.564
A, %	47.175	6.591	47.631	5.985	51.318	10.479	72.042	4.578
L, %	22.132	11.210	22.404	6.171	19.536	19.892	9.810	18.700
Ar, %	30.693	9.397	29.965	10.302	29.146	9.763	18.149	13.207

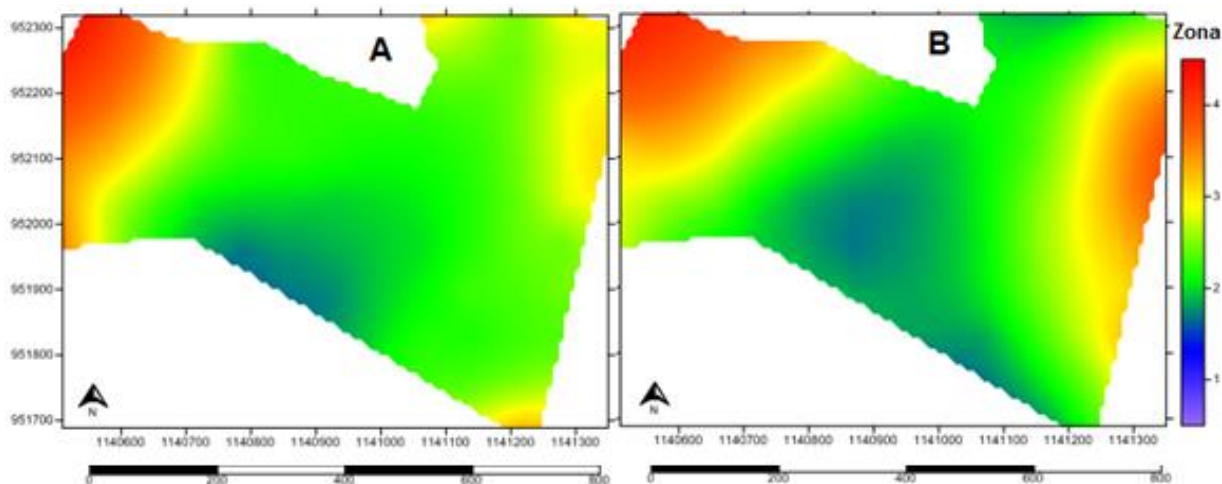
3.4.2 Índice de suelo según coeficiente de variación

Se determinaron 4 zonas para los atributos químicos en la primera profundidad; la zona 1 con 5,39 ha, zona 2 con la mayor área 17,15 ha, zonas 3 y 4 con 6,37 y 7,84 ha respectivamente, en esta última se observa los más altos valores de CV con más del 100% en Zn y Cu mientras que la zona 1 presenta los menores valores de CV (Tabla 3-23).

En la segunda profundidad, (Tabla 3-24) las zonas 1 y 2 con 5,39 y 16,17 ha respectivamente, presentan valores similares de medias para pH, Al.I, Ac.I, Ca, Mg, K, Na, CE, y NT pero diferente CV. La zona 3 y 4 con 7,35 ha muestran medias similares en Mg, Mn y Zn. De igual manera que en la primera profundidad la zona 4 presenta los valores más altos de CV mostrando una alta discrepancia en los atributos muestreados. Nuevamente la zona 1 presenta los valores más bajos de CV.

Para las profundidades estudiadas la zona 4 presenta altos valores de pH, P y bajo contenido de Al.I, MO, CIC y C caso opuesto para la zona 2 que presenta altos contenidos de MO, CIC y C pero bajo pH (Figura 3-14).

Figura 3-14: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según coeficiente de variación para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.



Sin importar la zona, el suelo presenta tener niveles altos de acidez y contenidos relevantes de Al.I. En estos cultivos es necesario el uso de cal dolomita que busca corregir las limitaciones de acidez y saturación de bases. Para alcanzar niveles críticos de Ca y Mg así como para lograr una buena distribución de ellos en el perfil, se utilizan fuentes más solubles (sulfatos) (Molina *et al.*, 2003).

En estas regiones mejorar la agregación del suelo es una práctica recomendada, pero la acumulación de MO es muy difícil debido a las condiciones del medio; la agregación está condicionada porque dependen de puentes catiónicos, principalmente con Ca

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

(Munner & Oades, 1989; Chenu, 1992). En los sectores como la zona 4 se recomienda el empleo de este tipo de técnicas que aumenten el contenido de MO tales como el empleo de compostaje y humus de lombriz, esto elevara los contenidos de los atributos que presentaron deficiencias.

Tabla 3-23: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos químicos del suelo en la profundidad 0-10 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	5,39		17,15		6,37		7,84	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
Ph	4.58	1.51	4.57	2.91	4.58	2.72	4.73	5.47
MO	3.08	19.75	3.34	19.93	2.85	30.44	2.22	43.30
P, mg kg ⁻¹	37.75	16.86	44.84	51.21	49.46	60.16	66.30	91.69
S, mg kg ⁻¹	7.54	24.55	8.75	30.46	6.83	22.18	8.37	73.39
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.18	13.73	1.30	24.64	1.13	40.80	0.75	67.41
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.00	16.67	1.09	27.23	0.92	50.06	0.56	87.73
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.75	15.58	0.69	29.90	0.76	26.97	0.72	61.90
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.25	13.42	0.23	28.86	0.26	32.00	0.24	63.10
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.30	20.10	0.30	26.45	0.33	25.82	0.26	50.06
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.08	24.37	0.08	22.37	0.09	86.30	0.06	33.71
C.E, dS m ⁻¹	0.14	12.79	0.15	26.91	0.14	17.89	0.13	25.92
Fe, mg kg ⁻¹	24.04	15.45	26.98	32.21	32.18	52.42	30.66	42.78
Cu, mg kg ⁻¹	0.51	23.09	0.67	41.11	0.67	45.69	0.91	117.72
Mn, mg kg ⁻¹	1.56	43.10	1.55	46.33	1.92	55.60	1.72	96.92
Zn, mg kg ⁻¹	2.57	21.55	3.25	38.97	3.78	61.96	4.18	122.95
B, mg kg ⁻¹	0.23	24.41	0.26	40.41	0.25	33.86	0.25	32.17
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	11.02	15.49	11.20	16.55	10.72	26.89	8.97	57.97
N, %	0.13	15.35	0.13	21.58	0.12	33.07	0.10	35.77
C, %	1.81	6.97	1.87	16.00	1.74	24.78	1.32	44.54

Tabla 3-24: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos químicos del suelo en la profundidad 10-20 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (m ²)	5,39		16,17		7,35		7,35	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
Ph	4.51	1.11	4.51	2.62	4.50	2.13	4.54	4.33
MO	2.64	16.10	2.47	20.24	2.43	23.06	1.96	54.05
P, mg kg ⁻¹	7.56	52.87	7.34	59.90	7.96	76.15	11.10	66.06
S, mg kg ⁻¹	27.35	30.13	26.18	30.18	22.77	28.63	18.65	79.85
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.32	9.32	1.34	19.62	1.50	30.40	1.17	62.39
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.11	7.24	1.11	22.44	1.27	35.39	0.96	71.69
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.42	18.25	0.45	30.56	0.49	25.91	0.45	22.76
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.14	19.87	0.15	29.73	0.15	27.01	0.15	27.24
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.13	17.39	0.12	24.34	0.13	18.48	0.13	34.06
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.07	81.99	0.06	35.14	0.08	117.98	0.06	34.23
C.E, dS m ⁻¹	0.11	11.46	0.11	17.08	0.12	18.59	0.13	70.67
Fe, mg kg ⁻¹	16.24	17.02	16.96	21.51	18.61	24.68	23.58	25.98
Cu, mg kg ⁻¹	0.38	21.86	0.42	30.04	0.47	38.99	0.41	51.19
Mn, mg kg ⁻¹	0.48	46.12	0.67	52.78	0.90	53.75	0.91	59.02
Zn, mg kg ⁻¹	0.85	30.73	0.96	53.15	1.04	48.21	1.02	37.63
B, mg kg ⁻¹	0.25	26.37	0.28	38.08	0.24	28.95	0.30	43.50
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	9.07	17.27	9.27	20.85	9.45	25.78	7.81	47.59
N, %	0.09	17.93	0.10	29.40	0.09	35.90	0.10	31.28
C, %	1.46	14.72	1.50	21.62	1.51	22.72	1.40	34.05

La Tabla 3-25 muestra los valores encontrados para la profundidad 0-10 cm. La zona 4 con 11,27 ha posee los valores más altos en CV. La zona 2 con 18,13 ha tiene la mayor área del lote. La zona 1 con 3,92 ha posee los menores valores de CV, y la zona 3 con 11,27 ha se ubica en los valores medios.

La profundidad 10-20 cm también se dividió en 4 zonas, la zona 1 con 539 ha, la zona 2 con 18,13 ha esta con la mayor área, la zona 3 con 11,76 ha y la zona 4 con 4,9 ha, la zona 1 y 4 presentaron valores menores y mayores de CV respectivamente; la zona 1 y 2 obtuvieron valores similares de medias para pH, Da, Dr, y A pero diferente CV.

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Con respecto a las profundidades estudiadas y de acuerdo a las zonas establecidas, la zona 4 presenta alta RP en la primera profundidad y bajo RP en la segunda profundidad, alto contenido de A, bajos valores de Da, Mip, PT y Mep, Ks moderada en la primera profundidad. Esto indica la presencia de una capa endurecida producida presuntamente por el tránsito de la maquinaria. La zona 2 presenta alto RP, Mip y Ks moderadamente lenta según la clasificación Konke. La zona 3 presenta Da baja, Ks moderadamente lenta y una alta Mep (Figura 3-15).

Se ha enfatizado y aceptado que los suelos Oxisoles, a pesar de ser muy ácidos e infértiles, poseen excelentes características físicas (Sánchez, 1976; Sánchez & Salinas, 1981). Estos suelos exigen un manejo adecuado, en cuanto a la RP, se necesita el rompimiento de la capa dura que se encuentra en la segunda profundidad por medio de la labranza vertical con cinceles rígidos, que logran un gran fraccionamiento del suelo hasta la profundidad deseada, de esta manera se mejora varias de sus propiedades: la infiltración, la capacidad de aireación, la distribución de los elementos nutritivos y la penetración de las raíces (Molina *et al.*, 2003). Este efecto puede ser logrado también por la incorporación al suelo de abonos verdes que permiten mantener, mejorar o restaurar los atributos físicos, químicos y biológicos del suelo (Costa, 2008).

Figura 3-15: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según coeficiente de variación para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.

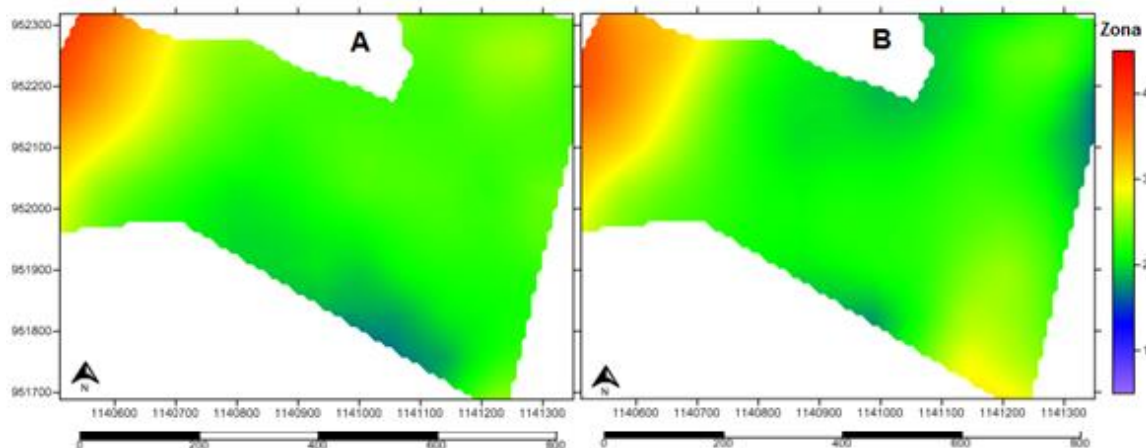


Tabla 3-25: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	3,92		18,13		11,27		11,27	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.31	13.86	1.33	19.03	1.24	23.73	1.36	18.45
Hum % Vol	27.22	15.15	26.47	23.22	28.85	26.97	19.43	31.42
Dr, gr cm ⁻¹	2.54	1.85	2.56	2.98	2.59	3.56	2.64	3.76
Da, gr cm ⁻¹	1.40	7.73	1.48	9.55	1.55	14.39	1.43	22.81
PT, %	47.95	4.36	47.93	9.69	44.68	14.51	42.81	17.98
Map, %	9.53	18.71	9.41	39.79	8.52	37.04	14.87	23.08
Mip, %	30.32	6.74	30.71	11.79	27.82	22.10	20.07	29.58
Mep, %	8.10	10.82	7.80	15.94	8.33	20.11	7.87	20.10
Ks, cm dia ⁻¹	16.11	28.04	16.82	49.46	17.92	78.19	50.35	23.45
A, %	48.01	6.04	49.31	6.84	54.24	20.08	66.66	24.43
L, %	25.25	10.04	23.98	10.32	20.97	33.07	14.81	56.47
Ar, %	26.74	6.67	26.71	9.16	24.79	19.30	18.53	43.37

Tabla 3-26: Medias y coeficientes de variación de zonas de manejo definidas por coeficiente de variación para atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	5,39		18,13		11,76		4,90	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.97	8.33	1.98	9.55	1.94	16.01	1.86	34.54
Hum % Vol	27.76	15.04	26.29	27.35	29.20	18.35	23.79	31.88
Dr, gr cm ⁻¹	2.58	8.55	2.66	18.43	2.69	4.36	2.67	2.68
Da, gr cm ⁻¹	1.52	6.29	1.53	9.25	1.56	13.69	1.50	19.32
PT, %	47.24	4.45	46.32	7.98	44.85	15.42	41.14	20.33
Map, %	7.78	15.45	7.25	30.20	8.70	33.21	9.13	40.65
Mip, %	32.04	9.27	31.38	11.28	27.88	20.61	24.68	28.31
Mep, %	7.42	21.05	7.70	19.24	8.28	21.06	7.34	18.04
Ks, cm dia ⁻¹	13.76	27.67	12.42	55.33	16.65	75.23	31.49	59.64
A, %	48.61	6.07	48.65	7.04	52.58	18.92	59.48	23.33
L, %	22.27	10.65	21.16	12.89	18.65	27.54	16.34	46.95
Ar, %	29.11	7.21	30.19	9.78	28.77	19.07	24.18	26.98

3.4.3 Índice de suelo por componentes principales

Según el índice de suelo por componentes principales, para la profundidad 0-10 cm (Tabla 3-27) la zona 4 con un área de 6,86 ha presenta los valores más altos de CV; las medias más bajas y los valores más bajos de CV se encuentran en la zona 1 con 3,92 ha; el área más extensa es la zona 2 con 18,62 ha seguido de la zona 3 con 7,35 ha.

La profundidad 10-20 cm se dividió en 4 zonas, la zona 1 con 4,9 ha, la zona 2 con 18,13 ha esta con la mayor área, la zona 3 m² con 5,88 ha y la zona 4 con 7,84 ha, la zona 1 y 4 con valores menores y mayores de CV respectivamente. La zona 1 y 2 presentan valores similares de medias para pH, Ca, Mg, Na, C.E y Cu pero diferente CV.

Para las profundidades estudiadas, la zona 2 presenta altos contenidos de C, Al.I, y CIC con un bajo pH y P. La zona 3 tiene altos contenidos de MO y Ca con bajo pH. La zona 4 coincide con el método de Coeficiente de Variación, donde se presenta altos valores de pH, P, Ca y bajos valores Al.I, MO, CIC y C. (Figura 3-16)

Las recomendaciones son semejantes en los métodos de coeficiente de variación y por componentes principales, debido a que presentaron similitudes en el comportamiento de los atributos con respecto a las zonas identificadas.

De esta manera sin importar la zona, el suelo presento niveles altos de acidez y contenidos relevantes de Al.I. En estos cultivos es necesario el uso de cal dolomita que busca corregir las limitaciones de acidez y saturación de bases. Para alcanzar niveles críticos de Ca y Mg así como para lograr una buena distribución de ellos en el perfil, se deben utilizar fuentes más solubles (sulfatos) (Molina *et al.*, 2003).

Estudios realizados en la Altillanura Colombiana (Corrales *et al.*, 2003), mostraron que los rendimientos en un cultivo de maíz bajo labranza cero se redujeron después del segundo año de evaluación con respecto a la labranza reducida (cincel rígido). Este método sería una alternativa para mejorar los rendimientos debido a que el maíz es más sensible a los cambios que se están presentando en el suelo.

Otra estrategia es el mejoramiento biológico mediante variedades o germoplasmas que se adapten a estos ecosistemas, tolerantes a la acidez, los altos contenidos de Al.I y con un valioso potencial de producción.

Figura 3-16: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según componentes principales para los atributos químicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm.

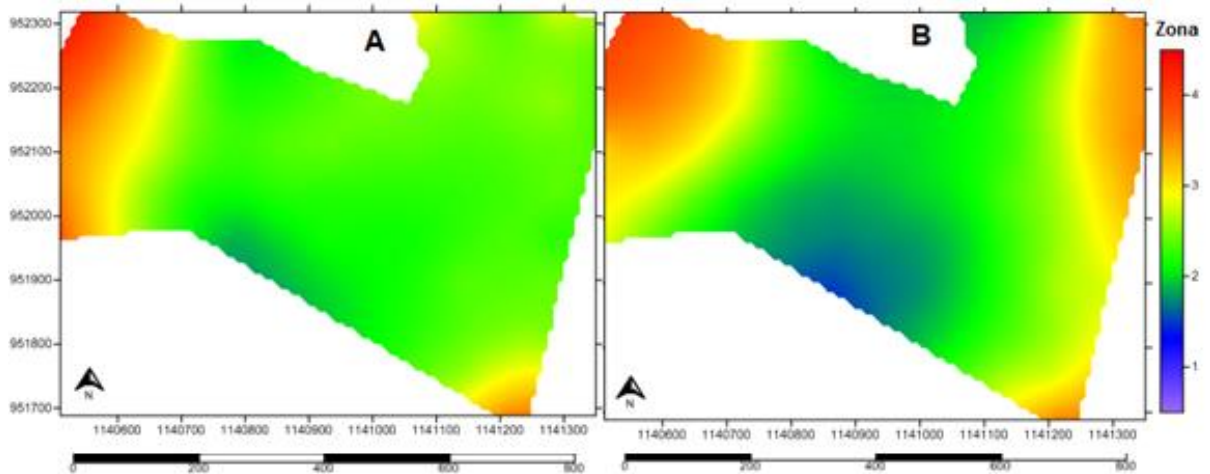
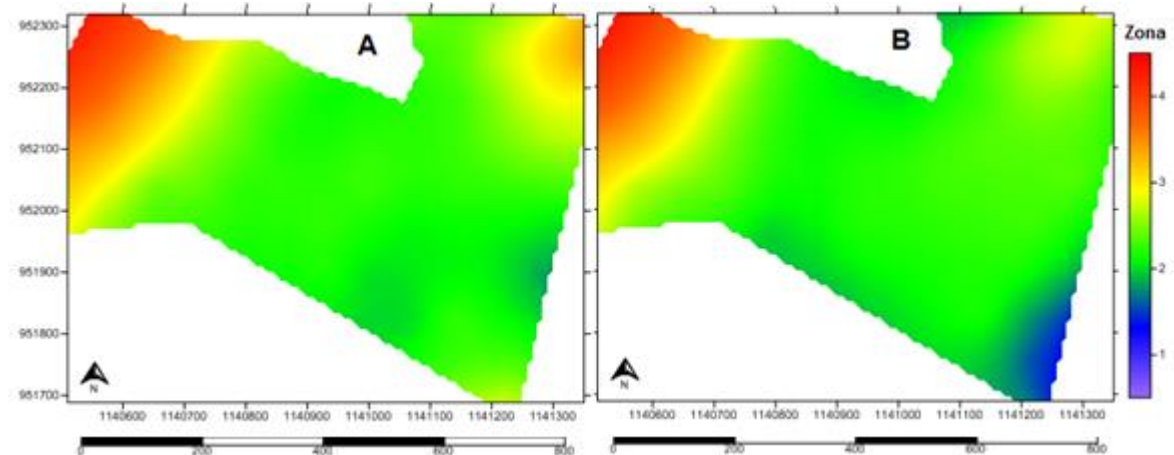


Figura 3-17: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas según componentes principales para los atributos físicos en dos profundidades. (A) 0-10 cm y (B) 10-20 cm



Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Tabla 3-27: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos químicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	3,92		18,62		7,35		6,86	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
Ph	4.57	1.27	4.58	2.70	4.57	3.27	4.74	5.65
MO	2.83	15.32	3.23	21.03	3.11	36.87	2.24	35.87
P, mg kg ⁻¹	38.00	19.39	39.41	35.55	57.73	60.18	72.92	87.59
S, mg kg ⁻¹	7.91	18.72	8.12	28.82	7.71	39.16	8.88	73.47
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.14	12.61	1.26	27.44	1.17	39.58	0.75	65.60
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.97	15.94	1.06	31.70	0.94	49.21	0.57	81.00
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.73	15.12	0.72	25.83	0.66	38.72	0.76	60.69
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.23	7.81	0.24	26.25	0.23	40.65	0.25	61.92
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.27	18.23	0.31	23.65	0.30	36.29	0.27	48.55
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.08	22.74	0.08	27.36	0.07	30.23	0.08	90.03
C.E, dS m ⁻¹	0.13	13.51	0.14	16.43	0.16	32.32	0.13	26.28
Fe, mg kg ⁻¹	23.09	14.55	27.14	31.33	28.19	16.39	34.21	59.79
Cu, mg kg ⁻¹	0.49	26.61	0.65	40.82	0.65	50.31	1.00	111.29
Mn, mg kg ⁻¹	1.33	38.37	1.70	51.53	1.85	73.47	1.49	85.21
Zn, mg kg ⁻¹	2.31	13.18	3.20	38.22	3.67	60.64	4.51	120.78
B, mg kg ⁻¹	0.25	22.29	0.26	38.12	0.25	37.83	0.25	35.00
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	10.32	11.24	11.26	15.12	10.07	38.45	9.63	53.69
N, %	0.13	18.15	0.13	23.80	0.12	37.26	0.11	28.45
C, %	1.80	7.88	1.84	18.11	1.67	31.75	1.43	39.41

Tabla 3-28: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos químicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	4,9		18,13		5,88		7,84	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
Ph	4.51	1.62	4.51	2.15	4.41	2.24	4.60	3.83
MO	2.55	15.91	2.48	19.75	2.52	30.31	1.94	50.55
P, mg kg ⁻¹	9.18	56.54	6.51	53.96	7.68	52.64	12.33	66.38
S, mg kg ⁻¹	27.30	26.61	25.18	30.23	24.06	35.95	19.46	78.33
Ac.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.31	10.44	1.38	24.16	1.48	33.66	1.13	56.87
Al.I, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	1.08	12.62	1.14	28.68	1.26	36.61	0.94	64.49
Ca, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.43	12.04	0.42	19.42	0.48	30.41	0.52	32.87
Mg, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.14	12.43	0.14	18.77	0.15	27.72	0.17	35.39
K, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.13	17.63	0.12	19.45	0.12	33.55	0.13	29.02
Na, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	0.06	26.06	0.06	54.89	0.07	44.78	0.08	114.22
C.E, dS m ⁻¹	0.11	14.27	0.11	14.21	0.12	23.41	0.14	70.03
Fe, mg kg ⁻¹	15.36	10.73	17.02	17.96	20.42	28.55	22.88	28.65
Cu, mg kg ⁻¹	0.42	15.71	0.41	31.48	0.47	43.22	0.41	50.21
Mn, mg kg ⁻¹	0.57	30.57	0.61	47.39	0.99	55.19	0.95	59.49
Zn, mg kg ⁻¹	1.04	33.58	0.83	37.10	1.13	36.60	1.15	59.81
B, mg kg ⁻¹	0.30	35.59	0.25	31.46	0.31	43.61	0.29	39.08
CIC, cmol ₍₊₎ kg ⁻¹	8.53	18.06	9.35	20.59	9.71	31.34	7.79	43.18
N, %	0.09	21.64	0.10	24.25	0.10	34.84	0.10	41.24
C, %	1.45	17.38	1.52	18.19	1.46	28.41	1.40	35.16

En los atributos físicos, para las dos profundidades, se encuentran los valores más altos de CV en la zona 4 (Tabla 3-29, 3-30), opuestamente la zona 1 presenta los menores valores de CV. Las zonas 1 y 2 presentan valores medios aproximadamente similares para Dr y Map aunque tienen diferente CV (Figura 3-17).

Se puede afirmar que los métodos de índice por coeficiente de variación y por componentes principales coinciden con los datos obtenidos en las profundidades estudiadas como sucede con la zona 4 donde se presenta un alto contenido de A, bajos valores de RP, Da, Mip, PT, Mep y Ks moderada. La zona 2 presenta alto RP, Mip y Ks

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

moderadamente lenta. Se recomienda el uso de cincel rígido para romper esta capa dura para prevenir limitaciones en el desarrollo de las raíces. La zona 3 presenta Da baja y Ks moderadamente lenta y una alta Mep. La zona 1 tiene alta PT y bajas RP y Da.

La K_s del suelo se comporta de forma aleatoria con valores de entre lenta y rápida no obstante, la zona 4 presenta una supuesta K_s moderada, el uso de cal como enmienda cálcica en las demás zonas para disminuir la acidez, de esta manera se mejoraría el comportamiento hidrológico del suelo, debido a un aumento en la porosidad que tendría efecto sobre la infiltración (Rienzi, 2003). Otra práctica recomendada es la utilización de abonos verdes, según el sistema radicular, permiten el rompimiento del suelo, mejorando la estructura y, por consiguiente, la capacidad de infiltración y la retención de humedad (Bunch, 2001).

Tabla 3-29: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales para los atributos físicos del suelo para la profundidad 0-10 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	4,41		16,66		9,8		5,88	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.27	14.59	1.33	21.81	1.27	19.62	1.29	18.56
Hum % Vol	26.88	22.46	26.55	28.64	29.94	15.78	21.12	25.10
Dr, gr cm ⁻¹	2.53	3.15	2.56	2.64	2.58	3.22	2.63	3.94
Da, gr cm ⁻¹	1.47	6.00	1.44	8.76	1.58	13.54	1.48	20.24
PT, %	47.29	6.73	48.72	5.79	44.69	15.96	42.37	17.42
Map, %	9.24	27.91	9.23	27.74	8.71	55.48	12.80	31.76
Mip, %	29.54	8.12	31.60	9.17	28.10	16.84	21.44	33.72
Mep, %	8.52	7.52	7.90	15.63	7.88	21.35	8.13	20.79
Ks, cm dia ⁻¹	14.85	42.95	18.65	53.99	14.07	68.70	38.90	49.60
A, %	48.70	7.41	47.98	6.36	53.24	13.93	65.68	22.04
L, %	24.01	10.83	24.91	10.01	21.45	25.20	15.28	51.21
Ar, %	27.29	6.81	27.11	8.42	25.31	12.48	19.04	36.78

Tabla 3-30: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por componentes principales de los atributos físicos del suelo para la profundidad 10-20 cm.

	ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
AREA (ha)	4,9		16,66		10,29		4,9	
ATRIBUTO	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
RP, MPa	1.91	8.34	1.98	13.28	1.98	9.72	1.84	33.86
Hum % Vol	26.24	24.66	27.38	26.18	27.87	19.68	23.38	28.18
Dr, gr cm ⁻¹	2.66	1.76	2.64	6.74	2.57	16.19	2.89	23.87
Da, gr cm ⁻¹	1.51	5.95	1.54	8.53	1.55	12.69	1.48	20.92
PT, %	46.24	2.05	45.97	7.77	45.79	15.60	42.04	19.46
Map, %	7.58	18.22	7.17	28.48	8.33	29.85	9.82	41.26
Mip, %	30.92	6.39	30.98	10.90	29.44	24.18	25.34	22.50
Mep, %	7.74	10.18	7.82	18.70	8.02	25.42	6.88	12.69
Ks, cm dia ⁻¹	12.37	32.37	13.99	70.23	15.00	56.04	29.43	68.24
A, %	47.36	5.53	48.62	9.47	53.41	16.56	57.52	23.59
L, %	23.41	13.41	20.89	14.51	18.72	25.63	17.11	40.58
Ar, %	29.23	8.19	30.49	9.25	27.87	18.13	25.38	27.83

3.4.4 Zona de manejo por rendimiento

La zona de manejo por rendimiento se realizó con el método de índice de Suelo por Coeficiente de Variación, en donde se establecieron 4 zonas de manejo.

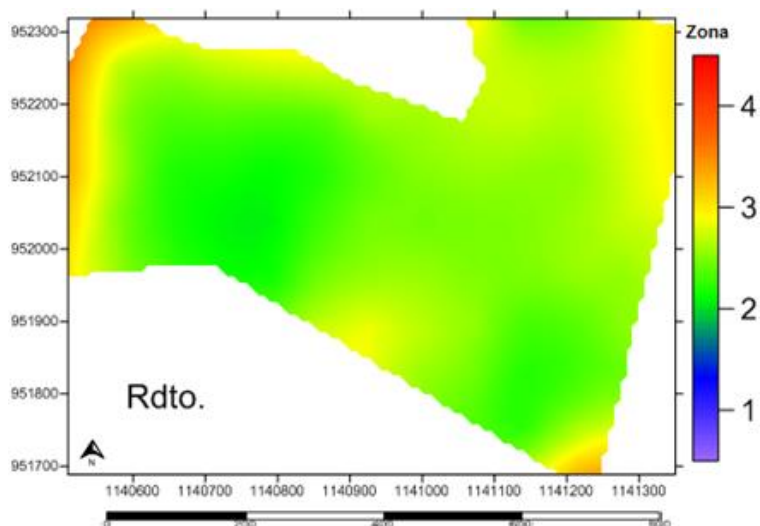
Como se puede observar en la Tabla 3-31, las zonas 1 y 4 con 68.600 m² y 58.800 m² respectivamente poseen los valores más altos de CV, esta última tiene el Rdto más alto del cultivo (7.51 ton ha⁻¹) y la zona 1 con 98.000 m² tiene el más bajo.

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de
maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

Tabla 3-31: Medias y coeficientes de variación de las zonas de manejo definidas por rendimiento del lote muestreado

		ZONA 1		ZONA 2		ZONA 3		ZONA 4	
Área (ha)		6,86		9,8		14,21		5,88	
ATRIBUTO		MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV	MEDIA	CV
Rdto.,	ton ha ⁻¹	4.96	6.31	5.79	4.73	6.67	3.78	7.51	4.95

Figura 3-18: Mapa de interpolación lineal para zonas de manejo definidas por rendimiento.



De acuerdo a los análisis obtenidos en las dos profundidades y con los diferentes métodos utilizados, la zona 4 presenta los valores más altos de P, Mep, pH, A y Mip; bajos valores de RP, Al.I, Da y Ks moderada; las zonas 1, 2 y 3 presentan altos valores de P, Ca, MO, CIC, PT y Mep; a pesar del alto CV y valores intermedios de MO, Ca, K, CIC, C y PT la zona 4 es la zona con mayor rendimiento del cultivo (Figura 3-18) aunque en esto también influye una mayor densidad de siembra (Anexo C); la zona 1 presenta los valores más bajos de CV, seguida de la 2 y 3 que poseen valores altos de RP, Al.I, Mip y Da, bajos valores de Ks, pH y A; de acuerdo a lo anterior las mejores condiciones están presentes en la zona 4 y las demás deberán ser intervenidas a la brevedad posible.

Las zonas 1, 2 y 3 se deben intervenir a priori debido a que mostraron altos niveles de acidez y contenidos relevantes de Al.I. Por esta razón es necesario generar un plan de trabajo con técnicas y correctivos que lleven a estos parámetros a niveles adecuados para así mejorar las condiciones de fertilidad del suelo, encaminados al desarrollo y crecimiento óptimo de este tipo de cultivos. El uso de cal como enmienda cálcica podría ser apropiado para favorecer el comportamiento hidrológico del suelo, por un aumento en la porosidad que tendría efecto sobre la infiltración (Rienzi, 2003). También busca corregir las limitaciones de acidez y saturación de bases. Para alcanzar niveles críticos de Ca y Mg así como para lograr una buena distribución de ellos en el perfil, se deben utilizar fuentes más solubles (sulfatos) (Molina *et al.*, 2003). La rotación de cultivos y leguminosas es otra alternativa ya que reduce la densidad aparente y la susceptibilidad a la compactación y aumenta los contenidos de N, K, Ca y Mg en el suelo, proporcionando un ambiente favorable para el crecimiento y desarrollo de las raíces de las plantas (Sanchez & Salinas, 1981).

Otra estrategia es el mejoramiento biológico mediante variedades o germoplasmas que se adapten a estos ecosistemas, tolerantes a la acidez, los altos contenidos de Al.I y con un valioso potencial de producción.

En las profundidades estudiadas, la RP es alta entre (1.22 y 1.38 MPa) y (1.7 y 2.1 MPa) respectivamente, lo que evidencia una capa dura en la segunda profundidad sin embargo, es bajo con relación a valores de 2.7 MPa que es considerado como límite crítico para la penetración de raíces en cultivos comerciales (Corrales, 2003). Se recomienda el uso de cincel rígido para romper esta capa dura para prevenir limitaciones en el desarrollo de las raíces. Esta práctica busca lograr un gran fraccionamiento del suelo hasta la profundidad deseada, de esta manera se mejora varias de sus propiedades: la infiltración, la capacidad de aireación, la distribución de los elementos nutritivos y la penetración de las raíces (Molina *et al.*, 2003).

En estas regiones mejorar la agregación del suelo es una práctica recomendada, pero la acumulación de MO es muy difícil debidas a las condiciones del medio; la agregación está condicionada porque dependen de puentes catiónicos, principalmente con Ca (Munner & Oades, 1989; Chenu, 1992). En los sectores como la zona 4 se recomienda el

empleo de este tipo de técnicas que aumenten el contenido de MO tales como el empleo de compostaje y humus de lombriz, esto elevará los contenidos de los atributos que presentaron deficiencias. La K_s del suelo se comporta de forma aleatoria con valores de entre lenta y rápida no obstante, en esta zona se presenta una supuesta K_s moderada, el uso de yeso como enmienda cálcica mejoraría el comportamiento hidrológico del suelo, debido a un aumento en la porosidad que tendría efecto sobre la infiltración (Rienzi, 2003).

Otra técnica es la utilización de equipos de tasa variable (VR) que permitan mediante la agricultura de precisión la identificación de la variabilidad espacial del suelo y el rendimiento para la formulación de planes de aplicación de este tipo (VR). Estudios muestran que la fertilización (VR) aumenta el rendimiento en comparación con el tipo uniforme (UR) (Lowenberg-DeBoer & Aghib, 1999; Wittery & Mallarino, 2004; Yang *et al.*, 1999, 2001). La aplicación de (VR) tiene el potencial de reducir los costos, en las zonas donde la fertilización (UR) se aplique en exceso y así aumentar el rendimiento (Bullock *et al.*, 1994; Chan *et al.*, 1994; McGraw, 1994; Sawyer, 1994; Franzen & Peck, 1995; Long *et al.*, 1996; Anderson-Cook *et al.*, 1999; Rehm & Lamb, 2000). Las aplicaciones de (VR) a través del campo se pueden basar en un mapa (Morgan & Ess, 1997). El mapa base incluye el muestreo, los análisis de laboratorio para ser utilizados como referencia para la aplicación de fertilización del tipo (VR).

Luego de aplicar las recomendaciones dadas es aconsejable realizar un nuevo estudio sobre el terreno y contrastar los resultados con el presente para realizar nuevos planes de tratamiento y corrección del suelo. Vale aclarar que el trabajo debe ser constante dado que cambiar las condiciones de un suelo toma mucho tiempo.

4. Conclusiones

4.1 Conclusiones

Los atributos físicos y químicos del suelo, analizados mediante estadística descriptiva y geoestadística presentan una alta variabilidad en diferentes sectores del lote muestreado como es el caso de la textura y estructura del suelo factores, altamente influyentes en la distribución y comportamiento de dichos atributos.

El uso de técnicas multivariadas se convierte en una herramienta importante para el estudio y evaluación de los factores que afectan la productividad de un terreno. Estas técnicas permiten el estudio y análisis de la relación entre los mencionados factores y a su vez el diseño de estrategias para la toma de decisiones que contrarresten aquellos aspectos negativos en el rendimiento del suelo.

Los análisis geoestadísticos de los atributos del suelo muestran una dependencia espacial en la mayoría de las variables, exceptuando el contenido de P en la segunda profundidad estudiada, pese a que es un lote preparado donde se pueden presentar valores aleatorios en virtud de las técnicas de siembra empleadas como labranza mínima y siembra por ciclos.

A través de la interpolación de mapas por el método de Kriging, se pueden ver de forma clara las grandes diferencias entre un sector y otro del terreno. Con esto se facilita la elaboración de un plan de trabajo que permita la homogenización del terreno en pro de un aumento en el rendimiento del cultivo para aquellas zonas que presentan limitaciones.

Empleando tres métodos diferentes se determinó que la zona 4 en comparación con las demás, tiene un mejor rendimiento de cultivo, pero esto no garantiza que sea la más apta puesto que se debe tener en cuenta que las plantas pueden tener mejor productividad si

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

se llevase a niveles óptimos el cultivo; lo que si representa es la inmediatez necesaria en la intervención de las demás zonas dado que, por ejemplo la zona 2, la más extensa, presenta mayores irregularidades en los valores de RP, pH, Al.I y Mip.

A. Anexo: Perfil descrito, morfología y nomenclatura de los horizontes.

PERFIL VERSALLES

Tipo de perfil:	Modal
Taxonomía del suelo:	Typic Hapludox, Familia Fina, Caolinitica, Isohipertérmica, Fase por Tipo FArL.
Unidad cartográfica:	Consociación Símbolo: AvCa
Localización:	Departamento: Meta Municipio: Puerto López Sitio: Finca Versalles – Carlos 1
Coordenadas:	Latitud: 4° 09' 49.36" N Longitud: 71° 48' 33.83" W Altitud: 232 msnm
Geomorfología:	Paisaje: Altiplanicie Tipo de relieve: Ondulaciones Forma del terreno: Ladera
Relieve:	Plano, no disectado.
Pendiente:	Grado: 3-5%, Longitud: Muy larga, Forma: Rectilínea,
Material parental:	Sedimentos terciarios
Formación ecológica:	Bosque húmedo tropical (Bh-T)
Clima ambiental:	Cálido y húmedo – Tropical Lluvioso de Sabana Awf Precipitación promedio anual: 2.700 mm Temperatura promedio anual: > 27°C Distribución de lluvias: Monomodal
Clima edáfico:	Régimen de temperatura: Isohipertérmico Régimen de humedad: Údico
Tipo de erosión:	Hídrica, Tipo: Laminar, Grado: Difusa ligera
Pedregosidad superficial:	No se observa
Drenaje:	Interno: Lento Externo: Rápido Natural: Bien drenado
Nivel freático:	No se encontró
Profundidad efectiva:	Muy profunda
Horizontes diagnósticos:	Epipedón: Ocrico Endopedón: Óxico
Uso actual:	Cultivo de maíz
Limitantes de uso:	Alta saturación de aluminio
Describió:	Dra. Yolanda Rubiano Sanabria
Fecha de descripción:	21/09/2012

Descripción morfoгенética de los horizontes

Según la tabla Munsell, se tiene un color de 5YR 3/3 (pardo rojizo oscuro). La estructura corresponde a bloques subangulares y granulos, finos y medios

0-41 cm con un grado de expresión fuerte, de textura Arcillo-limosa (ArL). La consistencia en húmedo es firme; muy pegajosa y muy plástica en mojado. **Ap** En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos ($> 10 \text{ dm}^{-2}$) de tamaño fino a grueso (<0.5 a $>5\text{mm}$), de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre los agregados. Presento reacción ligera al H_2O_2 y el pH por el método del colorímetro es de 4.3. El límite entre el horizonte Ap y el horizonte Bo_1 es difuso y de topografía ondulada. Las raíces son muchas ($>10 \text{ dm}^{-2}$), finas a gruesas (<0.1 a $> 5 \text{ mm}$) se encuentran vivas entre los agregados, sobre la capa endurecida con una distribución anormal y la actividad de los microorganismos es mucha.

Según la tabla Munsell, se tiene un color de 2.5YR 4/8. La consistencia en húmedo es friable; muy pegajosa y muy plástica en mojado; la estructura corresponde a bloques subangulares medios y gruesos de expresión fuerte, de **41-68 cm** textura arcillosa (Ar). En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos, de tamaño fino a grueso, de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre los agregados. **Bo1** No presento reacción positiva al H_2O_2 y el pH es de 4.3. Las raíces son pocas, finas y se encuentran vivas entre los agregados, con una distribución normal y la actividad de los microorganismos es mucha.

Según la tabla Munsell, se tiene un color rojo sucio 10R 4/8. La consistencia en húmedo es friable; muy pegajosa y muy plástica en mojado. La estructura corresponde a bloques subangulares medios y gruesos de expresión fuerte, de textura arcillosa (Ar). En cuanto a la porosidad, la cantidad son muchos, de tamaño fino y medios, de formas vesiculares y tubulares y están localizados dentro y entre agregados. **68-130x cm** No presento reacción positiva al H_2O_2 y el pH es de 4.3. No hay raíces y la actividad de los microorganismos es poca. **Bo2**

Análisis químico:

Horizonte Ap, de espesor de 41 cm, textura FAr, pH de 4.16, saturación de Al.I de 71.8 %, contenidos de MO de 2.93 %, P de 9.8 mg kg^{-1} , S 36.7 mg kg^{-1} , Ca de $0.34 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, Mg de $0.16 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, K de $0.17 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, Na de $0.04 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, CE de 0.09 dS m^{-1} , CICE de 2.95; y

elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.4, Fe de 9.2, Mn de 1.0 y Zn de 0.3 mg kg⁻¹.

Horizonte Bo₁, de espesor de 27 cm, textura FAr, pH de 4.44, saturación de Al.I de 65.2 %, contenidos de MO de 1.82 %, P de 1.5 mg kg⁻¹, S 7.5 mg kg⁻¹, Ca de 0.32 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg de 0.10 cmol₍₊₎ kg⁻¹, K de 0.08 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Na de 0.04 cmol₍₊₎ kg⁻¹, CE de 0.17 dS m⁻¹, CICE de 1.89; y elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.3, Fe de 9.7, Mn de 1.0 y Zn de 0.1 mg kg⁻¹.

Horizonte B_{O2} de espesor > 130 cm, textura FAr, pH de 4.5, saturación de Al.I de 55.2 %, contenidos de MO de 0.47 %, P de 1.5 mg kg⁻¹, S 3.8 mg kg⁻¹, Ca de 0.39 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Mg de 0.15 cmol₍₊₎ kg⁻¹, K de 0.04 cmol₍₊₎ kg⁻¹, Na de 0.05 cmol₍₊₎ kg⁻¹, CE de 0.05 dS m⁻¹, CICE de 2.04; y elementos menores, B de 0.16, Cu de 0.2, Fe de 5.9, Mn de 0.7 y Zn de 0.1 mg kg⁻¹.

Análisis físicos:

Horizonte Ap, de espesor de 41 cm, con clasificación cero en conductividad hidráulica de 0 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 43.48, Da de 1.31 de g cm⁻³, Dr de 2.66 g cm⁻³ y porosidad total de 51 %.

Horizonte Bo₁, de espesor de 27 cm, con clasificación lenta en conductividad hidráulica de 0.36 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 47.95, Da de 1.26 de g cm⁻³, Dr de 2.69 g cm⁻³ y porosidad total de 53 %.

Horizonte B_{O2} de espesor > 130 cm, con clasificación cero en conductividad hidráulica de 0.0 cm h⁻¹ y porcentaje de saturación de 38.69, Da de 1.41 de g cm⁻³, Dr de 2.68 g cm⁻³ y porosidad total de 47 %. De acuerdo a las características morfológicas descritas anteriormente, este suelo es identificado a nivel categorico de subgrupo como Typic Hapludox, familia fina, isohipertermica.

B. Anexo: Interpretación de algunas propiedades físicas y químicas del suelo

Densidad aparente, g cm⁻¹		Porosidad total, %	
Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
< 1.0	Muy baja	< 30	Muy baja
1.0 - 1.4	Baja	30 - 40	Baja
1.4 - 1.75	Media	40 - 55	Media
> 1.75	Alta	> 55	Alta

Infiltración básica, cm h⁻¹		Conductividad hidráulica saturada, m día⁻¹	
Valor	Interpretación	Valor	Interpretación
< 0.1	Muy lenta	< 0.03	Muy lenta
0.1 - 0.5	Lenta	0.03 - 0.12	Lenta
0.5 - 2.0	Moderadamente lenta	0.12 - 0.38	Moderadamente lenta
2.0 - 6.3	Moderada	0.38 - 1.20	Moderada
6.3 - 12.7	Moderadamente rápida	1.20 - 2.90	Moderadamente rápida
12.7 - 25.4	Rápida	2.90 - 4.30	Rápida
> 25.4	Muy rápida	> 4.3	Muy rápida

pH (H₂O) 1:1		Saturación Al.I, %	
Valor	Reacción	Valor	Apreciación
< 4.5	Extremadamente ácido	< 15	Limitante para cultivos susceptibles
4.6 - 5.0	Muy fuertemente ácido	15 - 30	Limitante para cultivos moderadamente tolerantes
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido	30 - 60	Limitante para cultivos tolerantes
5.6 - 6.0	Medianamente ácido	> 60	Niveles tóxicos para la mayoría de cultivos
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido		
6.6 - 7.3	Neutro		
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino		
7.9 - 8.4	Medianamente alcalino		
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino		
> 9.0	Extremadamente alcalino		

Caracterización de los suelos

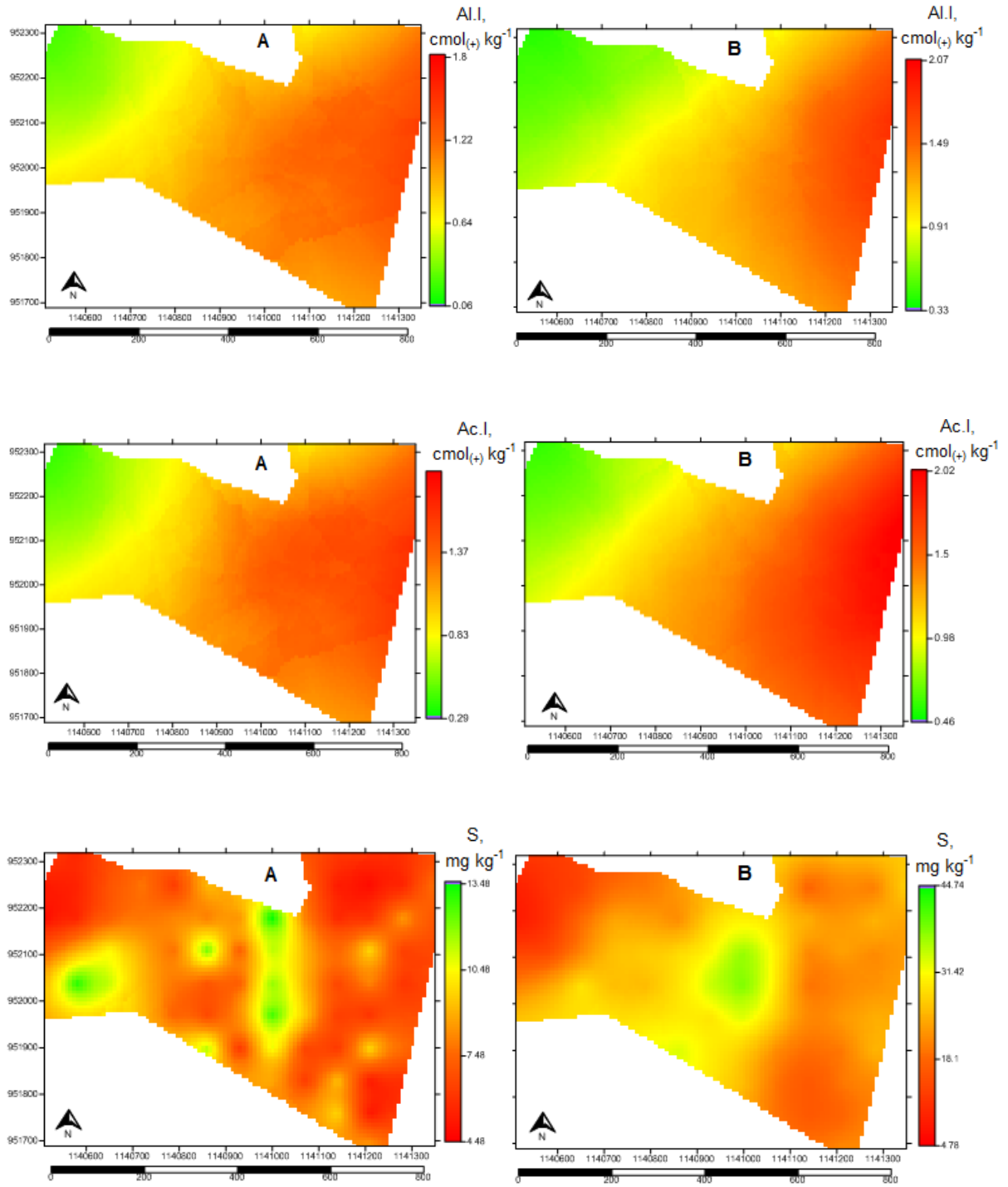
Propiedad	Clima	Apreciación		
		Bajo	Medio	Alto
P, g kg ⁻¹		<15	15 - 40	>40
K, meq/100 g		<0.2	0.2 - 0.4	>0.4
Materia orgánica, %	Frío	<5	5 - 10	>10
	Medio	<3	3 - 5	>5
	Cálido	<2	2 - 4	>4
Nitrógeno total, %	Frío	<0.25	0.26 - 0.5	>0.5
	Medio	<0.15	0.16 - 0.3	>0.3
	Cálido	<0.1	0.1 - 0.2	>0.2
CIC, meq/100 g		<10	10 - 20	>20
Saturación de bases, %		<35	35 - 50	>50

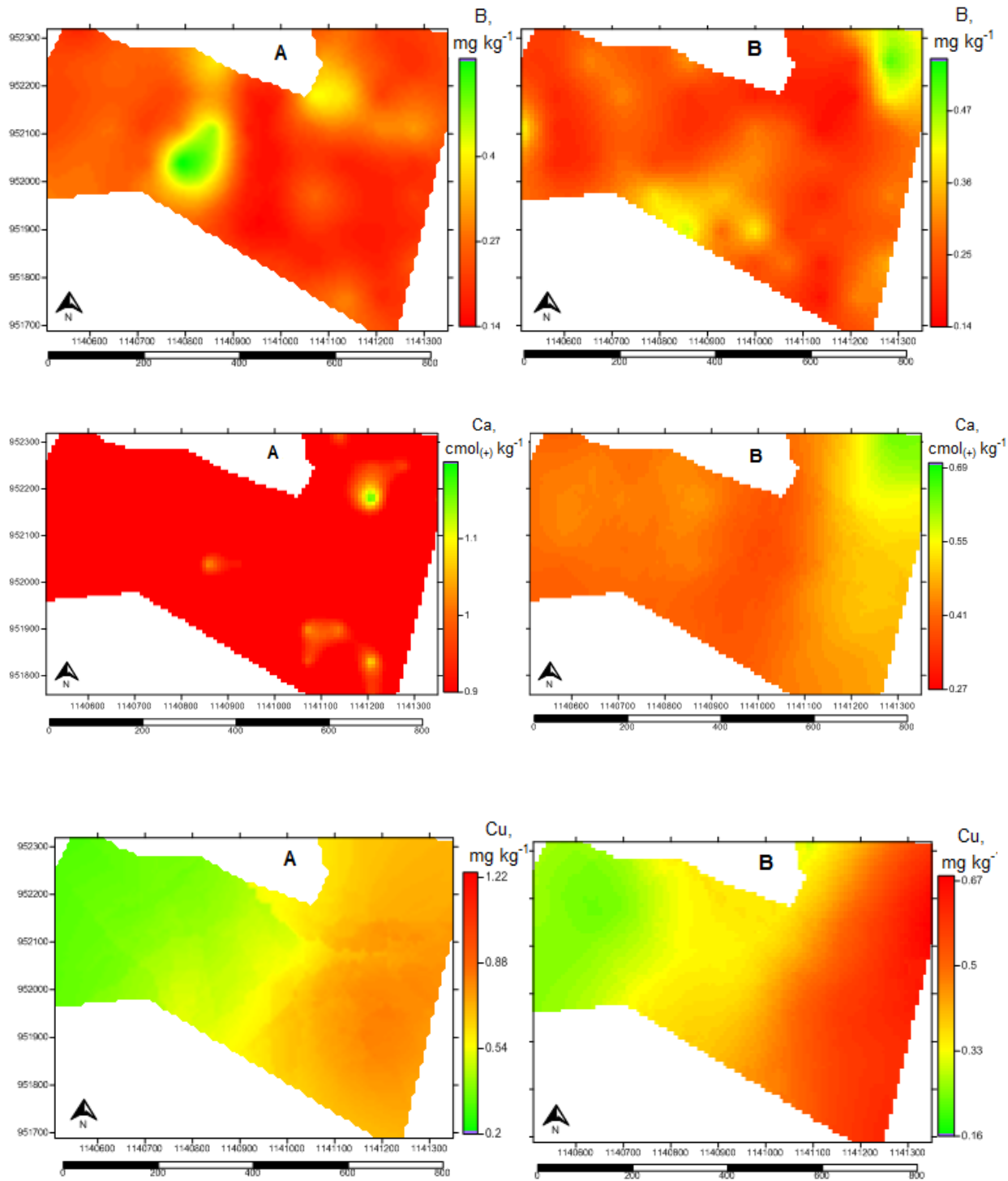
Rango óptimo elementos menores, mg kg⁻¹

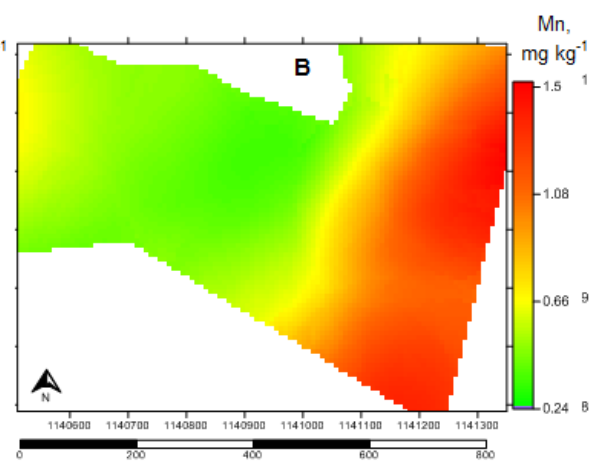
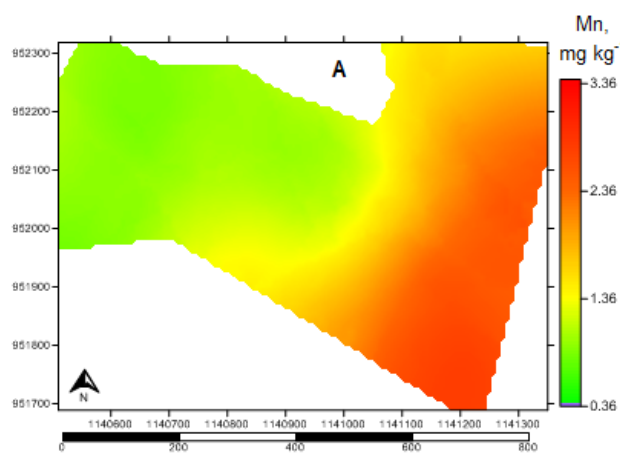
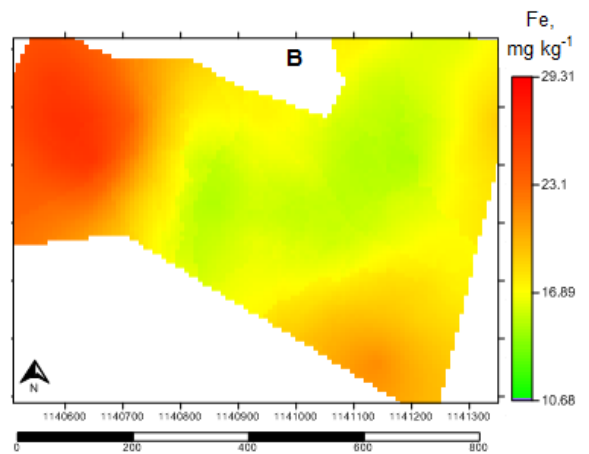
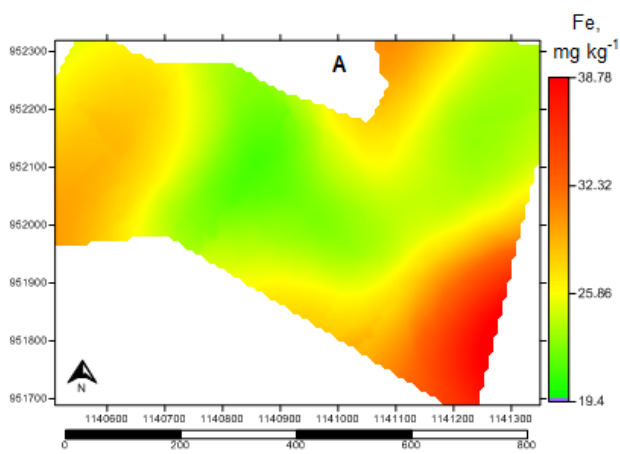
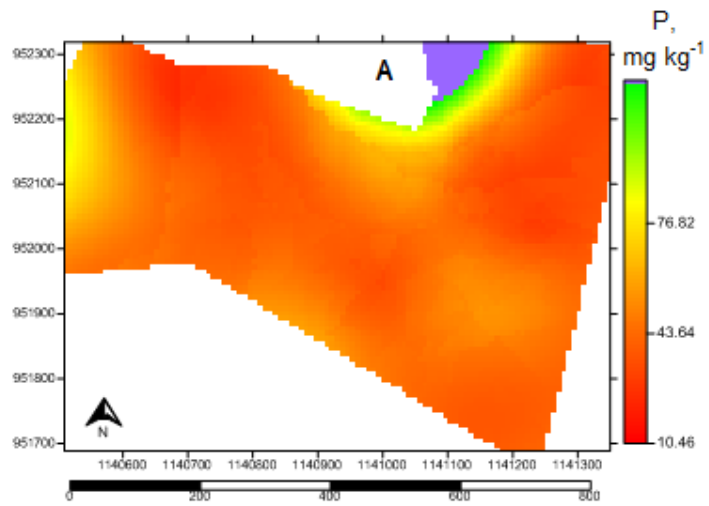
B	0.6 - 1.0
Zn	3.0 - 6.0
Cu	1.5 - 3.0
Mn	15 - 30
Fe	20 - 30

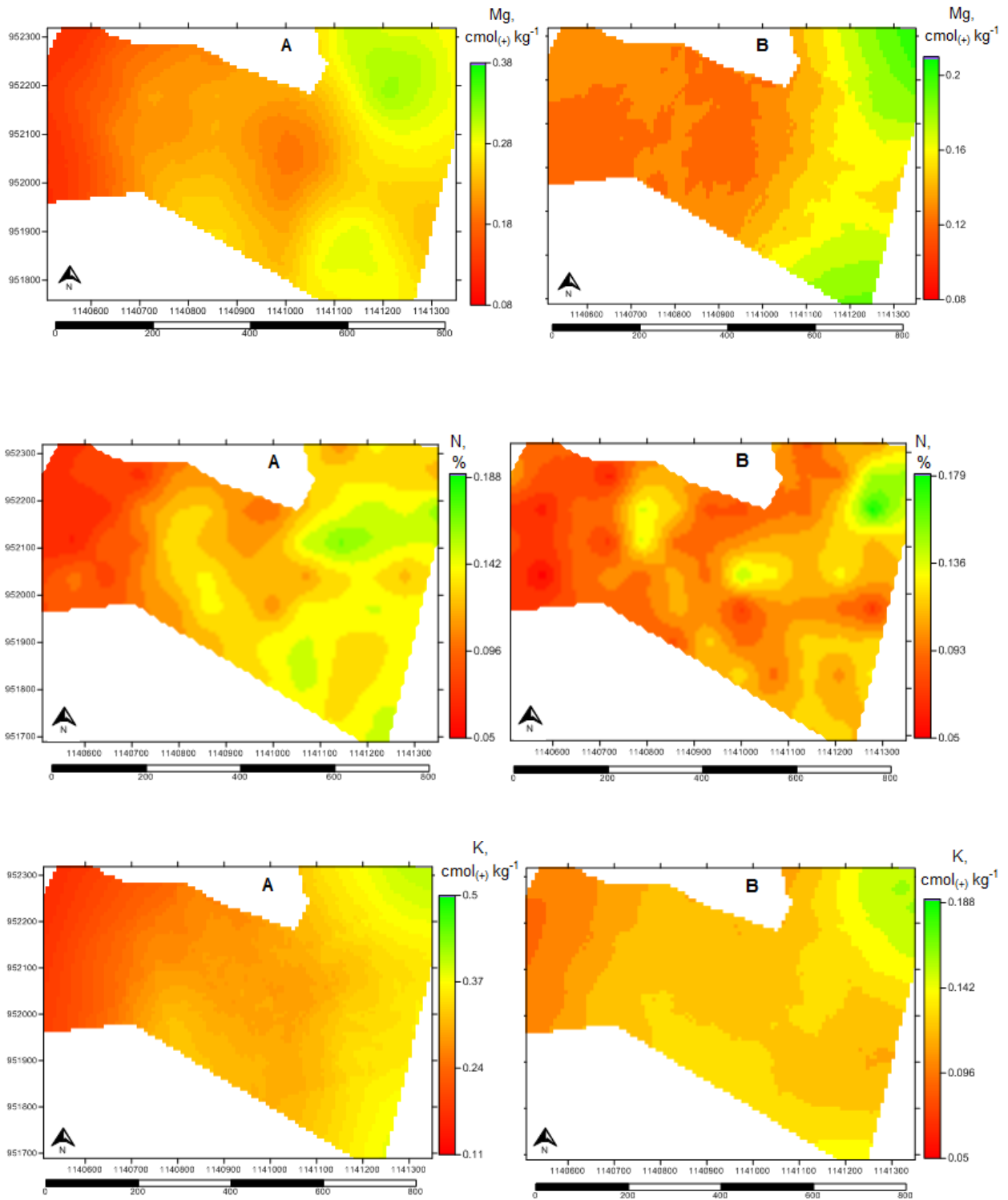
C. Anexo: Mapas de contorno de atributos físicos, químicos y características de cosecha.

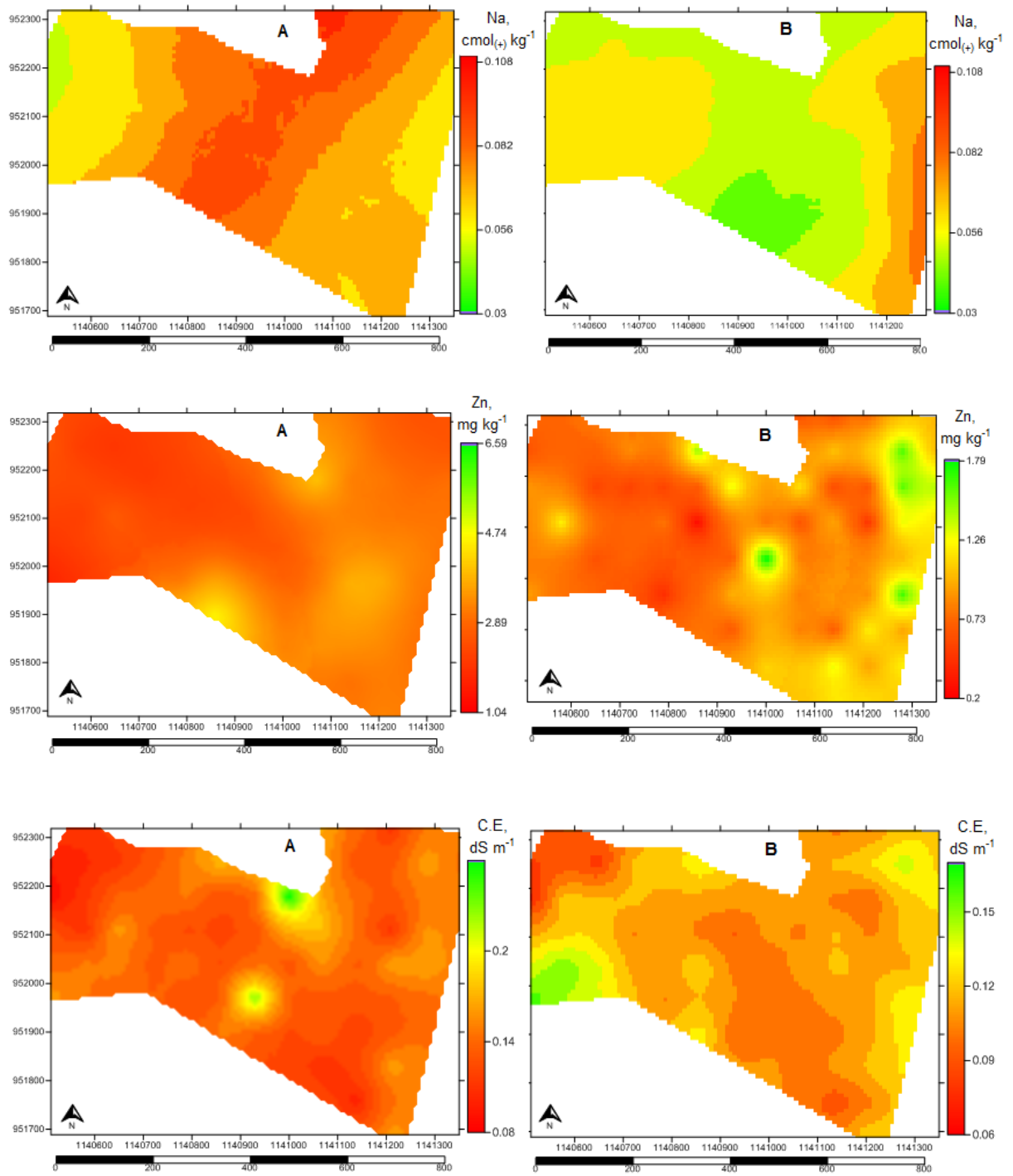
Figura C-1: Mapas de contorno de los atributos químicos del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).

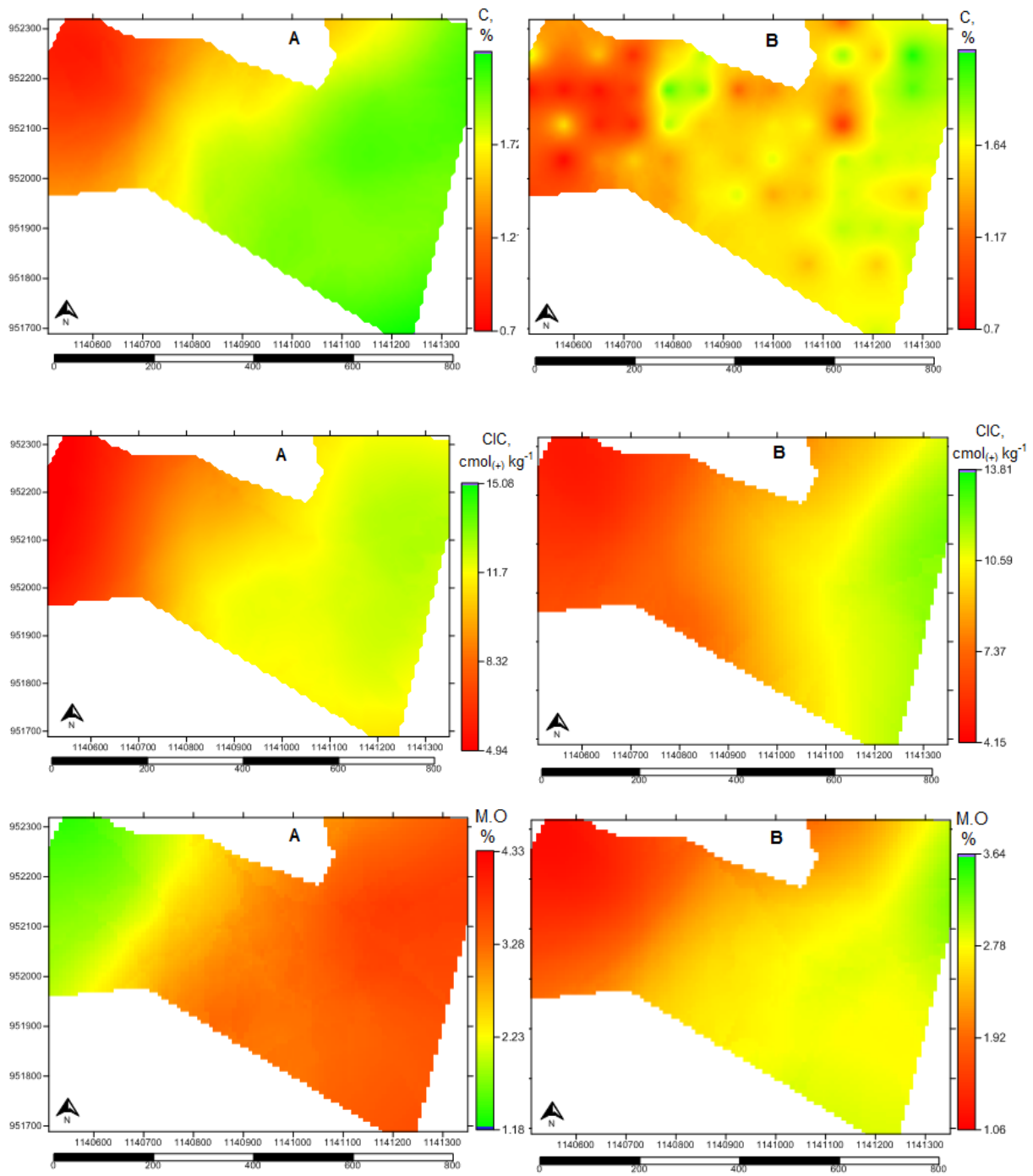












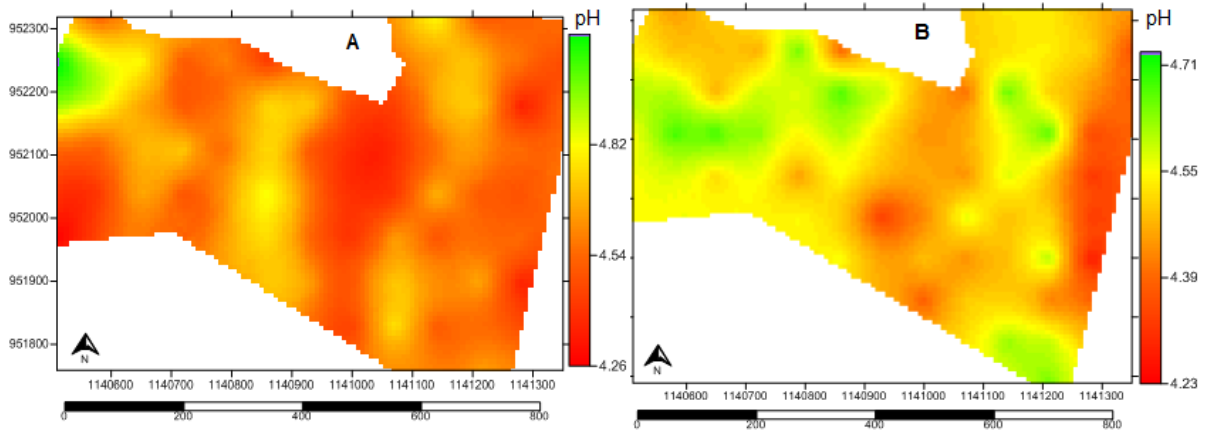
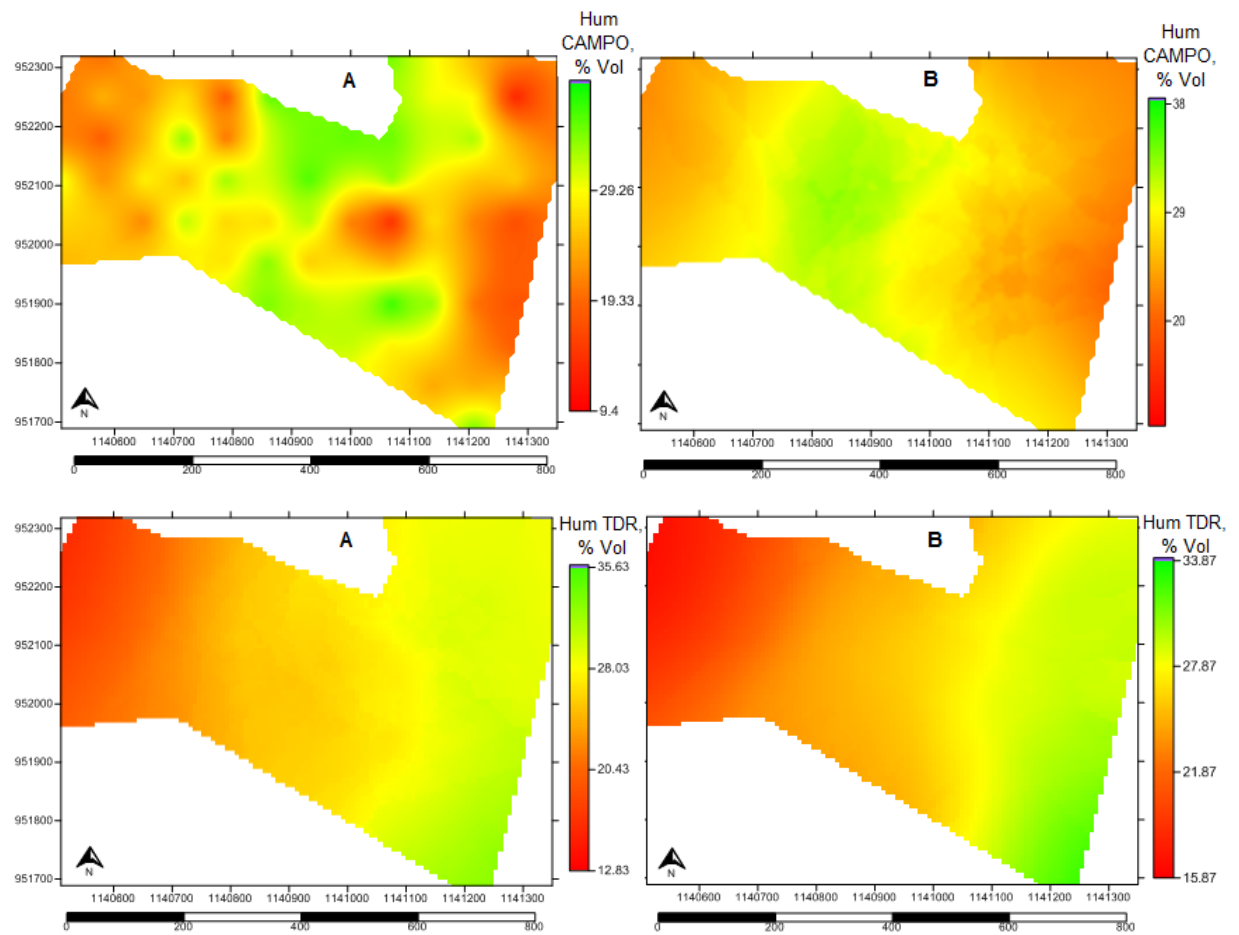
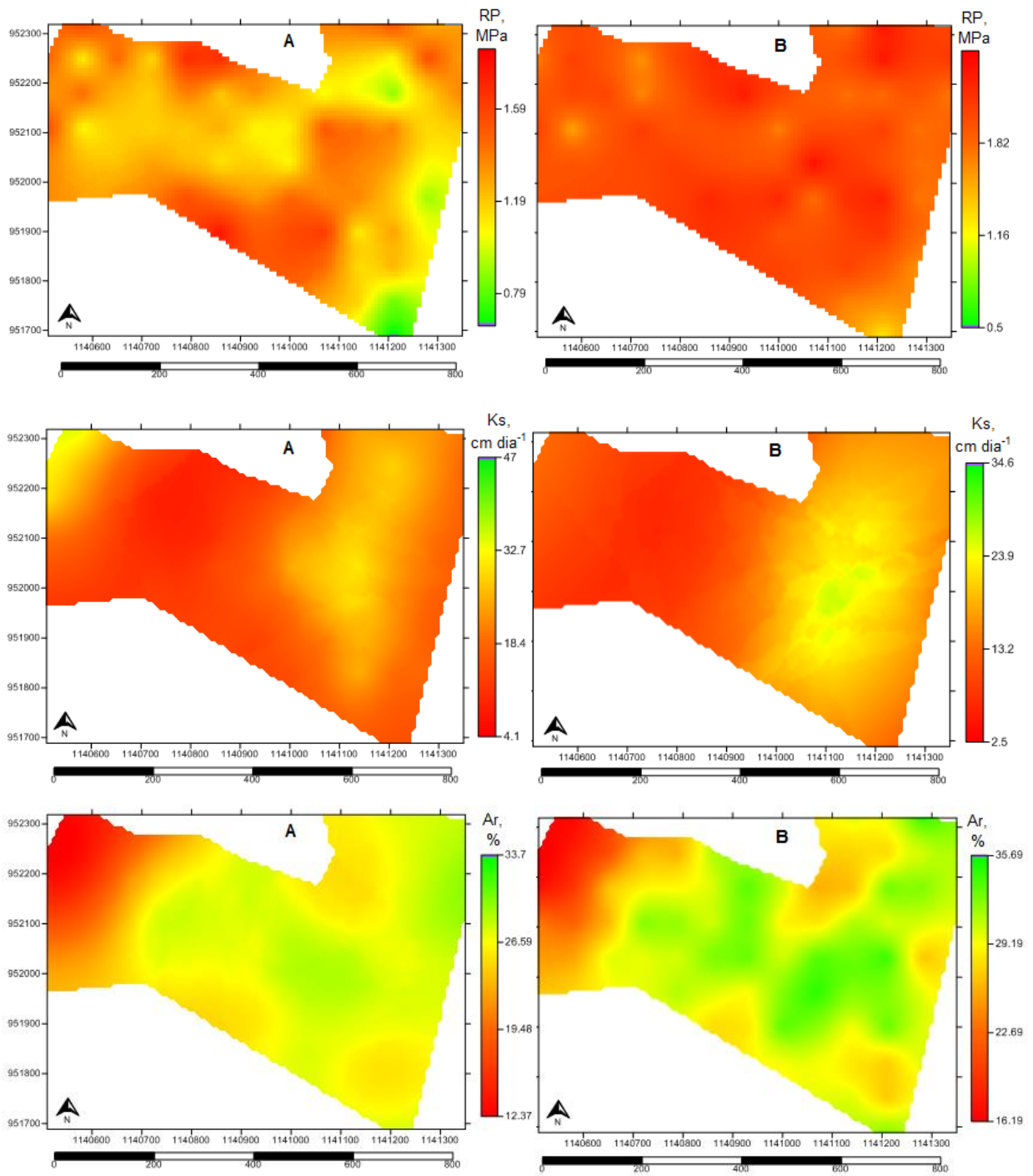
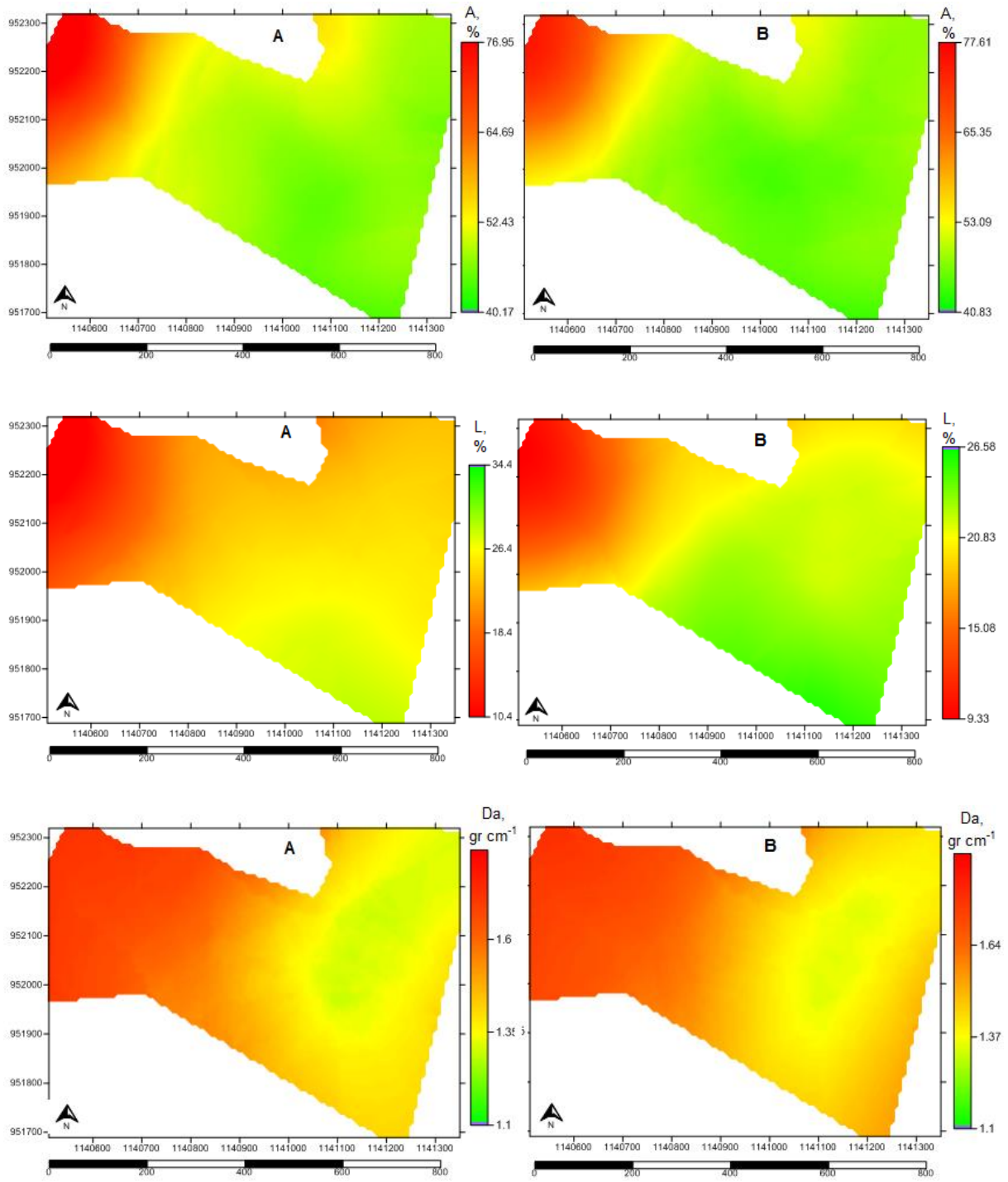
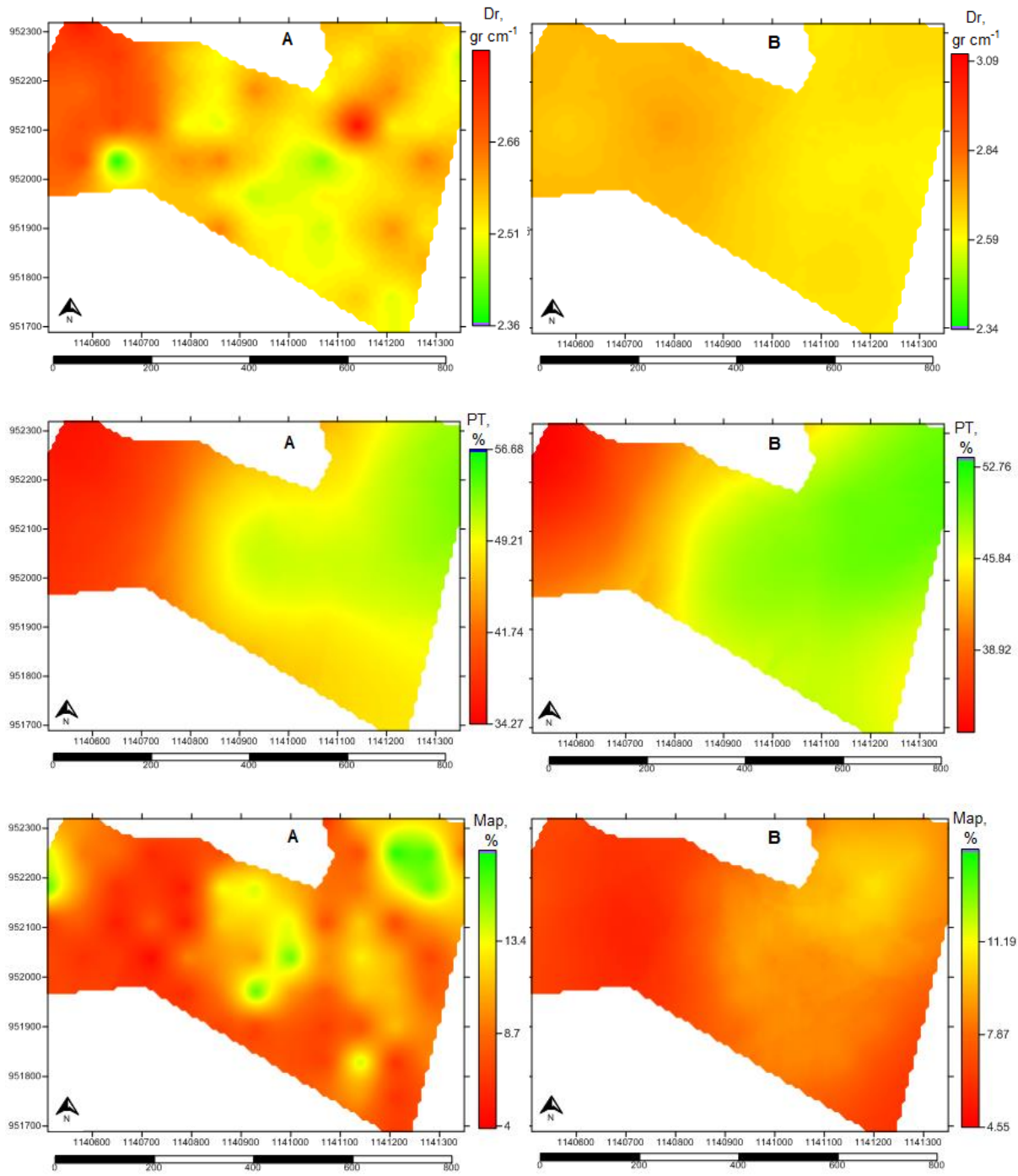


Figura C-2: Mapas de contorno de los atributos físicos del suelo (relacionar **A** con la profundidad 0-10 y **B** con la profundidad 10-20 cm).









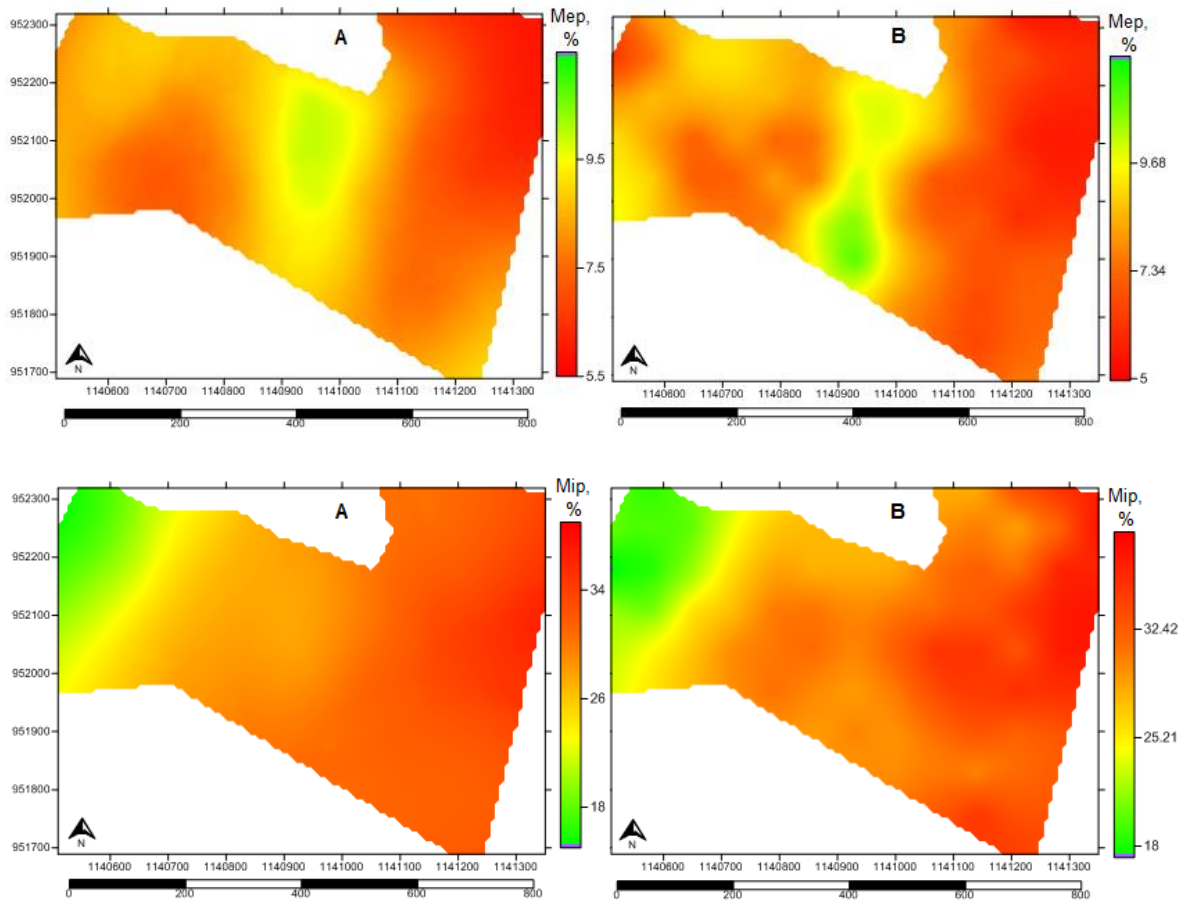
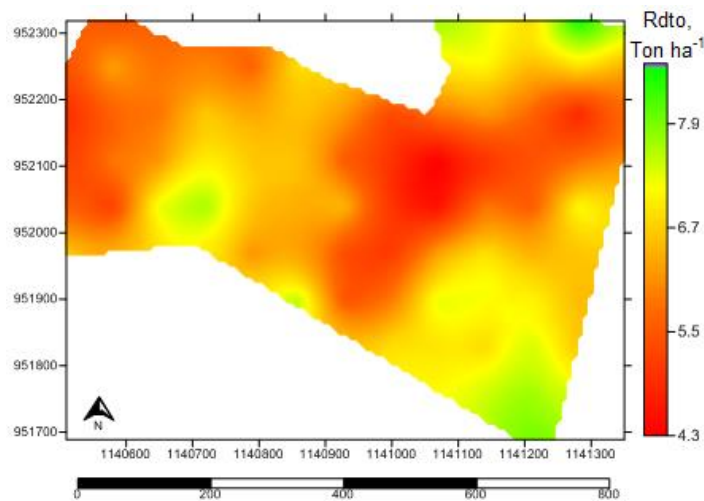
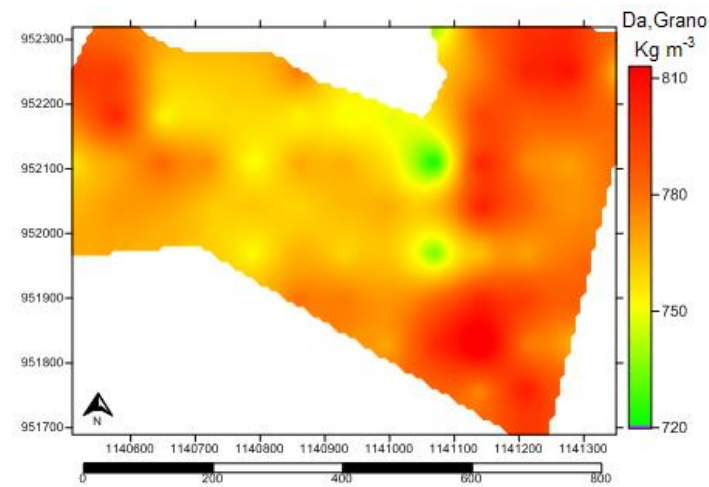
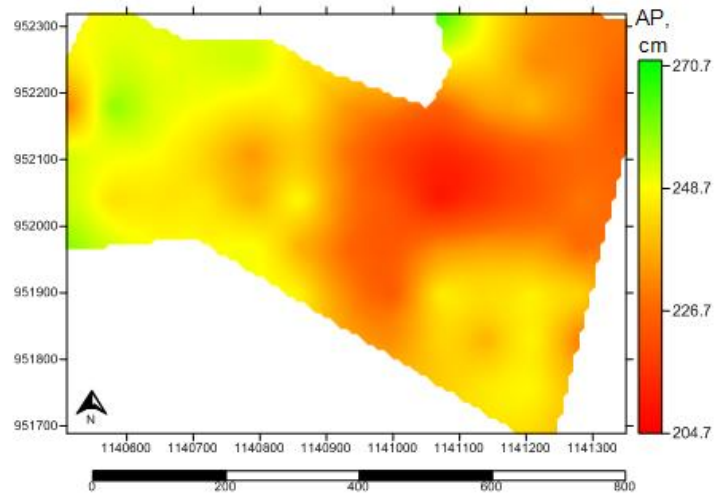
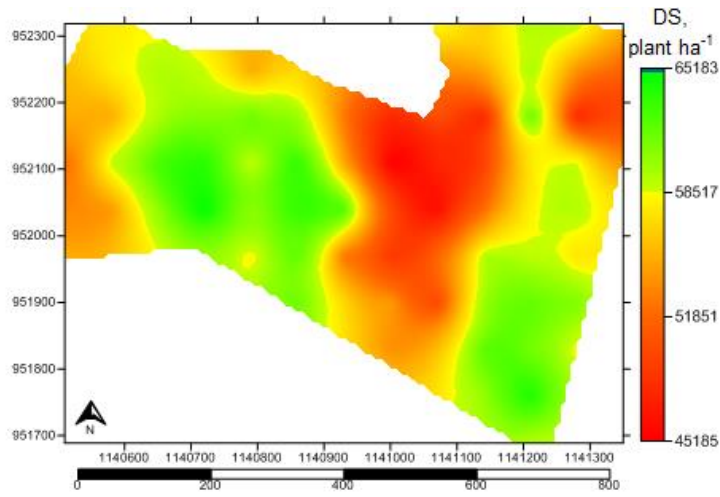
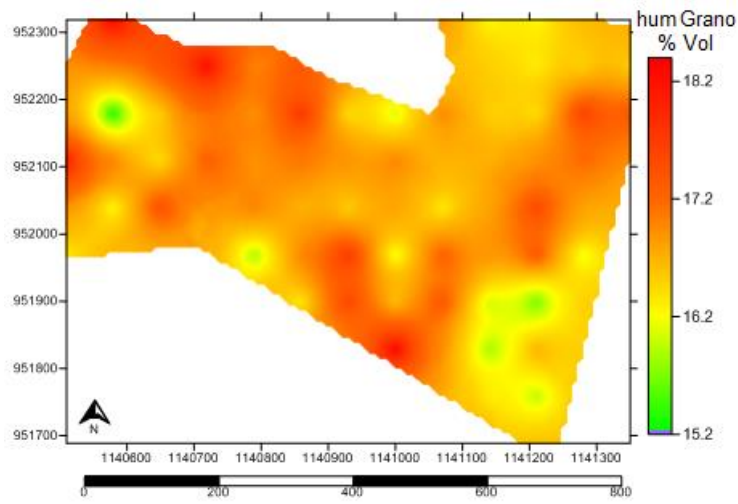
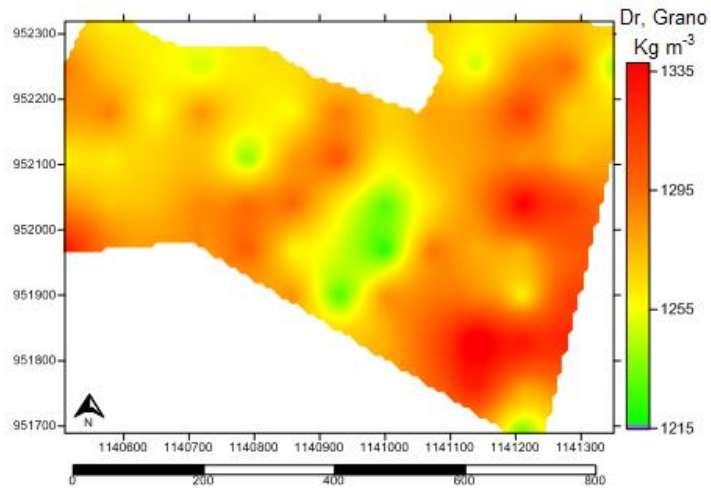


Figura C-3: Mapas de contorno de características de cosecha.

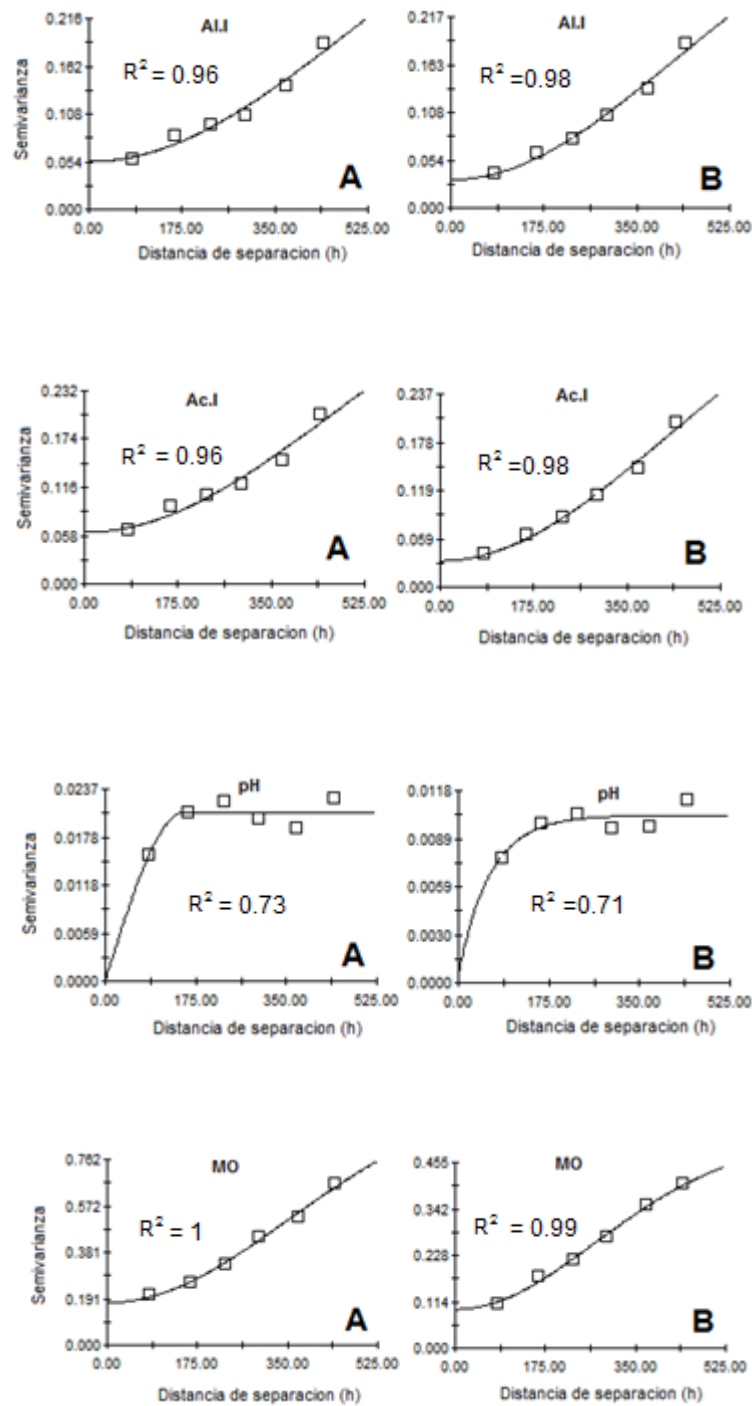


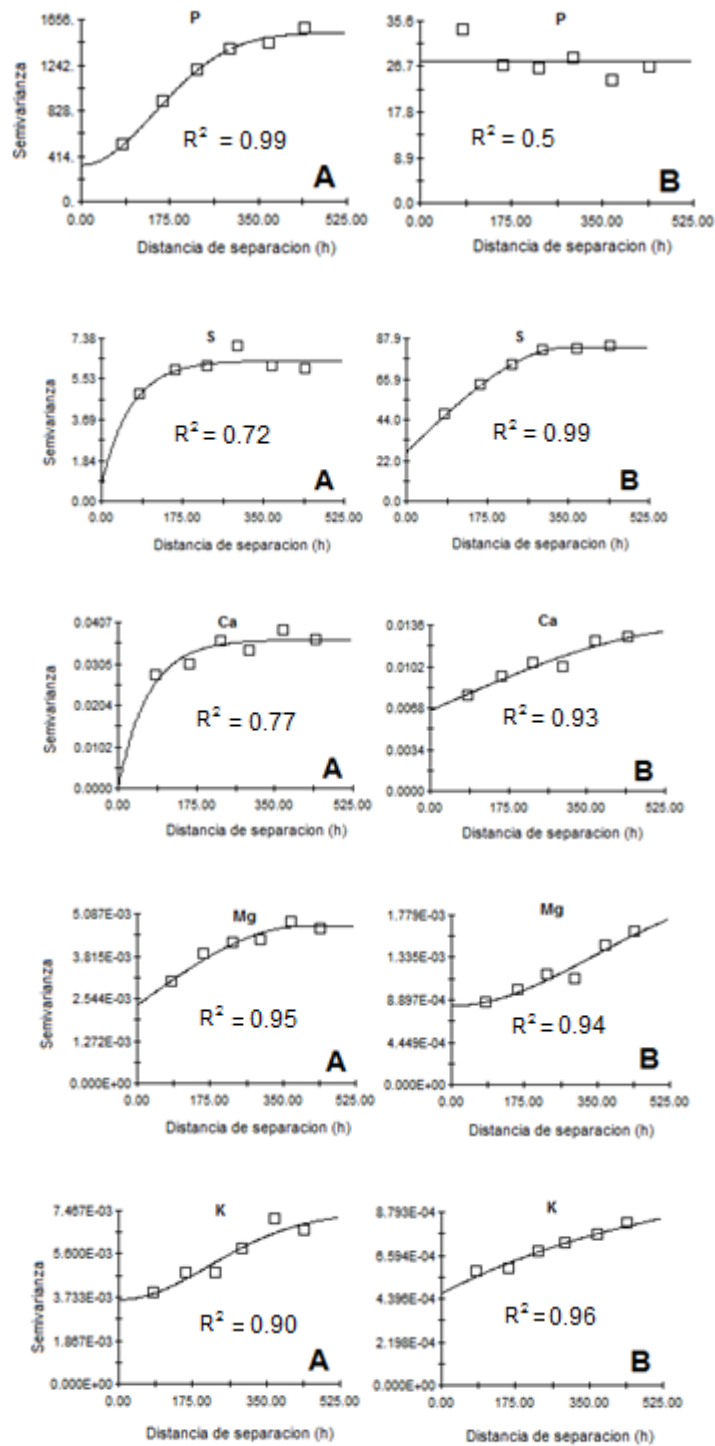


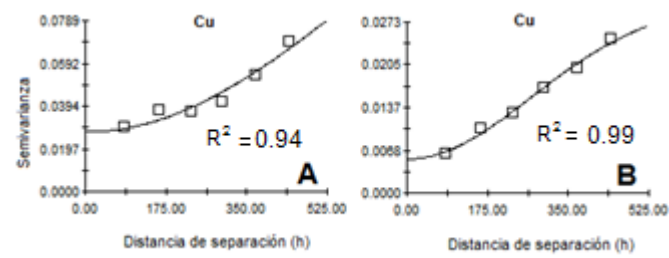
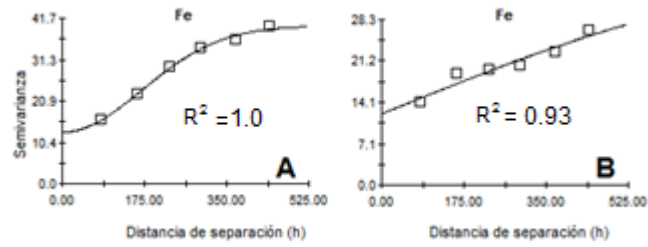
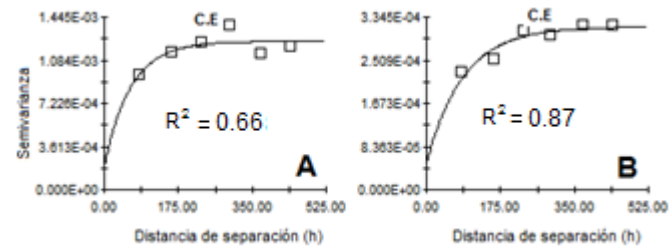
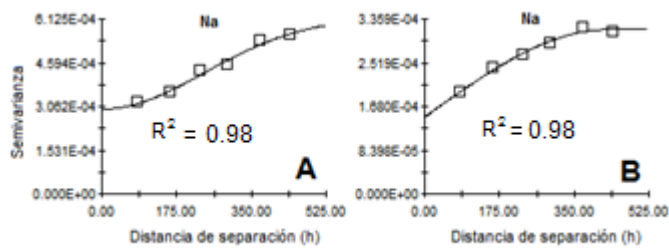


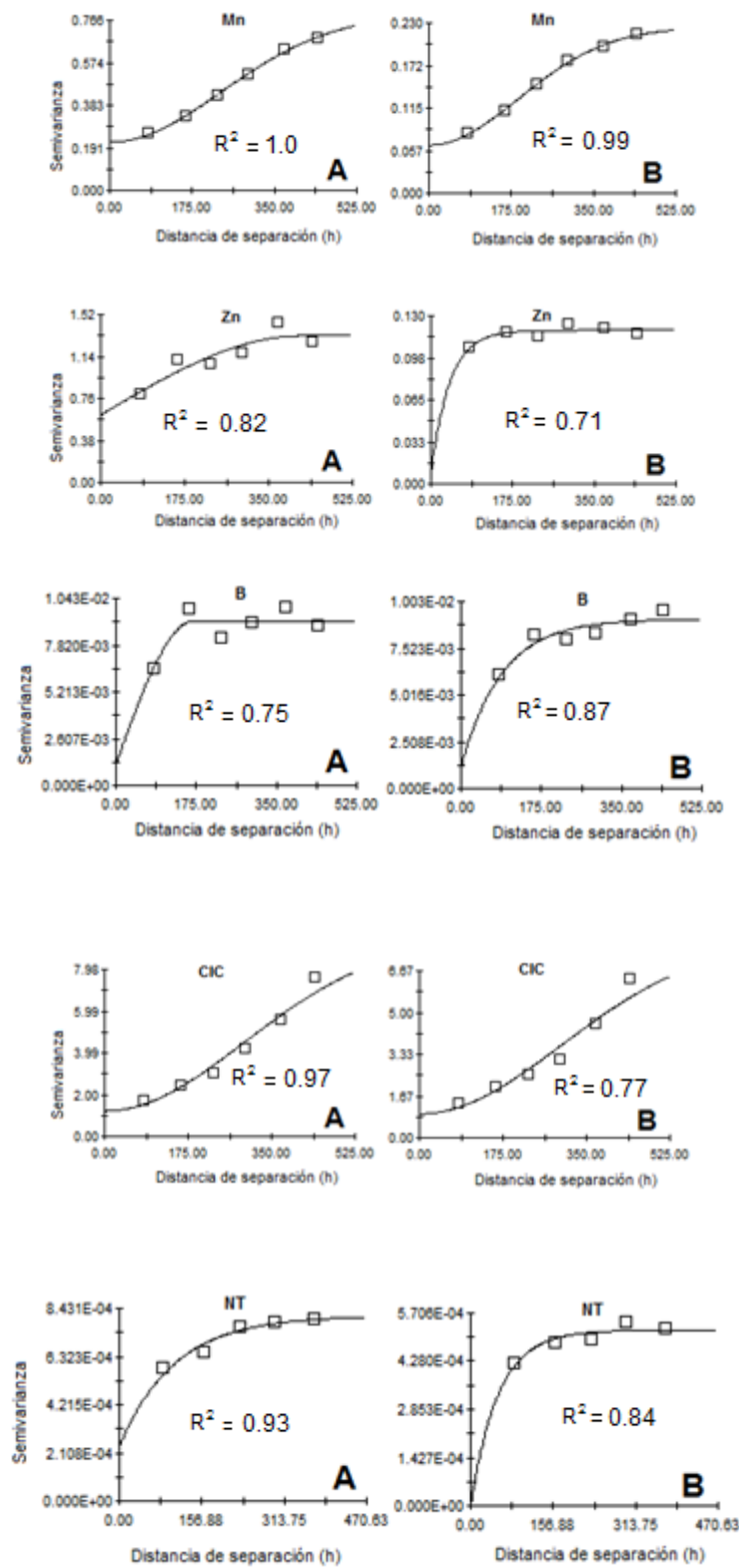
D. Anexo: Modelos de semivariogramas ajustados para los atributos químicos y físicos del suelo y características de cosecha

Figura D-1: Modelos de semivariogramas ajustados para los atributos químicos del suelo; (A) profundidad 0-10 cm y (B) profundidad 10-20 cm









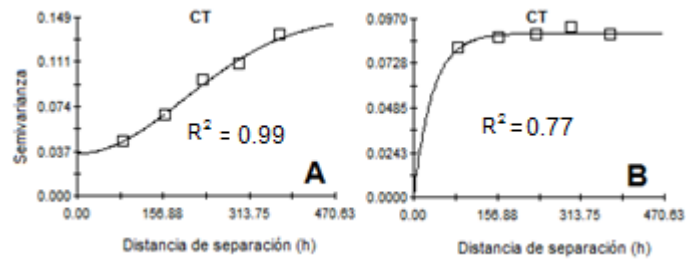
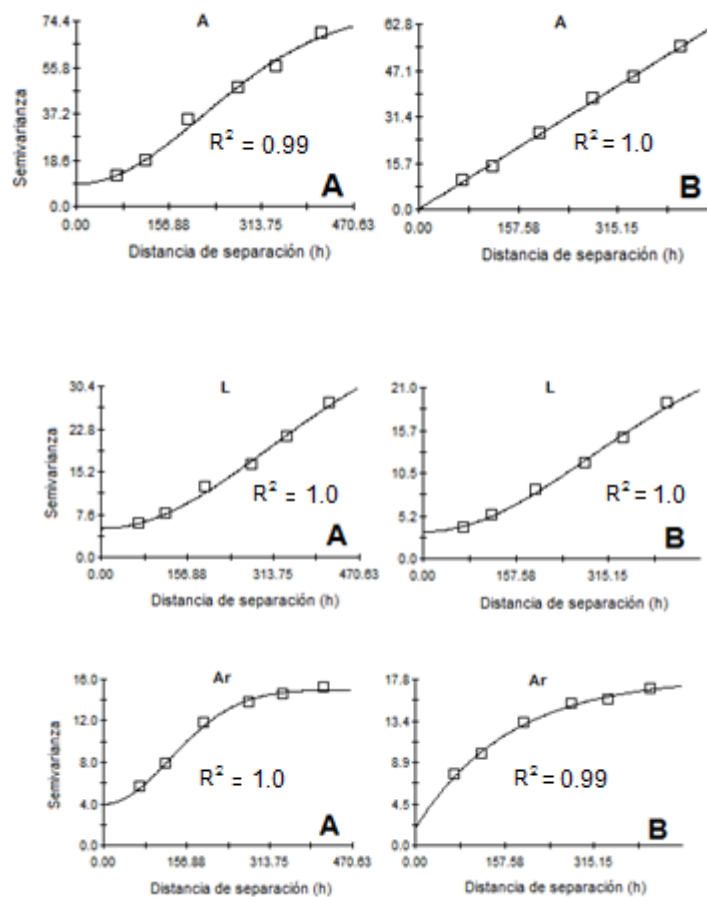
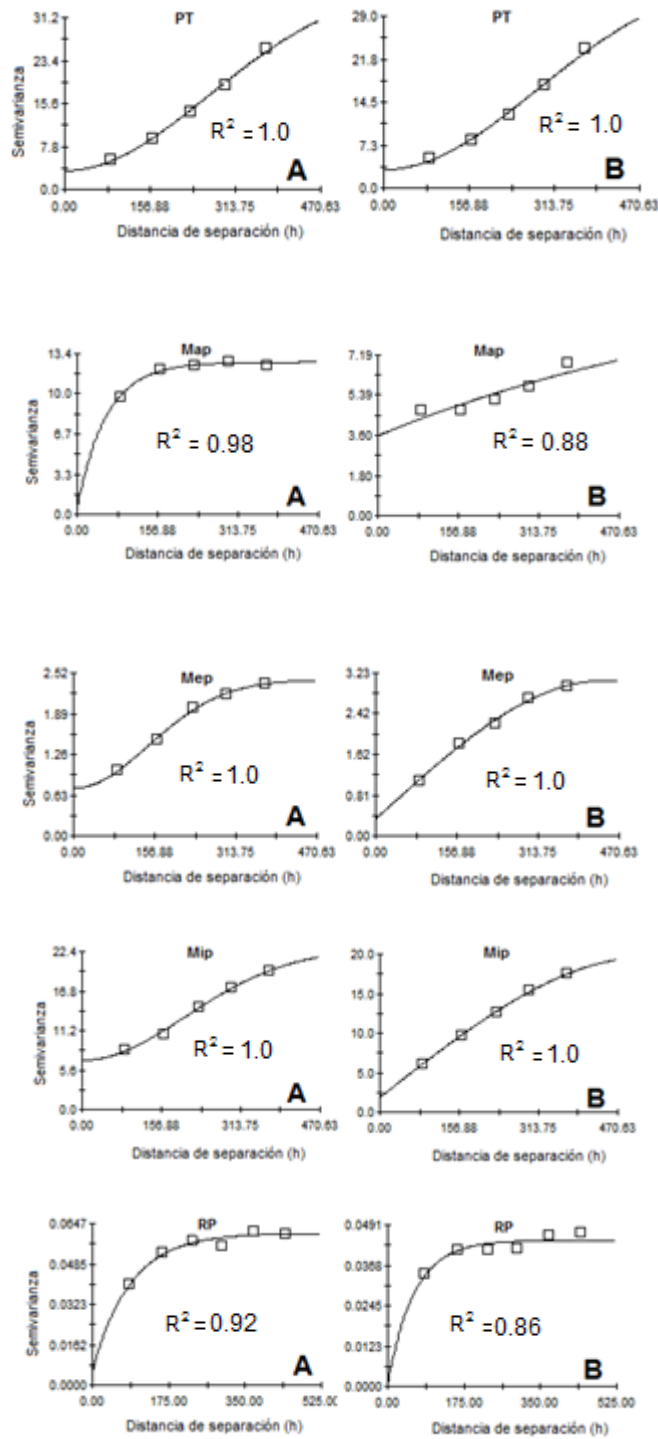


Figura D-2: Modelos de semivariogramas ajustados para los atributos físicos del suelo; (A) profundidad 0-10 cm y (B) profundidad 10-20 cm





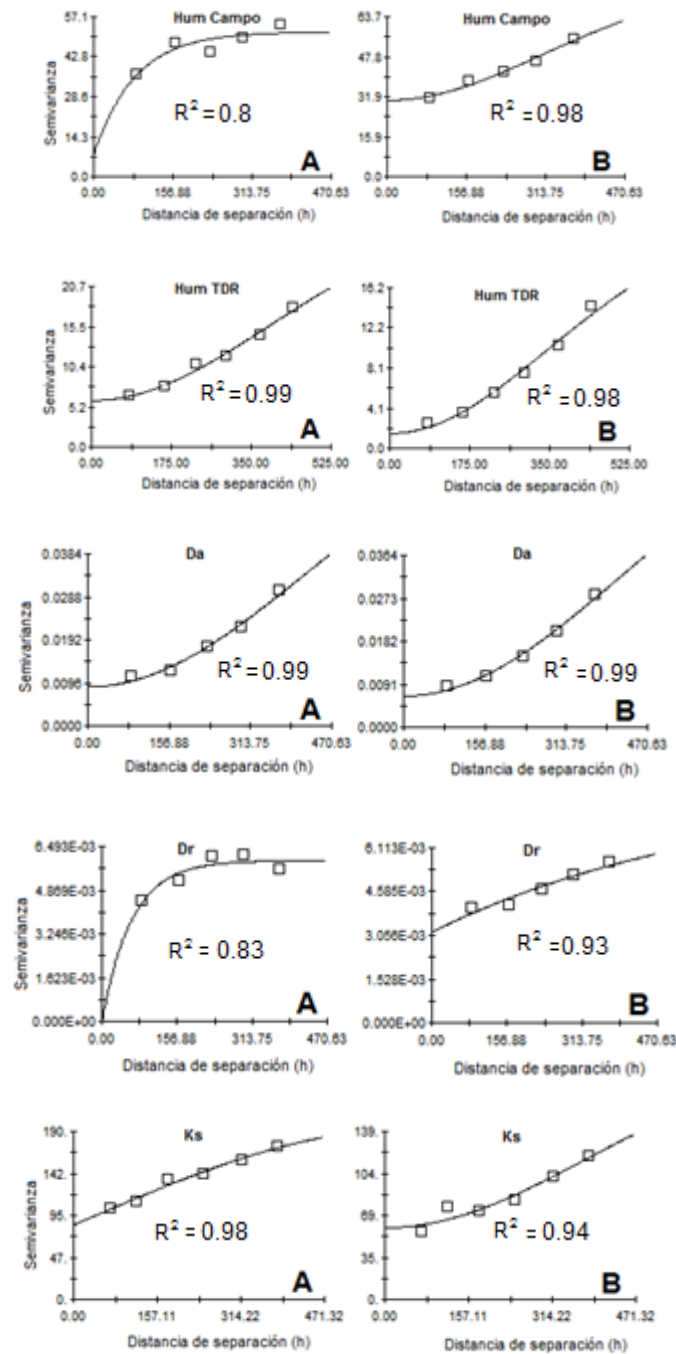
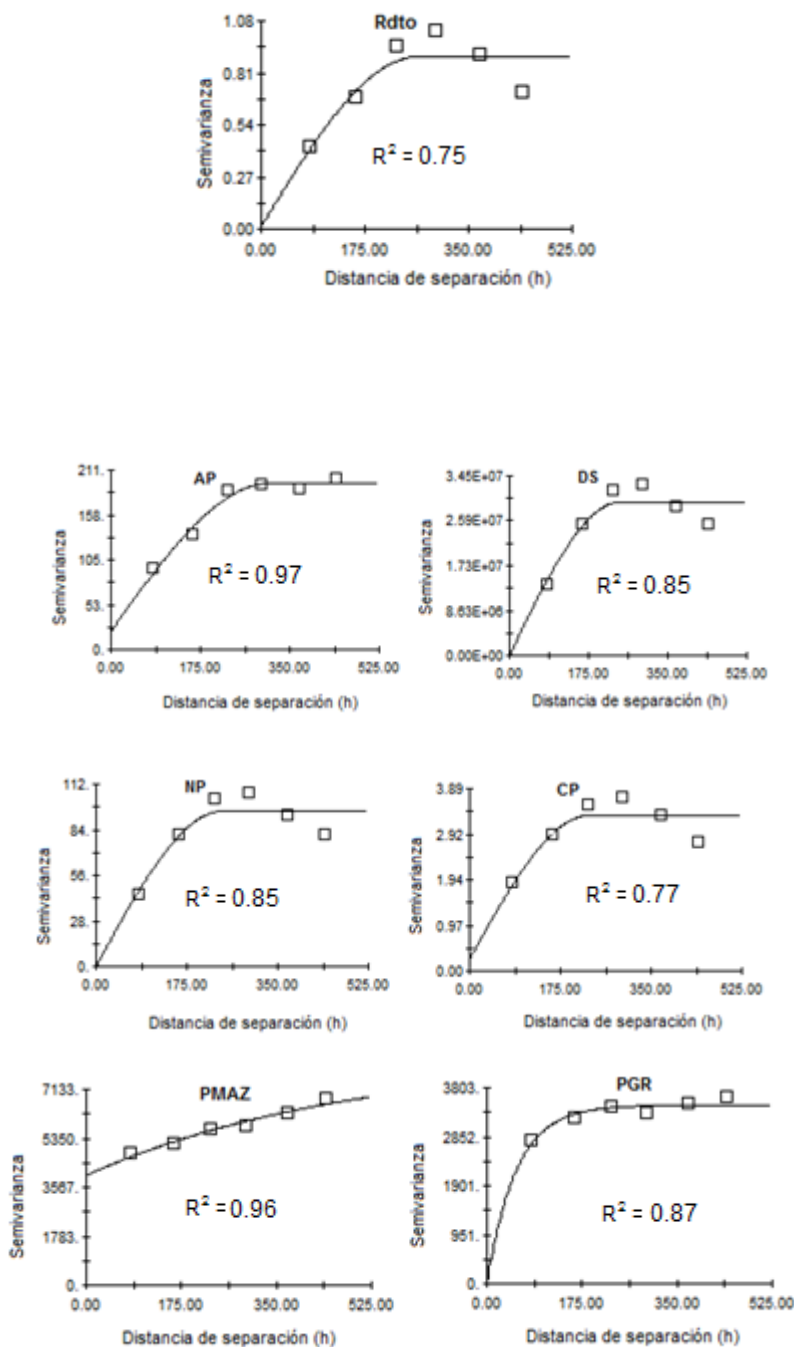
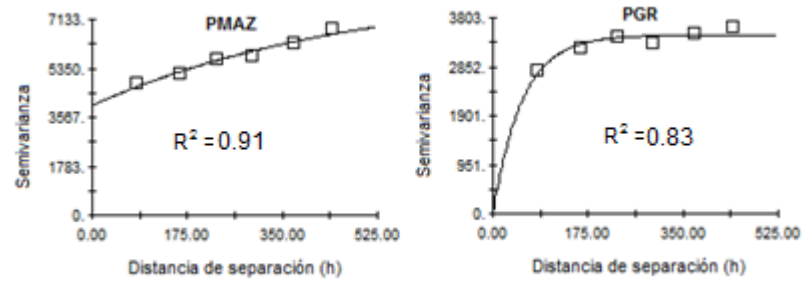


Figura D-3: Modelos de semivariogramas ajustados para las características de cosecha.





Bibliografía

ALMEIDA, J.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; DO AMARAL, A.J.; ZOLDAN, W.A. 2005. Propiedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 29(3):437-445.

AMÉZQUITA, E.; THOMAS, R. J.; VERA, R.R.; HOYOS, P.; MOLINA, D. L.; SANZ, J. I.; CHÁVEZ, L. F. 1997. Características estructurales de los suelos de los Llanos Orientales de Colombia sometidos a varios sistemas de manejo. Revista Suelos ecuatoriales 27.151-156.

AMÉZQUITA, E.; THOMAS, R. J.; MOLINA, D. L.; RAO, I.; SANZ, J. I.; CHÁVEZ, L. F.; GALVIS, J. H.; ALVAREZ, A. 2000. Sostenibilidad del recurso tierra de la Orinoquia con relación a su uso actual y potencial. Estudios de procesos de degradación físicas de suelos y sistemas de manejo para controlarla. Informe final 1997-2000. Presentado al Instituto colombiano para el Desarrollo de la ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas-COLCIENCIAS, por Centro Internacional de Agricultura Tropical- CIAT, Palmira.

AMÉZQUITA, E., 2004. La fertilidad física del suelo., In: Congreso Latinoamericano y de la Ciencia del Suelo, 16., Memorias. Cartagena, Colombia, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, CD.

AMÉZQUITA, E. 2013. Propiedades físicas de los suelos de los llanos orientales y sus requerimientos de labranza. En: AMÉZQUITA, E.; RAO, I.M.; RIVERA, M.; CORRALES,

I., BERNAL, J.H. Sistemas Agropastoriles: un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. Min Agricultura, Corpoica, CIAT.

ANDERSON-COOK, C.M.; ALLEY, M.M.; NOBLE, R.; KHOSLA, R. 1999. Phosphorous and potassium fertilizer recommendation variability for two Mid-Atlantic Coastal Plain fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63,1740–1747.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. 1997. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas*, 21(1):105-112.

BERNAL, J.; PEÑA, A.; DIAZ, N.; OBANDO, D. 2013. Condiciones climáticas de la altillanura plana colombiana em el contexto de cambio climático. En: AMÉZQUITA, E.; RAO, I.M.; RIVERA, M.; CORRALES, I., BERNAL, J.H. Sistemas Agropastoriles: un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia. MinAgricultura, Corpoica, CIAT.

BIAU, G., ZORITA, E., H. VON STORCH & H. WACKERNAGEL. 1997 Estimation of Precipitation by Kriging in EOF space. *GKSS*, 97, E45.

BOUMA, J.; J. STOOORVOGEL.; B.J. VAN ALPHEN.; AND H.W.G. BOOLTINK. 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. *Soil Science Society of American Journal, Madison*, 63(6):1763-1768.

BULLOCK, D.G.; HOEFT, R.G.; DORMAN, P.; MACY, T.; OLSON, R. 1994. Nutrient management with intensive soil sampling and differential fertilizer spreading. *Better Crops Plant Food* 78, 10–12.

BUNCH, R. 2001. Keynote: The secret to making soil conservation successful: Short-term benefits. En: STTOT, D.E.; MOHTAR, R.H.; STEINHARDT, G.C.; eds. Sustaining the global farm. Selected paper from the 10th international Soil Conservation Organization meeting, May 24-29, 1999, West Lafayette, IN. International Soil Conservation Organization in cooperation with United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, and Purdue University, West Lafayette, IN, Estados Unidos. p516-522.

CAMACHO-TAMAYO, J.H.; LUENGAS-GÓMEZ, C.A.; LEIVA, F.R. 2010. Análisis multivariado de propiedades químicas en Oxisoles con diferentes niveles de intervención agrícola. *Acta Agronómica*, Palmira, 59(3):273-284.

CAMACHO-TAMAYO, J.H.; LUENGAS, C.; LEYVA, FABIO. 2008. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia. *Chilean Journal Agricultural Research*, 68(1): 42-55.

CAMBARDELLA, C.; MOORMA, T.; NOVAK, J.; PARKIN, T.; KARLEN, D.; TURCO, R.; KONOPKA, Y.A. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 58(5):1501–1511.

CARVALHO, M.P.; TAKEDA, E.; FREDDI, E O.S. 2003. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitoria Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Viçosa, 27: 695-703.

CHAN, M.D.; HUMMEL, J.W.; BROUER, B.H. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1240–1248.

CHAVES, L.H.G.; TITO, G.A.; CHAVES, I.B.; LUNA, J.G.; SILVA, P.C.M. 2004. Propriedades químicas do solo aluvial da ilha de Assunção–Cobrobó (Pernambuco). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 28(3):431-437.

CHENU, C. 1992. Clay-of Sand-polysaccharide associations as models for the interface between microorganisms and soil: Water related properties and microstructure, *Geoderma*, 56.143-156.

CORRALES, I.; AMÉZQUITA, E.; RIVERA, M.; CHAVEZ, L. 2003. Condiciones físicas de un suelo bajo diferentes sistemas de labranza y su efecto sobre el comportamiento de cultivos y malezas en la altillanura colombiana. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. UNESCO. La Serena, Chile.

COSTA, F.S. 2008. Estoque de carbono orgánico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 32(1):323-332.

CRUZ, J.; NONATO, R.; ROCHA, S.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; CASTRO, R. 2010. Spatial analysis of physical attributes and organic carbon from yellow-red alfisol with sugarcane crop. Ciencia e Agrotecnologia, Lavras, v.34, n.2, p.217-278.

CUCUNUBÁ-MELO J.L., ÁLVAREZ HERRERA J.G. & CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2011. Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 11, 87-99p.

DEXTER, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil and Tillage Research, Amsterdam, 11 (3-4):199-238.

DEXTER, A.R. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120 (3-4):201-214.

DIAZ, E.; 1993. Introducción a Conceptos Básicos de Geoestadística. Memorias Seminario de Estadística y Medio Ambiente. Centro de Investigación de Matemáticas, CIMAT. Guanajuato. México.

DIGGLE, P.J. Y J.R. RIBEIRO, J.R. 2000. Model Based Geostatistics. 1ed. São Paulo: Associação Brasileira de Estatística. 129 p.

EL-SWAIFY. 1980. Physical and mechanical properties of Oxisol, 303-334p. In: (B.K: Thng, ed) Soils with variable charge. Soil Bureau, Department of Scientific and industrial Research, Lower Hutt, New Zealand.

ESLAVA, J.; LOPEZ, V.; OLAYA, G. 1986. Los climas de Colombia (Sistemas de W koeppen). *Atmosfera* 5:35-81.

FAGROUD, M. Y M. VAN MEIRVENME. 2002. Accounting for soil spatial autocorrelation in the design of experimental Trials. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 66 (4):1134-1142.

FALLEIRO, R. M.; SOUZA, C. M.; SILVA, C. S.; SEDIYAMA, C. S.; SILVA, A. A.; FAGUNDES, J. L. 2003. Influência dos sistemas de preparo nas propriedades químicas e físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 27(6): 1097-1104.

FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A., SILVA, E.A.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. 2008. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 32 (2):463-476.

FERREIRA, D.2011. *Estatística Multivariada*. 2da edición. Lavras: ed. UFLA, 676p.

FRANZEN, W.D.; PECK, T.R. 1995. Field soil sampling density for variable rate fertilization. *J. Prod. Agric.* 8, 568–574.

FRIESEN, D.; THOMAS, R.; RIVERA, M. ASAKAWA, N.; BOWEN, W. 2013. Dinámicas del Nitrogeno en monocultivos y cultivos en rotación en oxisoles de los llanos orientales de Colombia. En: AMÉZQUITA, E.; RAO, I.M.; RIVERA, M.; CORRALES, I., BERNAL, J.H. *Sistemas Agropastoriles: un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*. MinAgricultura, Corpoica, CIAT.

GANDAH, M.M.; STEIN, A.; BROUWER, J.; BOUMA, J. 2000. Dynamics of spatial variability of millet growth and yields at three sites in Niger, West Africa and implications for precision agriculture research. *Agricultural Systems*, Oxon, 63(2):123-140.

GAVIRIA, S.; FAIVRE, P. 2005. Génesis y evolución mineralógica de oxisoles de los llanos orientales. *REV. Análisis geográficos*. (30). 50-64p.

GIRALDO, H.R. 2002. Introducción a la Geoestadística: Teoría y aplicación, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, p.32-38.

GHO, B.C. 2004. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su relación con los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.). Departamento de Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

GOOVAERTS, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertil. Soils* 27:315-334.

GROSSMAN, R.; REINSCH, T. 2002. *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison, p.201-225.

HENAO, M. 2010. Prácticas de laboratorio métodos de análisis de suelos (Versión 4), Colombia: Universidad Nacional de Colombia – Facultad de Agronomía.

HERRANZ, J.; DEIXOTO, H.; CERISOLO, C.; SANCHEZ, V. 2000. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. *Journal of Terramechanics*, USA, v.37, n.4, p.167-184.

HINSINGER, P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil* 237: 173-195.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos Analíticos del Laboratorio de suelos. VI Edición. Bogotá, 2006. Pag.396, 437.

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI. Métodos Analíticos del Laboratorio de suelos. V Edición. Bogotá, 1990. Pag.173, 250.

JAIMES, W.; NAVAS, G.; SALAMANCA, C.; CONDE, A. 2003. Estudio detallado de suelos de la estación experimental de Corpoica “Sabanas” en la Altillanura Colombiana. Corpoica, C. I. La Libertad, Villavicencio, Colombia. 62 p.

JARAMILLO, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 613 p.

JOHANN, J.A.; SILVA, M.C.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; DALPOSSO, G.H. 2010. Variabilidade espacial da rentabilidade, perdas na colheita e produtividade do feijoeiro. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 30(4):700-714.

LETEY, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. Advances in Soil Science, 1:277-291.

LONG, D.S.; CARLSON, G.R.; NIELSEN, G.A. 1996. Cost analysis of variable rate application of nitrogen and phosphorus for wheat production in northern Montana. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. (Eds.), Precision Agriculture. Proceedings of the Third International Conference, Minneapolis, MN, 23–26 June, 1996. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 1019–1031.

LOWENBERG-DEBOER, J. AGHIB, A.1999. Average return and risk characteristics of site specific P and K management: Eastern Corn Belt on-farm trial results. J. Prod. Agric. 12, 276–282.

MARTINS, A.L.S., E.G. MOURA, AND J.H. CAMACHO-TAMAYO. 2010. Spatial variability of infiltration and its relationship to some physical properties. Ingeniería e Investigación 30:116-123.

MARTINS A.L.S., MOURA E.G. & CAMACHO-TAMAYO J.H. 2011. Evaluation of corn production parameters and their spatial relationship with chemical attributes of the soil. *Agronomía Colombiana*, 29:99 – 106.

MCGRAW, T. 1994. Soil test variability in southern. Minnesota. *Better Crops Plant Food* 78, 24–25.

MEDINA, C.; CAMACHO-TAMAYO, J.H.; CORTES, C.A. 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Eng. Agríc.* 32(1):91-101.

MEJIA, L. 1996. Génesis y Características de los Oxisoles y Suelos Óxicos de los Llanos orientales de Colombia y su relación con la Fertilidad. *Suelos ecuatoriales*. Vol. 26, No. 1, pag. 7-34. Villavicencio, Meta.

MOLINA, D.L.; AMÉZQUITA, E. HOYOS, P. 2003. Construcción de Capas Arables en suelos oxisoles de la Altillanura plana. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. 2006. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 10(1): 30-37.

MOURA, E.G.; VIEIRA, S.R.; CARVALHO, A.M. 1992. Avaliação da capacidade de aeração e de água disponível dos solos de duas transecções na Baixada Ocidental Maranhense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 16:7-18.

MORGAN, M.T.; ESS, D.R. 1997. *The Precision Farming Guide for Agriculturalists*. John Deere Publishing, Moline, IL.

MUNNER, M.; OADES, J.M. 1989. The role of Ca-Organic Interactions in soils Aggregate Stability. III. Mechanics and Models. Aust. Journal of Soil Research, 27(2)411-423.

NARRO, L.; PANDEY, S.; LEON, A.; PEREZ, J.; SALAZAR, F. 2001. Investigaciones de maíz para suelos ácidos. Sistema Agropastoriles en Sabanas Tropicales de América Latina. Cali. Colombia. CIAT. EMBRAPA. Cap. 10, Parte 3, pag. 129.

ORJUELA-MATTA, H.; RUBIANO, Y.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2011. Spatial variability of hydrodynamic parameters in the native savanna of the Colombian Eastern plains. Agronomía Colombiana, Bogotá, v.29, n.1, p.83-90.

ORTEGA, R. & SANTIBAÑEZ, O. 2007. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. Computers and Electronics Agriculture, 58(1), 49-59.

PARR, J.F.; HORNICK, S.B.; PAPENDICK, R.I.1992. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. American Journal of Alternative Agriculture, 7(1-2):5-11.

PEÑA, R.; RUBIANO, Y.; PEÑA, A.; CHAVES, B. variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un Inceptisol del piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia). Agronomía Colombiana, Bogotá, v.27, n.1, p.111-120, Feb., 2009.

PETITGAS, P. 1996. Geoestitistics and their applications to fisheries survey data 5: 114-142. In: B.A. Magrey & E. Mosknes, (E). Computers and Fisheries Research. Chapman-Hall, Londres.

PICONE, L.; ZAMUNER, E.C.; BERARDO, A.; MARINO, M.A. 2003. Phosphorus transformations as affected by sampling date, fertilizer rate and phosphorus uptake in a soil under pasture. Nutrient Cycling in Agroecosystems 67(3):225-232.

RACZKOWSKI, C.W.; MUELLER, J.P.; BUSSCHER, W.J.; BELL, M.C.; MCGRAW, M.L. 2012. Soil physical properties of agricultural systems in a large-scale study. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.119, n.1, p.50-59.

RAMIREZ-LOPEZ, L.; REINA, A.; CAMACHO-TAMAYO, J.H. 2008. Variabilidad espacial de atributos físicos de un Typic Haplusdox de los Llanos Orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola*. Jaboticabal, v.8, n. 1, p. 55 – 63.

REHM, G.W.; LAMB, J.A. 2000. Soybean grain yield response to phosphate application across a glacial till landscape. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. (Eds.), *Precision Agriculture. Proceedings of the Fifth International Conference*, Minneapolis, MN, 16–19 July, 2000. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI (CD-ROM).

REVISTA NACIONAL DE AGRICULTURA. 2007. SAC. Agricultura de precisión (AP). Colombia. N. 949, pag. 20-28.

RIENZI, E. 2003. Efecto de enmiendas cálcicas y cobertura plástica sobre la infiltración y los procesos erosivos. Evaluación de parámetros y procesos hidrológicos en el suelo. VII Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile.

RIPPSTEIN, G; ESCOBAR, G.; MOTTA, F. 2001. Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. CIAT – CIRAD. p.302.

RIVERA, M.; AMÉZQUITA, E.; RAO, I.M.; CORRALES, I.I.; CHAVEZ, L.F. 2013. Establecimiento de Sistemas Agropastoriles y su efecto en el Rendimiento de Cultivos en Suelos Ácidos de Sabanas. En: AMÉZQUITA, E.; RAO, I.M.; RIVERA, M.; CORRALES, I., BERNAL, J.H. *Sistemas Agropastoriles: un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*. MinAgricultura, Corpoica, CIAT.

RUBIANO, Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo, planificación y uso del suelo. 2005. 128f. Tesis (Doctorado en Ciencias Agrícolas - Manejo de Suelos y Aguas), Universidad Nacional de Colombia. Palmira.

SAMPER, F., CARRERA, J. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del Trópico. Características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), San José, Costa Rica.

SANCHEZ, P.A. 1976. Properties and management of soils in the tropics. Wiley, New York. P.96-103.

SANCHEZ, P.A.; SALINAS, J.C. 1981. Low-input technology for managing oxisols and Ultisols in Tropical America. *Adv. Agron.* 34: 280-406.

SAWYER, J.E. 1994. Concepts of variable rate technology with consideration for fertliloser application. *J. Prod. Agric.* 7, 195–201.

SCHEPERS, A.; SHANAHAN, J.; LIEBIG, M.; SCHEPERS, J.S.; JOHNSON, S. & LUCHIARI, A. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy and Horticulture Department. J.* 96:195-203.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H. & BURGER, J.A. 2000. A Review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management, Wageninge,*138:335-356.

SILVA, V.R. DA.; REICHERT,J.M.; STORK,L.; FEIJO, E S. 2003. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrofico arenico. *Rev. bras. Cienc. Solo* 27:1013-1020.

SILVEIRA, P.M: DA.; ZIMMERMANN, F.; DA SILVA, S.C.; DA CUNHA, A.A. 2000. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. *Pesq. Agropec. Bras.* 35: 2057-2064.

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

SINGER, M. & EWING, S. 2000. Soil quality In: Sumner, M.E. Handbook of soil Science. Boca Raton: CRC Press. 271-298.

SPAIN, J.M.; AMÉZQUITA, E.; RAO, I.; AYARZA, M.; BARRIOS, E.; RONDÓN, M. 2007. Improving productivity and sustainability of crop-livestock systems in tropical savannas of South America. ASA-CSSA-SSSA, 2007 International Annual Meetings, Nov 4-8, Nueva Orleans, LA, Estados Unidos.

STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. 1992. Bioestadística: principios y procedimientos. 2da Edición (1ra em español). Ed McGraw-Hill.

SOUZA, Z.; LEITE, J.A.; BEUTLER, A.N. 2004. Variabilidade espacial de pH, Ca, Mg e V% do solo sob diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. Ciência Rural, Santa Maria, 34(6):1763-1771.

STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH II, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science, Soil and Tillage Research, 99:4-48.

TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D.; COOK, F.J.; KIRBY, J.M.; CARTER, M.R. 1997. Physical attributes of soil quality. In: GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R. Soil quality for crop production and ecosystem health. Amsterdam: Elsevier Science, Amsterdam, p.21-58.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latos solo Roxo sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 22:573-581.

TORRES, A. L.; NAVAS, A. A.; PANDEY, S.; LEON, L. A. 1994. Sikuni V-110, primera variedad de maíz en Colombia tolerante a suelos ácidos . Plegable de divulgación no.

274. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

VALENCIA, R. A.; SALAMANCA, C. R.; NAVAS, G. E.; BAQUERO, J. E.; RINCON, A.; DELGADO, H. 2001. Evaluación de Sistemas Agropastoriles en la Altillanura de la Orinoquia Colombiana. Sistema Agropastoriles en Sabanas Tropicales de América Latina. Cali. Colombia. CIAT. EMBRAPA. Cap. 18, Parte 4, pag. 284.

VAN WAMBEKEE, A. 1974. Propiedades que influyen en el manejo de los Oxisoles en ecosistemas de sabana, 371-379. In: E. Bornemiza y A. Alvarado, North Carolina State university at Raleigh, N.C.

VAN ES, H.; C. VAN ES & D. CASSEL. 1989. Application of regionalized variable theory to large-plot field experiments. Soil Science Society of American Journal, Madison. 53:1179-1183.

VERONESE, JUNIOR.; CARVAHO, M.; DAFONTE, J.; FREDDI, O.; VIDAL, E.; INGARAMO, O. 2006. Spatial variability of soil water content and Mechanical Resistance of Brazilian Ferralsol. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.85, n.1-2, p.166_167.

VIEIRA, S.R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1:1-54.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILEEL, D. Applications of soil physics. New York: Academic Press, p. 319 -44.

WITTERY, D.J.; MALLARINO, A.P. 2004. Comparison of uniform and variable rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Am. Soc. Agron. J. 96, 26–33.

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. 1999. Comparison of Uniform and Variable Rate Fertilizer Application using a Variable Rate Liquid Applicator. ASAE, No. 99-1145, ASAE, St. Joseph, MI.

Determinación de zonas de manejo agrícola basadas en el rendimiento de maíz y su relación con atributos edáficos en la altillanura plana

YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. 2001. Comparison of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus fertilizer application for grain sorghum. Trans. ASAE 44 (2), 201–209.