

Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo *Fluventic Ustropepts* en la cuenca baja del río Las Ceibas - Huila

Spatial variability of the physical properties of *Fluventic Ustropepts* soil in the lower basin of the Las Ceibas River - Huila

Rocío del Pilar Vargas S.^[1], Fernando Serrato C.^[2] y Armando Torrente T.^[3]

Resumen

Se estudió la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas del suelo asociadas a cultivos de caña, pasto y moringa en un “*Fluventic Ustropepts*” de la Cuenca baja del Río Las Ceibas. Se hizo muestreo con grilla de 50 m x 50 m en 26 puntos para los análisis físicos, 8 pruebas de infiltración en muestreo aleatorio simple y 3 muestras integradas para análisis químicos en un área de 6.5 ha. El estudio consta de 5 etapas: 1) recolección de muestras y análisis de las propiedades físicas y químicas del suelo, 2) análisis estadístico y descriptivo de las variables usando los software Statgraphic Centurión XVIII y Excel 2010, 3) análisis geoestadístico basado en la interpolación por el método Kriging con software GS+10, 4) análisis multivariado de las componentes principales generando un gráfico bidimensional (biplot) con InfoStat y 5) elaboración de mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo por medio de software Surfer 10 para la implementación del plan de cultivos y los mapas de uso del suelo, por medio de los software ArcGis 10. La infiltración del suelo resultó extremadamente heterogénea con un coeficiente de variación del 74,5% y dependencia moderada con rango de alcance de 610,9 m. Se delimitaron tres sectores para los cultivos mencionados, basados en los análisis del suelo según el uso potencial del suelo.

Palabras clave: Variabilidad espacial del suelo; propiedades físicas del suelo; uso del suelo.

Abstract

We studied the spatial variability of physical soil properties associated to sugar cane, grass and moringa crops in “*Fluventic Ustropepts*” soil of the lower basin of the Las Ceibas River. We used a 50m x 50m sampling grid in 26 points for the physical analysis, 8 infiltration tests using simple random sampling, and 3 integrated samples for chemical analysis in an area of 6.5 ha. The study was undertaken in five stages: 1) sample collection and analysis of the soil’s physical and chemical properties; 2) statistical and descriptive analysis of the

[1] Ingeniera Agrícola. Universidad Surcolombiana- Neiva. Av. Pastrana Cra 1ª. rociovargassilva@gmail.com

[2] Ingeniero Agrícola. Universidad Surcolombiana- Neiva. Av. Pastrana Cra 1ª. ferchoserrato3@hotmail.com

[3] Ph.D. Ciencias Agropecuarias, Docente Universidad Surcolombiana-Neiva. Av. Pastrana Cra 1ª. armando.torrente@gmail.com

variables using Statgraphic Centurión XVIII software and Excel 2010; 3) geostatistical analysis based on Kriging interpolation using GS+10 software; 4) multivariate analysis of the main components leading to a bidimensional graph (biplot) using InfoStat; and 5) elaboration of spatial variability maps of the physical properties of soil using Surfer 10 software for the implementation of crop planning and soil mapping using ArcGis 10 software. Soil infiltration was extremely homogeneous with a 74.5% coefficient of variation of and moderate dependence with a working range of 610.9 m. Three sectors were determined for the aforementioned crops based on the soil analysis for potential soil use.

Key words: *spatial variation in soil, physical properties of soil, soil use.*

1. Introducción

A inicios de la década del 90, inició el desarrollo de tecnologías de variabilidad espacial y temporal del suelo asociada con los aspectos de la producción agrícola, para mejorar los rendimientos y preservar la calidad ambiental. La variabilidad debe conocerse y ser de suficiente magnitud para que un manejo diferenciado por sitio resulte en un beneficio frente al manejo uniforme. Lozano *et al.* 2004, demostraron que aun a nivel de pequeñas parcelas experimentales, la variabilidad puede ser significativa. La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando es sometido a uso. Aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad. Además se ha comprobado que la variación en las propiedades del suelo puede deberse a diferencias regionales, como son clima, topografía y material parental (Mulla *et al.*, 2002).

Las variaciones espaciales del suelo se pueden estudiar a través de técnicas geoestadísticas que permitirán elaborar mapas y así delimitar áreas de manejo diferencial. “Los suelos son cuerpos variables aún en cortas distancias, esta variabilidad es producto de las interacciones entre factores y procesos formadores de suelos” (Andriotti, 2010). Se ha estudiado la variabilidad de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan la productividad de los cultivos, reportándose asociaciones entre ellas y el rendimiento, aunque dichas asociaciones dependen del rango de variación del parámetro y del rango en que éste afecta al rendimiento, lo que permite medir y manejar la variabilidad espacial para aumentar la eficiencia productiva y disminuir el impacto ambiental.

Las propiedades físicas deben ser entendidas en conjunto y formando un todo armónico ya que entre ellas

se establece una íntima relación. Estas propiedades de acuerdo a su determinación y con sus fenómenos relacionados, pueden ser divididas en dos grupos: físicas fundamentales que corresponden al color, la textura, estructura, la consistencia, la densidad y la temperatura, y físicas derivadas como la porosidad, la capacidad de aire, la capacidad de agua, la compactación y la profundidad efectiva radical (Torrente, 2013). Desde el punto de vista de su naturaleza, los atributos del suelo han sido agrupados en dos grandes categorías: variables estáticas y variables dinámicas. En física de suelos estos grupos han sido ampliamente estudiados (Ovalles, 2001) y se ha establecido que las variables estáticas tienen características que están influenciadas principalmente por la rígida matriz del suelo; con base en sus características se agrupan en propiedades estructurales, tales como la porosidad y la densidad aparente.

Los suelos del área de estudio presentan deficiencias en la mayoría de las características evaluadas, lo que hace que su explotación sea difícil y costosa. Las limitaciones más notorias son la deficiencia de nutrientes y la compactación del suelo. Se desea implementar los cultivos de caña, pastos y moringa para alimentación de ganado bajo un manejo adecuado de suelos, buscando indicadores para establecer las soluciones frente al déficit de nutrientes y los problemas de compactación del suelo, siendo importante la adopción de prácticas agrícolas sostenibles con aplicación de abonos orgánicos preferencialmente, ya que con ellos se pretende mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

Para implementar los cultivos de caña, pastos y moringa es necesario adaptar un plan de manejo ambiental basado en mapas de variabilidad espacial del suelo teniendo en cuenta zonas específicas de deficiencias, aplicando las enmiendas y prácticas necesarias para el mejoramiento de las condiciones del medio donde se desarrollará el cultivo. Lo anterior, se hace con miras

a un buen desarrollo, crecimiento y productividad del cultivo desde el punto de vista sostenible, con un uso racional del suelo, el agua y el medio ambiente teniendo en cuenta que el plan de manejo ambiental debe ser a largo plazo y disponible a ajustes de acuerdo a las necesidades de los cultivos. En la presente investigación se pretende orientar la implementación, basados en el diagnóstico físico-químico del suelo, buscando la optimización de los cultivos apoyados en modelos geoestadísticos, con el fin de mejorar las prácticas de manejo del suelo.

2. Metodología

2.1 Localización

La finca Marandua-Venadito se localiza sobre una planicie fluvial a 530 m de altitud en el corregimiento de Fortalecillas del municipio de Neiva-Huila, sobre la margen derecha del río Las Ceibas, con temperatura media de 28°C, precipitación anual de 1350 mm y zona de vida bosque seco tropical según Holdridge en una extensión de 6.5 ha dedicadas esencialmente a potreros para ganadería bajo siembra de pastos. El área se ubica sobre una vega fluvial con acumulación de arenas de diverso tamaño y depósitos minerales diferenciales menos gruesos en profundidad en un horizonte superficial fuertemente compactado con dominio de texturas franco arenoso y arenoso franco (figura 1).

2.2 Metodología en campo y laboratorio

Se trazó una grilla de 50 m x 50 m sobre el mapa base del área, georeferenciando una red de puntos en campo con un receptor Garmin GPSmap-62sc e identificados mediante estacas. Se seleccionaron en total 26 puntos de muestreo físico del suelo 8 puntos para infiltración en un muestreo aleatorio simple. Se analizaron las propiedades físicas del suelo (textura, retención de humedad, densidad real, densidad aparente y porosidad), también se practicó muestreo representativo para la obtención de tres análisis químico del suelo siendo realizadas las pruebas en el Laboratorio de suelos - LABGAA de la Universidad Surcolombiana (tabla 1).

2.3 Análisis estadístico

Se hizo un análisis exploratorio de datos mediante el software Statgraphics Centurion XVI-II en el estudio de variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo basados en la red de puntos seleccionados al azar y así determinar su distribución. Se aplicó el software InfoStat versión estudiantil para el análisis multivariado y determinar las variables explicativas de los componentes principales del suelo y se realizó luego el análisis geoestadístico con el software Gs+10 for Windows, para determinar la relación y dependencia de las variables estudiadas espacialmente, ajustando los modelos geoestadísticos en los semivariogramas que representan la mayor eficiencia de los datos observados en campo.

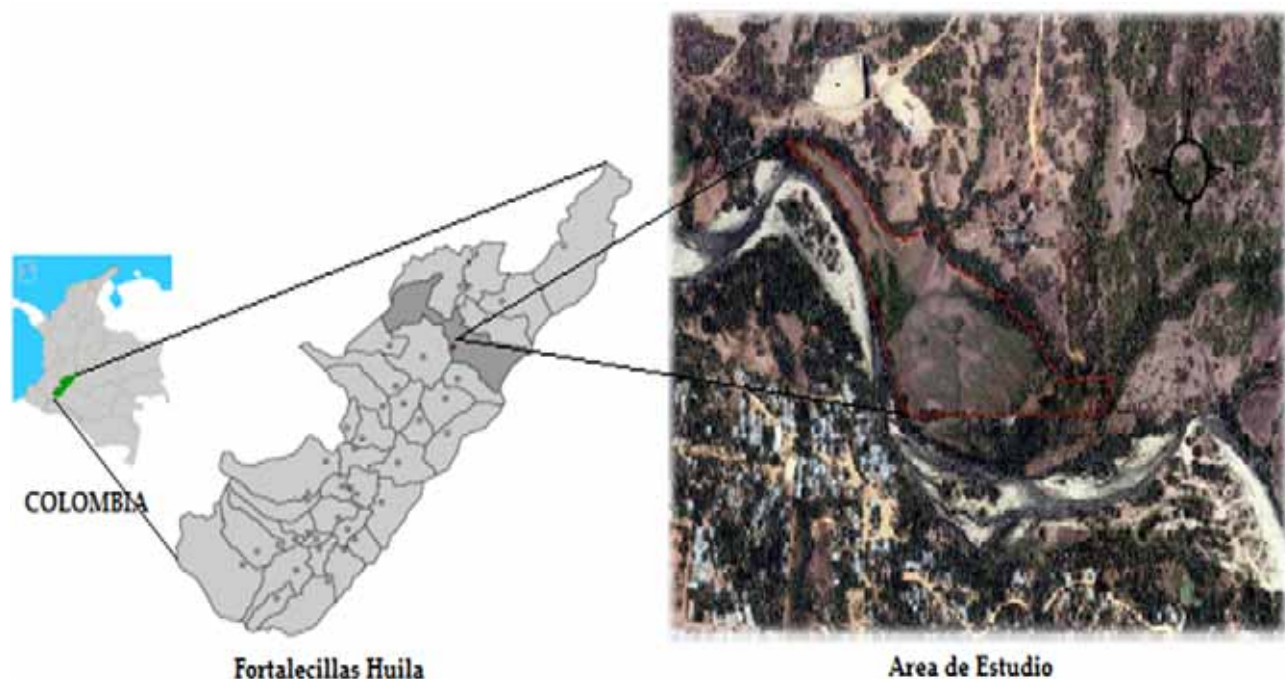


Figura 1. Localización del área de estudio en el departamento del Huila

Tabla 1. Métodos en las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados.

Propiedades físicas			Propiedades químicas		
Parámetro	Método	Tamaño muestra	Parámetro	Método	Tamaño muestra
Textura	Bouyoucos	30 ⁽¹⁾	pH	Potenciométrico	3
Humedad a 0.3 bar	Membranas de Richard	30 ⁽¹⁾	C	Walkley and Black	3
Humedad a 15 bar	Membranas de Richard	30 ⁽¹⁾	CIC	NH ₄ OAc, pH 7,1 N	3
Densidad aparente	Terrón parafinado	30 ⁽¹⁾	Fe, Mn, Cu, Zn	Doble ácido AA	3
Densidad real	Picnómetro	30 ⁽¹⁾	S	Turbidimetría	3
Porosidad	Relación de densidades	30 ⁽¹⁾	B	Agua Caliente	3
Ks	Pozo barrenado inverso	26	K, Ca, Mg, Na	Absorción atómica	3
Infiltración ⁽²⁾	Anillos concéntricos	8	P	Bray II	3

Ks Conductividad hidráulica saturada.

⁽¹⁾Incluye 4 muestras tomadas en calicata ⁽²⁾ Modelo de Kostiakov.

Metodología analítica en propiedades físicas y químicas del suelo: IGAC, 2006.


3. Resultados y discusión

3.1 Descripción del Suelo

El suelo posee un perfil diagnóstico caracterizado por horizonte superficial Ócrico y horizonte subsuperficial Cámbico con régimen de humedad Ustico y régimen de temperatura Isohipertérmico, siendo clasificado

según USDA 2006 como *Fluventic Ustropepts*, localizado en posición de vega sobre relieve plano en la subcuenca baja del Río Las Ceibas a una distancia de 100 m del cauce natural (tabla 2). La compactación del suelo es debida a los antecedentes asociados a prácticas de manejo tradicional en cultivo de arroz mecanizado y posteriormente a la introducción de ganadería bajo pastoreo, siendo este último el uso actual.

Tabla 2. Caracterización de las propiedades físicas del perfil de suelo.

Localización	Finca Marandúa - Cuenca baja del Río las Ceibas, municipio de Neiva					
Taxonomía	Fluventic Ustropepts			Fecha 31 - 03 - 2014		
Perfil	Horizonte	Prof. (cm)	pH	g.cm ⁻³		Textura
				Da	Dr	
	A _p	0-25	6.3	1,88	2,50	AF
	B _w	25-65	5.8	1,75	2,33	AF
	C ₁	65-110	6.0	1,54	2,86	AF
	C ₂	110-160	6.0	1,74	2,86	FA

Da: densidad aparente, Dr: densidad real, AF: arenoso franco, FA franco arenoso

3.2 Propiedades físicas del Suelo

La infiltración básica varió de moderadamente lenta a moderada (0,23 - 3,87 cm/h) teniendo dominancia la infiltración moderadamente lenta, así mismo la conductividad hidráulica saturada del suelo resultó entre moderadamente lenta y moderada (1,22 y 1,99 m/día), siendo afectada estas propiedades hidrodinámicas por la compactación en los primeros 25 cm de profundidad del suelo (tablas 3).

Las propiedades físicas del suelo mediante el análisis univariado se clasificaron considerando el coeficiente de variación estadístico (CV) en 4 categorías definidas por Vásquez 2009, así (tabla 4).

Da es la densidad aparente, Dr es la densidad real, h es la porosidad total, Ks es la conductividad hidráulica saturada, CC es la humedad gravimétrica a la capacidad de campo, PMP es la humedad gravimétrica al punto de marchitez permanente, A es arena, Ar es arcilla, L es limo, I es la infiltración del suelo.

La densidad aparente del suelo varió ampliamente entre 1,27 y 2,0 g/cm³, siendo afectada por procesos

de compactación debido a los antecedentes de mecanización en el monocultivo de arroz y el pastoreo durante los últimos años. La densidad real corresponde a suelos minerales con bajos contenidos de materia orgánica.

El suelo es de textura arenoso franco a franco arenoso con inclusiones localizadas de textura arenosa, siendo la arena, la fracción mineral dominante cuya variación está entre 74,28 y 88,06%, teniendo en correspondencia tendencia a la baja porosidad, esto explica la baja infiltración y escasa capacidad de retención de humedad en el suelo (Burbano, 2010). La disponibilidad del agua en el suelo varió ampliamente con muy baja capacidad de retención de agua en la mayoría de los sitios con valores entre 8-15%, requiriendo altas frecuencias de riego para el mantenimiento de los contenidos de humedad adecuados en el suelo para el desarrollo normal de los cultivos (tabla 5).

Obsérvese la alta variabilidad de la infiltración del suelo relacionada con la clase textural arenosa (CV = 4.23) y su afectación por los problemas de compactación, así mismo la densidad aparente y la porosidad total del suelo muestran los efectos anotados como

Tabla 3. Clasificación de la infiltración del suelo.

Función infiltración acumulada I (cm), t (min)	T _b (min)	I _b (cm/h)	Clase	Coordenadas planas (m)		
				Este	Norte	
1	$I = 5.36(t^{0.349})$	390.18	0.23	Lenta	870326.589	818210.154
2	$I = 2.42(t^{0.780})$	131.88	3.87	Moderada	870333.224	818136.430
3	$I = 1.84(t^{0.608})$	234.84	0.79	Moderada lenta	870208.698	818149.833
4	$I = 1.19(t^{0.762})$	142.56	1.67	Moderada lenta	870474.861	818108.105
5	$I = 2.07(t^{0.683})$	190.02	1.61	Moderada lenta	870237.711	818247.131
6	$I = 2.19(t^{0.490})$	305.58	0.34	Lenta	870139.911	818297.003
7	$I = 3.16(t^{0.068})$	188.34	2.51	Moderada	870065.477	818361.230
8	$I = 2.86(t^{0.663})$	202.14	1.90	Moderada lenta	869992.137	818407.759

I: es la infiltración acumulada, T_b: es el tiempo básico, I_b: es la infiltración básica del suelo

Tabla 4. Clasificación de las variables físicas del suelo según el coeficiente de variación CV.

CV%	Clasificación de las variables	VARIABLES físicas del suelo
< 20	Relativamente homogéneas	Da, Dr, A, Ar, Ks
20 - 40	Moderadamente homogéneas	PMP, L
40 - 60	Normalmente heterogéneas	CC, η
> 60	Extremadamente heterogéneas	I

Tabla 5. Resumen estadístico de las propiedades físicas del suelo.

Variable	\bar{X}	Me	S ²	S	% CV	Min	Max	Rango	Sesgo	Curtosis
D _a	1,83	1,81	0,08	0,29	15,90	1,27	2,00	1,02	0,13	-1,04
D _r	2,56	2,82	0,14	0,37	14,42	2,12	2,86	1,04	-1,67	-0,83
CC	12,89	11,69	28,83	5,37	41,66	5,10	28,98	23,88	2,34	1,80
PMP	4,68	4,68	1,26	1,12	23,99	1,67	6,62	4,95	-0,78	0,87
A	80,58	80,82	11,63	3,41	4,23	74,28	88,06	13,78	0,25	-0,24
L	9,51	9,89	3,96	1,99	20,91	5,34	13,08	7,74	-0,42	-0,58
Ar	9,91	9,05	3,85	1,96	19,80	6,60	13,13	6,53	0,45	-1,04
Ks	1,60	1,63	0,06	0,24	14,88	1,22	1,99	0,77	-0,22	-1,11
η	27,72	23,43	204,84	14,31	51,63	1,72	51,48	49,76	-0,09	-1,21
I	1,62	1,64	1,46	1,21	74,55	0,23	3,88	3,65	0,88	0,29

X: Media, Me Mediana, S²: Varianza, S Desviación estándar, CV: coeficiente de variación, Min: Mínimo, Max: Máximo, D_a: Densidad aparente, D_r densidad real, CC: capacidad de campo y PMP: punto de marchitez permanente, A: arena, L: limo, Ar: arcilla, conductividad hidráulica saturada (m/día), η: porosidad total, I: infiltración (cm/h).

consecuencia del manejo antecedente del suelo. La conductividad hidráulica saturada resultó con ligera variabilidad a diferencia de otros estudios (Torrente 2003, Giraldo y Mendoza 2003, Gutiérrez y Castaño, 2013), que demuestran que esta propiedad hidrodinámica es la que presenta el mayor rango de variación, con coeficientes que llegan a superar el 100%.

3.3 Propiedades químicas del suelo.

Se realizó el muestreo de suelos en tres sectores del área de estudio para el análisis de fertilidad mostrando que los suelos son ligeramente ácidos con muy bajos contenidos de materia orgánica, baja capacidad de intercambio catiónico, alta saturación de bases, bajos contenido de fósforo y azufre con deficiencias en cobre y cinc. Para el plan de cultivos que se desea implementar debe de considerarse la aplicación de abonos orgánicos minerales con el fin de suplir las deficiencias nutricionales y mejorar las características físicas relacionadas con retención de agua y nutrientes para las plantas (tabla 6).

3.4 Modelos de semivariogramas.

Los modelos de los semivariogramas seleccionados corresponden a los de mayor ajuste espacial que explican la distribución de la variable física evaluada. Se observa en la tabla 7, que los semivariogramas con el modelo lineal representan las variables separados del suelo (arena, limo y arcilla), así mismo el coeficiente de punto de marchitez permanente, la porosidad total

e infiltración se ajustan al modelo exponencial. Por otro lado, las variables coeficiente de capacidad de campo, densidad aparente y la conductividad hidráulica se ajustan a modelos esféricos.

La dependencia espacial se analizó por medio del efecto Nugget relativo [%C₀/(C₀+C)], clasificación según Cambardella *et al.* 1994, citado por Trujillo 2011, resultando fuerte dependencia para las variables densidad aparente (D_a), densidad real (D_r), capacidad de campo (CC), porosidad y conductividad hidráulica saturada del suelo (< 25%), mientras que punto de marchitez permanente e infiltración tienen una dependencia moderada (25-75%) y débil dependencia espacial (> 75%) para arena, limo y arcilla. La variable física con mayor alcance de dependencia espacial (A₀) fue la infiltración con 610,9 m y la de menor dependencia fue la porosidad total del suelo con 30.5 m, lo que significa que el muestreo de suelos para la variable infiltración del suelo correlaciona a distancias mayores respecto a las otras variables evaluadas (tabla 6).

El coeficiente de Pearson permitió analizar la relación entre las distintas variables físicas del suelo, resultado una relación proporcional directa para las variables de capacidad de campo (CC) y arcilla (0,51), densidad real y porosidad total (0,65); mientras que relación inversa para las variables densidad aparente y porosidad (-0,70), capacidad de campo (CC) y arena (-0,55), arena y limo (-0,87), arena y arcilla (-0,86) (tabla 8).

Tabla 6. Propiedades químicas del suelo en tres sectores del área.

Parámetros químicos	Unidad	Sector 1 Pasto Tanzania	Sector 2 Moringa	Sector 3 Caña	Método
pH	-	6.3	6.2	6.3	NTC 5264
Carbono Orgánico (CO)	%	0.61	0.70	0.58	NTC 5403 método B
C.I.C.	cmol ⁺ .kg ⁻¹	16.1	11.3	12.9	NTC 5268
Fósforo (P)	ppm	40.2	6.44	12.8	NTC 5350
Calcio (Ca)	cmol ⁺ .kg ⁻¹	12.76	7.91	9.00	NTC 5349
Magnesio (Mg)	cmol ⁺ .kg ⁻¹	3.67	2.26	2.73	
Sodio (Na)	cmol ⁺ .kg ⁻¹	0.33	0.25	0.33	
Potasio (K)	cmol ⁺ .kg ⁻¹	0.32	0.21	0.19	
Bases Totales (BT)	cmol ⁺ .kg ⁻¹	17.1	10.6	12.3	Suma cationes
Saturación de bases (SB)	%	>100	94.1	94.9	Relación catiónica
Azufre (S)	ppm	4.47	3.26	3.25	NTC 5402
Hierro (Fe)	ppm	86.8	84.4	88.6	NTC 5526 método DTPA
Manganeso (Mn)	ppm	27.6	31.6	29.5	
Cobre (Cu)	ppm	2.11	1.67	1.71	
Cinc (Zn)	ppm	1.37	0.89	0.86	
Boro (B)	ppm	0.20	0.20	0.31	H ₂ O Caliente
Acidez intercambiable	cmol ⁺ .kg ⁻¹	-	-	-	NTC 5263
Relación Ca/Mg	-	3.48	3.50	3.30	Relación catiónica
Relación (Ca + Mg)/K	-	51.34	48.4	61.7	
Relación Mg/K	-	11.5	10.8	14.4	
Textura	Clase	FA	FA	FA	Organoléptico

Tabla 7. Parámetros de los semivariogramas para las propiedades físicas del suelo.

Variable	Modelo	Nuguet (Co)	Sill (Co+C)	%Co/ (Co+C)	Rango (Ao)	R ²	Dependencia
Da	Esférico	0.002	0.087	3.09	105.4	0.756	Fuerte
Dr	Gaussiano	0.100	0.452	22.12	185.0	0.761	Fuerte
CC	Esférico	30.370	247.2	12.28	88.6	0.188	Fuerte
η	Exponencial	24.00	216.9	11.06	30.5	0.132	Fuerte
Ks	Esférico	0.005	0.062	9.13	93.4	0.251	Fuerte
PMP	Exponencial	0.457	1.726	26.47	121.9	0.926	Moderada
I	Exponencial	1.127	3.505	32.15	610.9	0.427	Moderada
A	Lineal	11.464	11.464	100	258.7	0.472	Débil
L	Lineal	3.926	3.926	100	258.7	0.940	Débil
Ar	Lineal	0.039	0.039	100	258.7	0.841	Débil

Da: densidad aparente, Dr: densidad real, CC: capacidad de campo, η porosidad total, Ks: conductividad hidráulica saturada, PMP: punto de marchitez permanente, I: infiltración básica, A: arena, L: limo, Ar: arcilla.

3.5 Análisis Multivariado

cial del suelo desde sus componentes principales en virtud de una serie de variables explicativas halladas por medio del análisis multivariado a partir de las propiedades físicas del suelo. Se establecieron los valores

de los autovectores de ponderación (e1, e2 y e3) con valor absoluto alrededor del 45% y un coeficiente de correlación de componentes principales (CP1, CP2 y CP3) mayor a 60%. El contenido de arena (A), la densidad aparente (Da) y la densidad real (Dr) son las variables más explicativas de los componentes 1, 2 y 3

Tabla 8. Coeficiente de correlación - Pearson de las propiedades físicas del suelo.

Variable	Da	Dr	CC	PMP	A	L	Ar	η	Ks
Da	1.00								
Dr	0.07	1.00							
CC	-0.08	-0.25	1.00						
PMP	0.14	0.06	-0.15	1.00					
A	-0.20	-0.04	-0.55	-0.32	1.00				
L	0.02	0.03	0.44	0.38	-0.87	1.00			
Ar	0.34	0.05	0.51	0.17	-0.86	0.49	1.00		
η	-0.70	0.65	-0.11	-0.10	0.14	-0.01	-0.24	1.00	
Ks	-0.22	0.03	0.04	-0.26	0.04	-0.23	0.16	0.18	1.00

pa: densidad aparente, pr: densidad real, CC: Capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente, A: arena, L: limo, Ar: arcilla, η : porosidad total, Ks: conductividad hidráulica saturada.

respectivamente, explicando así el 73% de la variación de las propiedades físicas del suelo evaluadas.

El análisis estadístico a través del diagrama biplot es apreciable la relación directa entre la densidad real (Dr) y la porosidad total (h) y entre la humedad a capacidad de campo (CC) y el agua aprovechable (AA) del suelo, también es evidente la escasa correlación entre la densidad real (Dr) y los contenidos de arena (A) y limo (L) en el suelo; los componentes principales 2 y 3 representan el 20.5 y 18.2% de la variabilidad respectivamente, lo que confirma una correlación alta entre las variables inicialmente citadas.

3.6 Variabilidad espacial del suelo

Textura y densidad del suelo. En general el porcentaje de arena en el suelo es alto (74,28 - 88,06%), con valores muy bajos de otros separados minerales

restantes como son arcilla (6,6 - 13,13%) y limo (5,34 - 13,08%), intensificándose la arena hacia el norte del área (84 - 88%) siendo baja la capacidad de retención de humedad y disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas (Torrente, 2010). La densidad real del suelo varió entre 2,45 y 2,89 gr/cm³, mientras la densidad aparente con valores altos incrementó desde el noroeste hacia el sureste del área. Los altos valores de densidad aparente son consecuencia del uso, con incremento de la compactación que afecta en general las propiedades físicas del suelo (figura 2).

Agua disponible y porosidad total. El agua disponible presentó niveles muy bajos (1,67 - 6,62%), ajustados al grupo textural del suelo (Figura 3a). La porosidad total resultó muy baja a media (1,72 a 40%) distribuidos en el 84,6% del área, la porosidad media se localiza en la zona central con disminución hacia los extremos (Figura 3b).

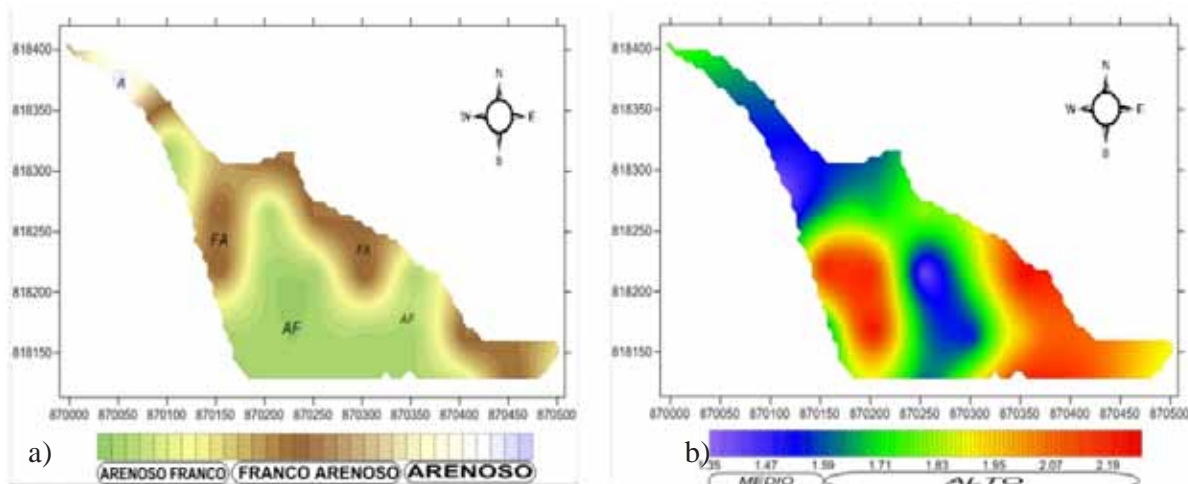


Figura 2. a) Mapa textural del suelo. b) Mapa de la densidad aparente.

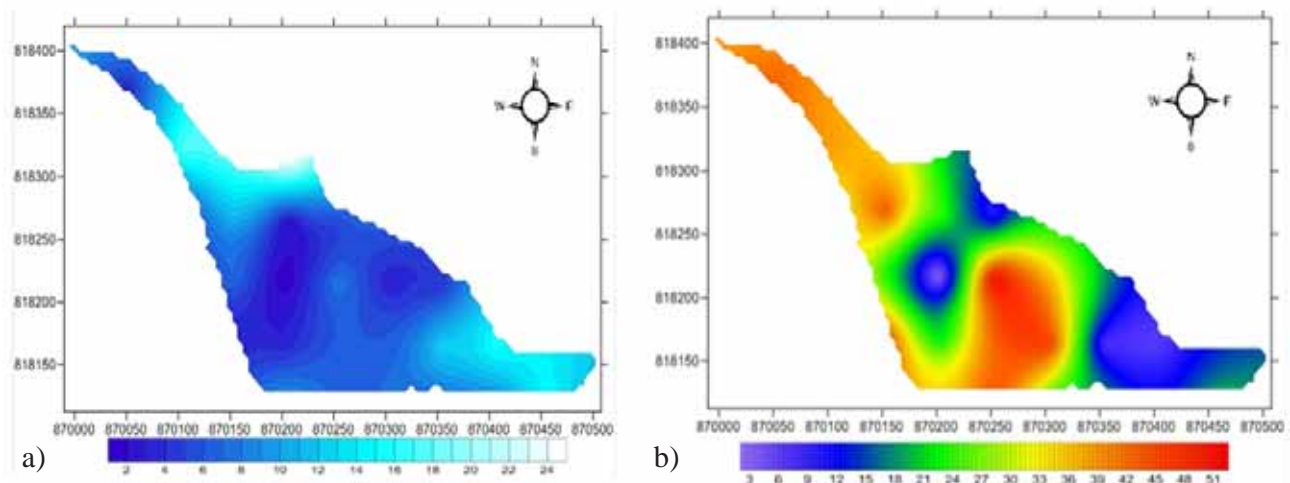


Figura 3. a) Mapa de agua disponible en el suelo. b) Mapa de Porosidad total del suelo.

Infiltración y conductividad hidráulica. La infiltración del agua en el suelo varió de lenta a moderada (0,22 – 3,88 cm/h (Figura 4a) y la conductividad hidráulica del suelo varió de moderadamente lenta a moderada e igualmente está afectada por los procesos de compactación debido a los antecedentes de mecanización y pisoteo de ganado. La conductividad hidráulica incrementa desde el sureste hasta el noroeste, localizándose en este último sector los mayores valores (Figura 4b).

(5,82 ha) y otro sector con pastos de corte (0,68 ha) (Figura 5b).

Uso Potencial. Se consideraron los atributos químicos y físicos del suelo y las necesidades nutricionales de los cultivos a implementar (Figura 5a); por lo tanto se decidió establecer en la zona noroeste (2,23 ha) el cultivo de moringa, pues esta franja cuenta con niveles óptimos de fósforo y magnesio, elementos que junto al azufre participan activamente en la síntesis de aceites en plantas oleaginosas entre otras. Sin embargo “la mayor parte del P en la solución de suelo no es aprovechable por las plantas debido a su gran insolubilidad, por lo cual los cultivos responden positivamente a las aplicaciones de este elemento” (Navarro y García 2003).

3.7 Mapas de uso del suelo

Uso actual. El área esta sectorizada en dos usos actuales, un sector dedicado a pastoreo libre del ganado

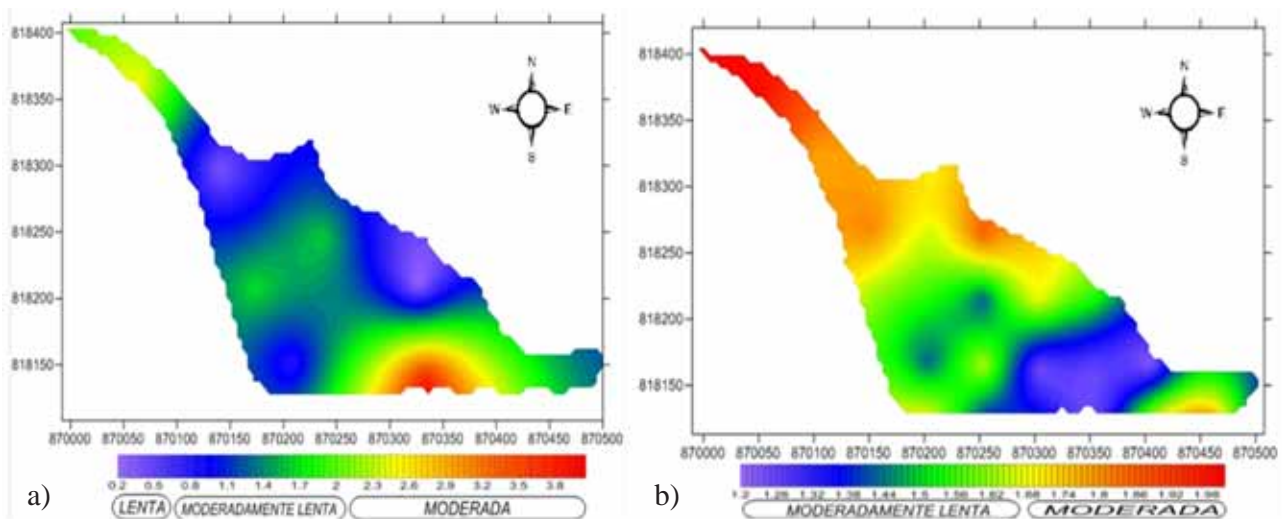


Figura 4. a) Mapa de infiltración y b) mapa de conductividad hidráulica saturada del suelo

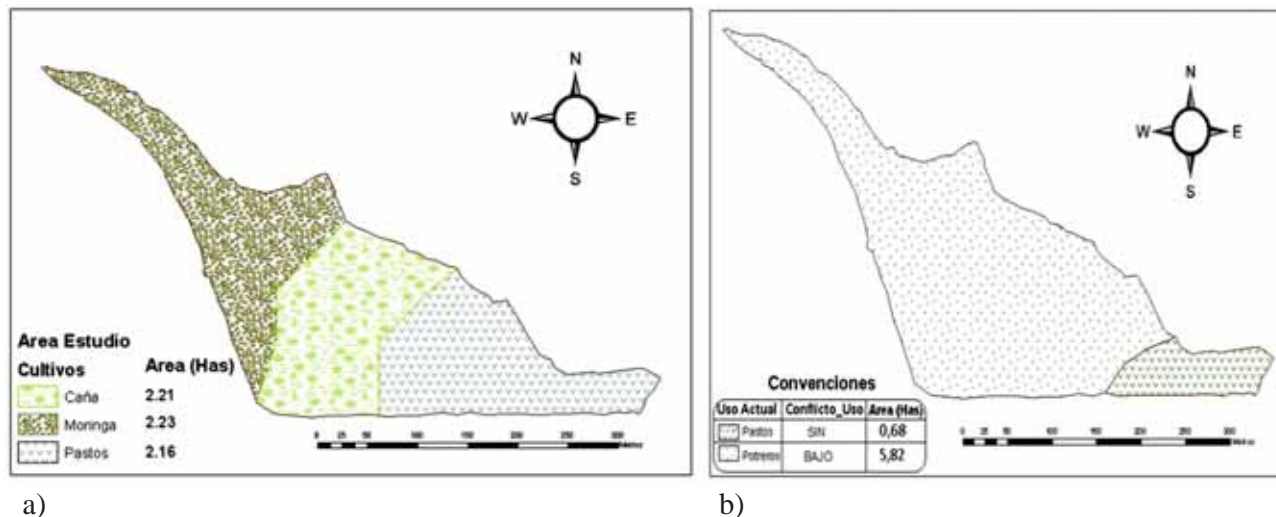


Figura 5. a) Mapa de Uso potencial del suelo. b) Mapa de Uso actual y conflicto de uso del suelo.

Con base en las características físicas y químicas del suelo, el sureste del área (2,16 ha) es adecuado para pastos y en la actualidad se dedica a éste cultivo, mostrando rendimiento aceptable. Se requiere la aplicación de abonos orgánico-minerales para suplir las deficiencias nutricionales que favorezcan el desarrollo y los rendimientos del cultivo; es de resaltar que el pH del suelo es adecuado, ya que es cercano a la neutralidad. El cultivo de caña se recomienda implementar en la parte central del área (2.21 ha), la cual presenta déficits de fósforo (> 10 ppm) y de potasio (< 0.2 cmol/kg), elementos a suplementar a través del plan de fertilización orgánico-mineral a sugerir por el ingeniero agrónomo (Figura 5b).

Conflicto de uso. El conflicto de uso se califica medio, ya que se cambia de potrero a cultivo, lo que no implica un cambio radical en el uso del suelo (Figura 5b).

4. Conclusiones

El análisis geoestadístico permitió conocer la variación de las propiedades físicas del suelo siendo la infiltración, la variable con mayor heterogeneidad con un coeficiente de variación de 54,5%, mientras que la porosidad total y la capacidad de campo son variables normalmente heterogéneas.

La variable con mayor dependencia espacial fue la infiltración básica del suelo con 610,9 m mientras que

la de menor dependencia espacial fue la porosidad total con 30,5 m.

El suelo *Fluventic Ustropepts* posee densidad aparente alta con valores superiores a 1,6 g.cm⁻³, como consecuencia de antecedentes de uso y manejo del suelo asociado a la compactación de horizontes arenosos.

Las propiedades físicas del suelo directamente proporcionales son: porosidad total y densidad real, contenido de arcilla y humedad a la capacidad de campo.

Se determinó un conflicto medio del suelo en un 87% del área, cambiando de potreros a cultivos de moringa, caña y pastos.

5. Referencias bibliográficas

1. Andriotti, J.L.S. 2010. Fundamentos de Estadística e Geoestadística. São Leopoldo: Editora Unisinos. 165 p.
2. Burbano, H. 2010. Ciencia del Suelo. Principios Básicos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
3. Giraldo, S. y A. M. Mendoza. 2003. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los lotes experimentales destinados al cultivo de hortalizas en Ceunp. Universidad del Valle, Facultad

- de Ingeniería, Santiago de Cali, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería, Palmira. 112 p.
4. Gutiérrez, J.; I. Castaño. 2013. Variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo con fines agropecuarios en la Finca La Primavera – Las Delicias municipio de Teruel, Huila. Tesis de grado, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana. Neiva, Huila. 100 p.
 5. IGAC, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2006. Métodos analíticos de laboratorio de suelos. pp. 8-411.
 6. Lozano, Z., Bravo, C., Ovalles, F., Hernández, M., Moreno, B., Piñango, L. y Villanueva, J. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*, 16(1), 61-72.
 7. Mulla, D. Mcbratney, A. McBratney. 2002. "Soil Spatial Variability". A.Warrick. (editor). *Soil Physics Companion*. Ed. CRC Press. Boca Raton, US. pp. 343-373.
 8. Navarro, S., Ginés, B., García, N. 2003. *Química Agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida* 2ª edición. Madrid, España. pp. 233-246.
 9. Ovalles, F. Memorias del curso de Geostatística Aplicada a Estudios Ambientales con Énfasis en Suelos. Manizales: Universidad de Caldas 2001. 35 p.
 10. Torrente T., A. 2003. Características físicas e hidrodinámicas en suelos con alta saturación de magnesio en el Valle del Cauca. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Palmira, Valle del Cauca. 233 p.
 11. Torrente T., A. y Valenzuela, I. 2010. Física de Suelos. *Ciencia del Suelo Principios Básicos*. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, p. 65.
 12. Torrente T., A. 2013. *El Suelo - Propiedades Físicas*. Ed. Universidad Surcolombiana. Neiva. 95 p.
 13. Trujillo, O.E. 2011. Oferta edáfica en un suelo de la Asociación Zarzal (Za), bosque seco tropical - Valle del Cauca, bajo pastoreo de bovinos. Tesis Maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Valle del Cauca. 112 p.
 14. USDA, 2006. Claves para la Taxonomía de Suelos, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Décima Edición, 339 p.
 15. Vásquez, J. 2009. Caracterización de la Variabilidad Espacial de las Propiedades Físicas y Químicas en los Suelos del Centro Experimental de la Universidad del Magdalena. Santa Marta. 120 p.

