

Caracterización físico-química de los suelos dedicados al cultivo de maíz en el Valle del Sinú, Colombia

Physical-chemical characterization of corn cultivated soils in the Sinu Valley, Colombia

Jorge Cadena-Torres^{1*}; Rafael S. Novoa-Yáñez¹;
Liliana M. Grandett-Martínez¹; Jose L. Contreras-Santos¹; Alejandro Agamez-Saibis²

Recibido para publicación: marzo 11 de 2021 - Aceptado para publicación: junio 27 de 2021

RESUMEN

El Valle del Sinú es una subregión en donde se concentra la mayor área de siembra y producción de maíz en Colombia. En esta subregión los rendimientos del cultivo en los últimos años han presentado un estancamiento, a pesar de contar con tecnologías y condiciones agroecológicas aptas para su desarrollo y productividad. Se presume que el laboreo continuo de los suelos a través de los años, ha generado un alto grado de deterioro físico y químico de sus propiedades, por lo que la presente investigación se llevó a cabo con el objeto de realizar un diagnóstico de la fertilidad medida por algunas propiedades físico-químicas del suelo. Se realizó un muestreo en 80 predios, en donde continuamente se vienen sembrando cultivos de maíz, en rotación con algodón. Los resultados de las evaluaciones indicaron que desde el punto de vista químico en general los suelos presentan una fertilidad adecuada para el desarrollo y productividad del cultivo, sin embargo, se observó algún grado de deterioro de las propiedades físicas, evidenciado por características como la densidad aparente, la infiltración básica y la distribución de raíces en el perfil, condicionadas principalmente al tipo de labranza que se ha venido practicando. Lo anterior probablemente ha venido afectando el crecimiento de las raíces, la libre circulación de agua y gases, y la nutrición del cultivo de maíz. Se recomendó un estudio más detallado de la distribución de las raíces en el perfil del suelo a fin de proponer estrategias para su recuperación.

Palabras clave: Suelos; Diagnóstico; Degradación; Distribución de raíces.

¹Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia Centro de investigación Turipaná, Cereté, Córdoba, Colombia.

²Federación Nacional Cerealista-Fenalce, Cereté, Córdoba, Colombia.

*Autor para correspondencia: Ph.D. Jorge Cadena-Torres
Email: jcadena@agrosavia.co

ABSTRACT

The Sinu Valley is a subregion with the largest corn planting and production area in Colombia. Corn yield in recent years have presented a stagnation, despite having agri-ecological technologies and conditions suitable for cultivation. It is presumed that continuous soil tillage through the years has generated a high degree physical and chemical deterioration of soil characteristics. This research was carried out with the objective of diagnosing soil fertility based on some physicochemical properties. Sampling was carried out in 80 farms, where corn have been continuously planted, and rotated with cotton. The results indicated that from the chemical point of view, in general soils present an adequate fertility for crop development and productivity; however, some degree of deterioration on the physical characteristics was observed, and evidenced by variables such as apparent density, basic infiltration, and distribution of roots in the profile, mainly conditioned to the type of tillage that has been practiced. This has probably affected root growth, free water and gas circulation, and nutrition of corn crops. A more detailed study on root distribution in the soil profile was recommended to propose strategies for soil recovery.

Key words: Soils; Diagnosis; Degradation; Root distribution.

Cómo citar

Cadena-Torres, J., Novoa-Yáñez, R. S., Grandett-Martínez, L.M., Contreras-Santos, J.L., Agamez-Saibis, A. 2021. Caracterización físico-química de los suelos dedicados al cultivo de maíz en el Valle del Sinú, Colombia. *Temas Agrarios* 26(1): 68-79 <https://doi.org/10.21897/rtav26i1.2584>



INTRODUCCIÓN

El Valle del río Sinú es una subregión localizada en el norte de Colombia, conformada por suelos muy fértiles, formados a partir del arrastre y deposición de partículas finas debido a su origen fluvio-lacustre (IGAC, 2009), que desde el punto de vista productivo ha sido considerado adecuado para la producción de cultivos. Las tierras están conformadas por planicies aluviales, sujetas a inundaciones periódicas, de relieve plano a planocóncavo, con pendientes hasta del 3%. El material de formación del suelo es de origen sedimentario y aluvial, con tamaños de los sedimentos finos a medios, con poca evolución y drenaje imperfecto.

Los cultivos de mayor importancia en la subregión son el maíz, algodón y arroz, con alto uso de tecnología para la siembra y manejo del cultivo, aunque se presentan también otros cultivos tradicionales como el maíz no tecnificado, arroz secano, plátano, papaya, yuca, ñame y hortalizas en diferentes arreglos. La producción tecnificada de maíz se ubica en la cuenca media y baja del Valle del Sinú, practicada por agricultores pequeños, medianos y grandes. El sistema utilizado es la rotación maíz-algodón, en donde el maíz se siembra en el en el primer semestre del año, y el algodón en el segundo.

La precipitación en el área de estudio es unimodal, con una temporada de lluvias que inicia en el mes de abril y se prolonga hasta el mes de noviembre, con rango de precipitación entre 90 a 194 mm mes⁻¹. Los meses lluviosos se extienden desde mayo hasta octubre, presentando más de 10 días con lluvia por mes. La temperatura promedio es de 28 °C (IGAC, 2009).

La siembra del maíz se realiza al inicio de la temporada de lluvias, en el mes de abril, y para su siembra se realiza un sistema de

preparación basado en el uso de rastras pesadas e implementos de discos, la cual se realiza a comienzos de año, en época seca. Por no disponer de tiempo suficiente, debido a la entrada en rigor de la temporada de lluvias, los agricultores en general, para la siembra de algodón no realizan ningún tipo de preparación, realizando la siembra sobre los residuos del cultivo de maíz, en un sistema al que denominan labranza mínima.

Reportes recientes de la Federación Nacional de Cerealistas (Fenalce, 2019) y las estadísticas gubernamentales para el sector (Agronet, 2019), indican que los rendimientos del cultivo de maíz en los últimos años han entrado en un proceso de estancamiento, inclusive con retrocesos en algunos años de entre el -5 y el -10%, fluctuando en promedio entre 4.5 y 5.5 ton ha⁻¹. El sistema productivo de maíz ha perdido su capacidad competitiva debido al aumento en los costos de producción, a pesar de la introducción de híbridos transgénicos de alta productividad y tolerancia a plagas. Algunos autores atribuyen este comportamiento a la disminución de la capacidad productiva de los suelos debido a la pérdida de la fertilidad natural (Combatt-Caballero, *et al.*, 2012) y al deterioro físico ocasionado por el uso continuado de implementos de disco para la preparación (Prieto *et al.*, 2010). En diversos reportes de la literatura se indican los efectos adversos de las prácticas agrícolas sobre la calidad y salud del suelo (Beretta-Blanco *et al.*, 2019; Funmilayo & Abenu, 2019).

Por lo anterior, la presente investigación se llevó a cabo con el objeto de identificar el estado actual de los suelos dedicados a los cultivos de maíz en el Valle del Sinú, con el fin de determinar el posible grado de deterioro y proponer posibles estrategias de manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización

La presente investigación se realizó en la subregión del Valle del Sinú en Colombia, específicamente en la cuenca media y baja del río Sinú, en donde anualmente se establecen alrededor de 32,000 hectáreas de maíz de tipo tecnificado. El cultivo de maíz en esta subregión se siembra con materiales híbridos, muchas veces transgénicos de alto rendimiento, en áreas que oscilan entre las 5 y 600 hectáreas, con alto uso de maquinaria y entrada de insumos de origen químico. El maíz se alterna con cultivos de algodón, sembrados en el segundo semestre del año.

Marco muestral

Para la conformación del marco muestral, se consultaron las bases de datos del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) y la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales (Fenalce), donde se registran e identifican los predios y agricultores que siembran anualmente el cultivo de maíz. En dichas bases de datos se identificaron un total de 3.650 predios que en los últimos cinco años habían registrado siembras de maíz en el Valle del Sinú, los cuales se encontraban distribuidos en ocho municipios, del departamento de Córdoba. Para el cálculo del número de predios a muestrear se utilizó la siguiente fórmula, recomendada para estudios de carácter exploratorio (Aguilar, 2005):

$$n = \frac{Z^2 N p q}{p q Z^2 + (N - 1) e^2}$$

En donde:

Z: Coeficiente para un nivel de confianza del 95% (1.96).

N=población total o número de predios con siembras de maíz en las cuencas baja y media del Valle del Sinú, es decir 3,650 predios.

e: Error máximo admisible, se asumió en 10.8%.

p: Proporción de predios que poseen pérdidas de la capacidad productiva.

q: Proporción de predios que no poseen pérdida de la capacidad productiva.

Debido a que no se conocía la varianza de la población objetivo, se asumió la mayor varianza posible, considerando los valores de $p=q=0.50$. La aplicación de la anterior fórmula, arrojó una muestra (n) de 80 predios para el muestreo, lo que equivale al 2,19% del total de predios registrados con siembras de maíz en las estadísticas del ICA y Fenalce en los últimos cinco años. Para el muestreo, se realizó una afijación equitativa de la muestra en cada uno de los ocho municipios, de tal manera que correspondieron 10 predios a muestrear por cada municipio. Para el establecimiento de las rutas o recorridos se utilizaron mapas a escala 1:25,000 de los ocho municipios, y en cada uno de ellos se trazaron transeptos en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, realizando el muestreo de cinco predios en el transepto Norte-Sur y cinco predios en el transepto Este-Oeste, en cada municipio. La selección de los predios en cada transepto se realizó con base en la ubicación geográfica o coordenadas registradas en las bases de datos del ICA y FENALCE.

Muestreo de suelos

En cada predio se realizó un muestreo de suelos entre los meses de enero y mayo, durante la época seca en el Valle del Sinú, previo al inicio de la temporada de lluvias y siembra de los cultivos de maíz en la región, siguiendo los transeptos trazados en cada municipio. En cada predio seleccionado, se tomaron muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad, por triplicado, en puntos aleatorios de los lotes de siembra de maíz. El suelo obtenido fue depositado, mezclado y homogenizado, obteniendo una muestra de aproximadamente

un kilogramo de peso, la cual fue empacada e identificada la ubicación del predio y posteriormente llevada al laboratorio de Suelos y Aguas de la Universidad de Córdoba, en donde se realizó un análisis químico completo.

Desde el punto de vista físico se realizaron determinaciones de textura por el método de Bouyoucos y densidad aparente por el método del terrón parafinado. Adicionalmente, una vez iniciada la temporada de lluvias, en el mes de abril se realizaron determinaciones de la infiltración básica (Ib), por el método de los anillos de Lewis o anillos infiltrómetros (Bouwer, 1961).

Distribución de raíces

Una vez establecidos los cultivos de maíz, e iniciada la floración se abrieron en el suelo cajuelas de 40x40 cm, por triplicado, ubicando el centro de la cajuela en el surco de siembra del maíz (Ahmad *et al.*, 2014; Cabeza & Claassen, 2017). Sobre la pared del suelo en la cajuela, se colocó un marco de madera con grillas cada 10 cm, en el centro del surco de maíz, lo cual permitió obtener submuestras de suelo, cada 10 cm hasta una profundidad de 40 cm y un ancho de 40 cm. Las muestras fueron llevadas al laboratorio y con agua a presión se extrajeron la totalidad de las raíces contenidas en las submuestras. Las raíces obtenidas se contaron en fresco y posteriormente se secaron en la estufa a 65 °C durante 72 horas y se registró su peso seco.

Análisis estadísticos

Para las variables físicas y químicas del suelo se realizaron análisis estadísticos descriptivos de dispersión y frecuencia. Para comparar los valores entre municipios se realizaron análisis de normalidad y comparación múltiple de Kruskal y Wallis, acompañada con la prueba de comparaciones múltiples de Bonferroni. Para los análisis se utilizó el paquete estadístico SAS v9.4.

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades químicas

Los resultados de los análisis químicos realizados a los suelos dedicados al cultivo de maíz en el Valle del Sinú, mostraron mayoritariamente una reacción ligera a moderadamente ácida (CV=10,50%) y valores promedios de pH de 5,89, con un máximo de 7,07 y un mínimo de 4,18 (Tabla 1). Los valores más bajos de pH ($p < 0.05$) fueron obtenidos en el municipio de San Carlos, con un valor promedio de 4,92, lo cual los clasifica como suelos de reacción fuertemente ácida. Esto probablemente se deba a que los suelos en este municipio son de textura prevalentemente franca a franco arenosa, sujetos a procesos de lixiviación y lavado de bases intercambiables. Los valores de pH más altos se presentaron en los municipios de Cereté, Montería, San Pelayo y Ciénega de Oro.

Con relación al contenido de nutrientes, los resultados mostraron una condición química y de fertilidad en general adecuada para el crecimiento y productividad de los cultivos de maíz. Lo anterior se desprende de los contenidos altos a medios de la mayor parte de los elementos nutritivos, en donde las bases intercambiables muestran valores clasificados como medios a altos (Tabla 1). Por el contrario, los contenidos de fósforo se clasificaron como bajos a medios, con valores promedios de 17,15 mg kg⁻¹, siendo los municipios de Lórica, Cereté, Montería, Chimá, San Carlos y Cotorra los que presentaron los menores contenidos y los municipios de Ciénega de Oro y San Pelayo, los que presentaron los mayores contenidos de fósforo.

Respecto a la relación entre bases cambiables, se observó una relación Ca/Mg normal, pero con valores <2,0 indicativo de acumulaciones de Mg en la interfase de los suelos.

Esta situación se hace más evidente al considerar la relación Ca/Mg en la fracción soluble, donde se presenta una relación de orden invertido, lo cual podría estar ocasionando problemas físicos en el suelo. Por su parte la relación Mg/K

(17,71), Ca/K (26,26) y (Ca+Mg)/K (43,97), evidencian posibles deficiencias de potasio (K), especialmente en los municipios de Ciénaga de Oro, Montería y San Pelayo (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades químicas de los suelos dedicados al cultivo del maíz tecnificado en el Valle del Sinú*.

Localidad	pH**	MO	S	P	Ca	Mg	K	Na	CIC	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	(Ca+Mg)/K	CE
		%	mg kg ⁻¹		cmol kg ⁻¹									dS m ⁻¹
Cereté	6.33 ± 0.09	2.27 ± 0.06	27.07 ± 5.41	12.86 ± 2.33	14.10 ± 0.86	10.25 ± 0.66	0.62 ± 0.05	0.19 ± 0.01	25.16 ± 1.34	1.41 ± 0.08	17.86 ± 2.12	24.10 ± 2.36	41.95 ± 4.34	0.30 ± 0.06
Chima	5.67 ± 0.14	1.68 ± 0.10	36.40 ± 7.62	15.47 ± 3.54	14.01 ± 0.64	9.19 ± 0.53	0.65 ± 0.10	0.30 ± 0.03	24.44 ± 1.02	1.56 ± 0.09	18.60 ± 3.53	31.03 ± 7.34	49.64 ± 10.82	0.55 ± 0.06
Ciénaga de Oro	6.15 ± 0.11	1.98 ± 0.16	64.21 ± 126.22	24.11 ± 6.04	13.15 ± 0.63	11.45 ± 0.75	0.66 ± 0.15	0.59 ± 0.26	25.86 ± 1.21	1.17 ± 0.05	25.93 ± 5.11	28.83 ± 5.07	54.77 ± 10.13	0.47 ± 0.15
Cotorra	5.83 ± 0.15	2.40 ± 0.10	118.79 ± 203.79	17.22 ± 2.33	13.30 ± 0.67	9.45 ± 0.86	0.75 ± 0.14	0.45 ± 0.23	24.18 ± 1.37	1.47 ± 0.10	17.70 ± 3.57	24.35 ± 4.59	42.05 ± 8.01	0.96 ± 0.49
Lorica	5.79 ± 0.09	1.99 ± 0.11	14.45 ± 29.53	11.88 ± 1.81	15.63 ± 0.69	8.97 ± 0.75	0.99 ± 0.10	0.30 ± 0.02	25.59 ± 1.19	1.84 ± 0.15	9.97 ± 1.20	17.79 ± 2.43	27.76 ± 3.42	0.35 ± 0.01
Montería	6.24 ± 0.14	2.14 ± 0.13	45.59 ± 107.67	15.37 ± 2.02	13.45 ± 1.13	8.35 ± 0.86	0.57 ± 0.08	0.28 ± 0.05	22.73 ± 1.21	1.98 ± 0.51	17.01 ± 2.06	34.15 ± 11.87	51.16 ± 12.70	0.43 ± 0.11
San Carlos	4.92 ± 0.20	3.11 ± 0.26	72.50 ± 59.45	16.79 ± 2.28	10.00 ± 1.19	7.35 ± 0.72	0.64 ± 0.04	0.23 ± 0.01	20.51 ± 0.32	1.39 ± 0.16	12.88 ± 2.59	16.98 ± 2.91	29.86 ± 5.26	0.37 ± 0.04
San Pelayo	6.16 ± 0.18	2.14 ± 0.20	56.20 ± 137.85	23.53 ± 4.01	14.60 ± 0.86	8.85 ± 0.93	0.63 ± 0.12	0.56 ± 0.36	25.27 ± 1.87	1.78 ± 0.18	21.74 ± 0.01	32.83 ± 7.23	54.58 ± 13.14	0.68 ± 0.42
Media	5.89	2.21	54.40	17.15	13.53	9.23	0.69	0.36	24.22	1.58	17.71	26.26	43.97	0.51
Max	7.07	4.65	803.50	62.00	20.00	15.50	1.88	3.87	39.10	6.50	67.39	139.29	160.71	5.3
Min	4.18	0.97	9.20	2.00	5.00	3.00	0.14	0.11	12.10	0.82	3.49	5.85	10.64	0.09
Rango	2.89	3.68	794.30	60.00	15.00	12.50	1.74	3.76	27.00	5.68	63.90	133.44	150.07	0.66
Desv. Estándar	0.69	0.62	98.10	10.91	3.03	2.60	0.35	0.57	4.54	0.69	11.42	19.81	29.08	0.19
CV%	7.92	22.62	179.55	61.42	20.21	26.39	49.95	157.89	17.54	44.05	64.51	75.46	66.14	65.66
Moda	6.32	2.43	18.00	10.20	15.00	6.50	0.63	0.15	26.30	1.00	17.46	12.50	-	0.20

*Promedio de 10 muestreos por localidad. **Promedio de la muestra ± error estándar; Max. = máximo; Min. = Mínimo; Desv. Estándar = Desviación estándar; CV = Coeficiente de Variación. Elaboración propia

En cuanto al contenido de materia orgánica, los valores superiores ($p < 0.05$) se detectaron en los municipios de San Carlos, Cotorra, Cereté, Montería y San Pelayo. El contenido promedio de materia orgánica en la región fue de 2,21 %.

De otro lado, se observó una alta variabilidad en los contenidos de azufre (S), fósforo (P) y elementos menores (Cu, Zn, Fe, Mn). Esta variabilidad se asocia al origen aluvial de los suelos y al efecto del clima en los procesos de formación. Los contenidos de azufre fueron bajos a medios, con excepción de algunas predios localizados en la cuenca baja del Río Sinú, en los municipios de Cotorra, San Pelayo y Ciénega de Oro, en donde se presentaron niveles altos a excesivos, posiblemente debido a que en estas áreas se encuentran acumulaciones de sulfuro de hierro o pirita FeS_2 , cuya mineralización aporta contenidos de azufre que influyen sobre el pH del suelo de acuerdo a los procesos de oxidación – reducción dominados por las condiciones fluctuantes de drenaje (Combatt *et al.*, 2008).

En cuanto a los elementos menores, en general los contenidos fueron medios a altos, sin problemas de deficiencias o toxicidades, pero con una alta variación en los contenidos de cobre, hierro, zinc y manganeso.

De otro lado, los valores de conductividad eléctrica en general fueron bajos en todos los municipios, sin embargo, se presentaron valores que fluctuaron entre 0,09 y 5,30 $ds\ m^{-1}$, con un promedio de 0,51 $ds\ m^{-1}$. Los valores extremos se detectaron en los municipios de Cotorra, San Pelayo y Ciénega de Oro, indicando una condición con fuerte tendencia a la salinidad (Cremona y Enriquez, 2020).

De los anteriores resultados se puede concluir, que en general la condición química de los suelos del Valle del Sinú es adecuada para el crecimiento y productividad del cultivo de maíz, en donde la principal limitante está representada

por la relación entre bases intercambiables, en donde el magnesio posiblemente a niveles superiores en algunos puntos de la interfase, puede ejercer influencias negativas sobre las propiedades físicas de los suelos y sobre la nutrición de las plantas de maíz. Aun cuando en general la condición salina de los suelos es muy ligera, dentro de los muestreos realizados, algunos predios puntualmente en los municipios de Cotorra, San Pelayo y Ciénega de Oro, mostraron valores de conductividad muy alta, que los clasifica como “moderadamente salinos,” los cuales requerirían de prácticas para su recuperación como la aplicación de biofertilizantes, biopolímeros, adecuación de drenajes, entre otros (Zuñiga *et al.*, 2011).

Propiedades físicas

Se detectó una granulometría variable debido probablemente al origen aluvial de los suelos en el Valle del Sinú, con diferencias ($p < 0,05$) entre municipios para los contenidos de limos y arcillas, pero no para el contenido de arena. La fracción de limos fue en general superior en los municipios de Lorica y Chima, mientras que la fracción de arcillas fue superior en San Pelayo, Cereté y Montería (Tabla 2).

Desde el punto de vista de la clasificación textural, los suelos se clasificaron principalmente en texturas francas a franco arenosas, dominando las texturas francas en la mayoría de los predios muestreados (85%). Las texturas franco-arenosas (15%) se presentaron en siete de los municipios evaluados, con mayor predominio en el Municipio de San Carlos. Esto obedece a la incidencia de materiales parentales de granulometría mixta, compuestos principalmente por areniscas combinadas con sedimentos coluvio-aluviales, a diferencia del resto de los municipios estudiados, donde el material parental de los suelos está compuesto por sedimentos propiamente aluviales (IGAC 2009).

Tabla 2. Clase textural de los suelos dedicados al cultivo del maíz tecnificado en el Valle del Sinú en Colombia*.

Localidad	Arena (%)**	Limo (%)	Arcilla (%)	Proporción de predios por clase textural
Cereté	51.56±1.16	13.00±1.19	35.41±1.34	Franco (F) 80% Franco Arenoso (FA) 20%
Chima	54.61±0.95	16.01±0.93	29.37±0.91	Franco (F) 90% Franco Arenoso (FA) 10%
Ciénaga de Oro	52.12±2.25	14.30±1.56	33.58±1.60	Franco (F) 90% Franco Arenoso (FA) 10%
Cotorra	54.89±31.21	11.77±1.09	33.33±1.35	Franco (F) 90% Franco Arenoso (FA) 10%
Lorica	48.63±1.33	18.44±0.95	32.93±2.24	Franco (F) 100%
Montería	52.48±1.80	12.08±1.16	35.43±1.45	Franco (F) 80% Franco Arenoso (FA) 20%
San Carlos	54.71±1.87	12.31±1.50	32.99±1.46	Franco (F) 70% Franco Arenoso (FA) 30%
San Pelayo	50.86±2.04	11.49±0.80	37.66±2.07	Franco (F) 80% Franco Arenoso (FA) 20%
Media	52.49	13.69	33.87	Franco (F) 85% Franco Arenoso (FA) 15%
Max.	65.70	21.70	47.60	
Min.	40.00	6.70	22.90	
Rango	25.70	15.00	24.70	
Desv. Estándar	5.64	4.20	5.61	
CV%	10.75	30.70	16.57	

*Promedio de 10 muestreos por localidad. **Promedio de la muestra±error estándar; Max. = máximo; Min. = Mínimo; Desv. Estándar = Desviación estándar; CV = Coeficiente de Variación. Elaboración propia.

La situación más preocupante se observó con relación a la densidad aparente (D_a), donde se detectaron en la zona maicera valores en general muy altos en todos los municipios evaluados, con un promedio general de $1,61 \text{ g cm}^{-3}$. Los valores máximos registrados fueron de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ y mínimos de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabla 3). Los valores mas altos de densidad aparente se registraron en los municipios de Cereté, Chima, Lorica y Ciénaga de Oro, siendo este último municipio el que registró los valores extremos ($1,66 \pm 0,02 \text{ g cm}^{-3}$). En la literatura se indica que suelos con texturas franco a franco arenosa, que presentan valores de densidad

aparente $>1,50 \text{ g cm}^{-3}$, posiblemente presentan limitantes físicas para el crecimiento de la mayor parte de las raíces de las plantas (Burt, 2014). Basados en este criterio, se considera que los suelos del Valle del Sinú podrían estar presentando condiciones físicas adversas para el óptimo desarrollo de las raíces de las plantas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Contreras-Santos *et al.*, (2020) para suelos dedicados a la rotación de cultivos como maíz, algodón y arroz, en donde se evidencian inicios de procesos de deterioro probablemente asociados a las prácticas de manejo.

Tabla 3. Densidad aparente, infiltración básica y conductividad hidráulica de los suelos en ocho municipios maiceros del Valle del Sinú*.

Localidad	Da g cm ⁻³	DPM** mm	Infiltración básica cm h ⁻¹	Conductividad Hidráulica m día ⁻¹
Cereté	1.62	0.35	0.80	0.35
Montería	1.58	0.42	0.83	0.32
San Pelayo	1.58	0.50	0.91	0.41
Ciénaga de Oro	1.66	0.43	0.92	0.36
San Carlos	1.59	0.48	1.40	1.20
Cotorra	1.59	0.37	0.10	0.89
Lorica	1.63	0.39	1.20	0.28
Chimá	1.61	0.41	0.91	0.30
Media	1.61	0.41	0.88	0.53
Max.	1.75	0.50	1.40	1.20
Min.	1.50	0.35	0.10	0.28
Rango	0.25	0.15	1.30	0.92
Desv. Estánd.	0.06	0.05	0.37	0.34
CV%	3.87	12.27	42.62	66.27

*Promedio de tres repeticiones y 10 localidades por municipio. **DMP=Diámetro medio ponderado. Elaboración propia.

En efecto, las observaciones de campo permitieron detectar valores de infiltración básica que se clasificaron como “muy lentas,” lo que se manifiesta de forma negativa en los valores de conductividad hidráulica y baja capacidad de infiltración de los suelos. De igual forma, las observaciones indicaron la presencia en los suelos con estructuras en bloques subangulares de tamaños medios a grandes con un fuerte grado de desarrollo. Por otro lado, los agregados se clasificaron como “macroagregados” con diámetro medio ponderado (DPM) >0.25 mm. Según la literatura, los agentes de ligazón de este tipo de agregados son las hifas de hongos, raíces

fibrosas de plantas, polisacáridos, entre otros. Este tipo de agregados son estables al agua, pero más sensibles a cambios por acción de las prácticas de manejo de los suelos (González, 2014; Six *et al.*, 2000).

Según estos resultados, el tamaño de estos agregados, sumado al deterioro estructural por inadecuadas prácticas de mecanización, posiblemente están ocasionando condiciones adversas para el óptimo desarrollo de las raíces de los cultivos de maíz, por la reducción del volumen de espacios porosos, los cuales además de limitar el área de exploración, no permiten un adecuado equilibrio de las interfases sólida, líquida y gaseosa. La estabilidad de agregados

es una medida de la vulnerabilidad del suelo frente a fuerzas externas destructivas (Hillel, 1982; Lince-Salazar *et al.*, 2020). Un agregado consiste en diversas partículas del suelo ligadas entre sí.

Los agregados del suelo son producto de la acción de la comunidad microbial del suelo, de los componentes orgánicos y minerales del suelo, de la naturaleza de la comunidad de plantas en la superficie y de la historia del ecosistema.

Raíces

Los muestreos realizados indicaron una alta variabilidad en el número, peso seco y densidad de raíces de maíz en el perfil del

suelo, con altos coeficientes de variación en el sentido vertical y horizontal, lo que indica variaciones en la densidad de raíces en el perfil del suelo. La mayor concentración de raíces se encontró en los primeros 10 cm de profundidad, especialmente cerca al surco de siembra (Tabla 4). Muy pocas raíces se registran a profundidades >10 cm, lo que indica una condición superficial de las raíces del maíz en el Valle del Sinú, por lo que las plantas estarían dependiendo de un volumen limitado de suelo para el aprovechamiento de los recursos de agua y nutrientes. Los análisis estadísticos no mostraron diferencias entre municipios, indicando que esta es una condición que se repite a lo largo de la zona maicera del Valle del Sinú.

Tabla 4. Densidad de raíces en el perfil de suelos dedicados a la producción de maíz en el Valle del Sinú, Colombia (g cm⁻³)*

Vertical (cm)	Horizontal (cm)				Promedio	Max.	Min.	Rango	Desv. Estánd.	CV%
	10	20	30	40						
10	0.51±0.20	5.06±1.03	3.48±1.05	0.34±0.14	2.33	15.47	0.003	15.467	3.887	116.8
20	0.65±0.34	0.41±0.08	0.29±0.07	0.14±0.03	0.37	6.90	0.000	6.90	0.824	222.7
30	0.55±0.25	0.17±0.03	0.17±0.04	0.08±0.02	0.24	3.89	0.000	3.89	0.607	152.7
40	0.09±0.02	0.08±0.02	0.14±0.03	0.07±0.01	0.10	0.58	0.000	0.58	0.107	107.0
Media	0.45	1.43	1.02	0.16						
Max.	6.90	15.46	14.94	3.02						
Min.	0	0	0	0						
Rango	6.90	15.46	14.94	3.02						
Desv. Estándar	1.08	3.13	2.76	0.34						
CV%	239.6	218.8	270.9	218.7						

*Promedio de tres repeticiones y ocho localidades. **Promedio de la muestra±error estándar; Max. = máximo; Min. = Mínimo; Desv. Estándar = Desviación estándar; CV = Coeficiente de Variación. Elaboración propia.

En el Valle del Sinú desde hace muchos años se vienen empleando métodos para la preparación de los suelos mediante el uso repetitivo de implementos de disco en forma intensiva, realizando dos a tres pases por temporada, lo

que posiblemente ha venido generando a través de los años compactación en los primeros estratos del suelo.

Esta condición, empleada en forma repetitiva cada año, probablemente ha venido ocasionado

el deterioro físico, lo que se refleja en los altos valores de densidad aparente, baja porosidad, baja infiltración básica y pobre crecimiento radical detectados en estos estudios. Lo anterior en cierta forma se explicaría por la profundidad a la que trabajan las rastras y equipos pesados usados en la preparación de los suelos, la cual se concentra en los primeros 10 cm de profundidad, generando un piso de arado, a partir del cual el crecimiento de las raíces presenta mayores dificultades. El uso repetitivo de estos implementos de labranza podría estar ocasionando un deterioro estructural del suelo, generando condiciones que limitan la productividad de los cultivos de maíz, por la reducción del volumen de exploración de las raíces y reducción de los espacios porosos, que no permiten un adecuado equilibrio de las interfases sólida, líquida y gaseosa en los suelos. Estas condiciones hidrodinámicas en últimas afectan el crecimiento y la productividad de los cultivos de maíz, ya que se reduce la capacidad de almacenamiento y disponibilidad de agua en el suelo, pues suelos con esta condición llegan fácilmente a niveles de saturación superficial que ocasionan encharcamientos y altos niveles de escurrimientos.

Los anteriores resultados corroboran las posibles condiciones de compactación manifiestas por los valores de densidad aparente observados y la relación Ca/Mg normal, pero con tendencia estrecha en la fase intercambiable e invertida en la fase soluble. Lo anterior es un indicativo de limitantes para la infiltración del agua en el suelo que muy probablemente generan problemas de encharcamientos frecuentes aún en casos de precipitaciones ligeras o moderadas. Según la USDA (1999), la baja velocidad de infiltración en muchas ocasiones es causada por la compactación que se presenta en los suelos agrícolas producto de años de preparación con implementos pesados o bajo condiciones de humedad que favorecen el desarrollo de la compactación. En suelos con este tipo de condición se requiere de la implementación

de prácticas sostenibles para la rehabilitación de los suelos, que propendan por la mejora de las propiedades edáficas a corto plazo, con el empleo de sistemas de labranza más acertadas, que contribuyan a la recuperación del suelo y la preparación de un buen lecho de siembra. Dentro de las prácticas que se recomiendan para suelos con esta condición se encuentra la labranza profunda, combinada con la utilización de abonos verdes, la rotación de cultivos y la incorporación de residuos de las cosechas en el suelo (Barrera-Violeth, 2017; Aller *et al.*, 2018).

Estos resultados ayudan a entender el comportamiento estable y con tendencia a la baja de los rendimientos del cultivo de maíz en el Valle del Sinú. Se recomienda la realización de estudios más detallados de la distribución vertical de las raíces en el perfil del suelo, a fin de ahondar en las limitaciones que impiden la obtención de más altos rendimientos, y la evaluación de estrategias de recuperación tales como labranza profunda, enmiendas, incorporación de abonos orgánicos y el aprovechamiento de los residuos de cosecha.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio indican que los suelos dedicados al cultivo de maíz en el Valle del Sinú presentan una condición química y fertilidad adecuadas para el crecimiento y productividad de los cultivos. Por el contrario, se evidenció algún grado de deterioro físico de los suelos con la presencia de una alta densidad aparente, baja infiltración básica y crecimiento radical del maíz limitado a los primeros centímetros de profundidad del suelo, probablemente debido al sinnúmero de labores de preparación con implementos de discos que pueden haber ocasionado en el tiempo compactación por "pie de arado". Estos estudios también mostraron un volumen muy limitado de suelo para el crecimiento de las raíces que puede afectar la productividad

del maíz y su cultivo de rotación (algodón), donde las tecnologías implementadas pueden presentar una limitada respuesta. Para mejorar los indicadores físico-químico de los suelos en el Valle del Sinú, para la siembra del cultivo de maíz se recomienda la implementación de prácticas de recuperación de suelos, tales como labranza profunda, enmiendas, incorporación de abonos verdes y residuos de cosecha, que promuevan la fertilidad natural y potencializar la respuesta al uso de nuevas tecnologías acordes a los nuevos cultivares liberados por los programas de mejoramiento genético.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo formó parte del proyecto "Mejoramiento de la capacidad productiva de los suelos del Valle del Sinú como estrategia para mejorar la competitividad del cultivo del maíz", desarrollado en ejecución del CONTRATO No. 2007X5623 908-969 derivado del convenio No. 057 IICA-MADR, suscrito entre el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura- IICA, Fondo Nacional Cerealista- "FENALCE" y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria- AGROSAVIA (antes CORPOICA).

Conflicto de intereses

El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

REFERENCIAS

Agronet. 2019. Área sembrada y área cosechada del cultivo de maíz tecnificado por departamento en Colombia. <http://www.agronet.gov.co/Documents/Ma%C3%ADz%20Tecnificado.pdf>

Aguilar, S. 2005. Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco* 11(1-2):333-338. <https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf>

Ahmad, A., Fares, A., Hue, N. V., Safeeq, M., Radovich, T., Abbas, F., Ibrahim, M. 2014. Root distribution of sweet corn (*Zea mays*) as affected by manure types, rates and frequency of applications. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 24(2), 592–599

Aller, D. M., Archontoulis, S. V., Zhang, W., Sawadgo, W., Laird, D. A., Moore, K. 2018. Long term biochar effects on corn yield, soil quality and profitability in the US Midwest. *Field Crops Research*, 227(July), 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.012>

Barrera-Violeth, J.L., Cabrales-Herrera, EM., Sáenz-Narváez, EP. 2017. Respuesta del maíz híbrido 4028 a la aplicación de enmiendas orgánicas en un suelo de Córdoba – Colombia. *Revista Orinoquía*, 21(2):38-45

Beretta-Blanco, A., Pérez, O., Carrasco-Letelier, L. 2019. Soil quality decrease over 13 years of agricultural production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 3, 45–55. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09990-3>

Bouwer, H. 1961. A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in situ above a water table. *Soil Sci. Soc. Proc.*; 334-339.

Burt, R. 2014. Soil survey field and laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, WA, USA.

Cabeza, R.A., Claassen, N. 2017. Sistemas radicales de cultivos: extensión, distribución y crecimiento. *Agro Sur*, 45(2), 31–45. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2017.v45n2-04>

- Combatt, E.M., Martínez L.Z., Palencia, M. 2008.** Generación de acidez por oxidación de pirita en suelos sulfatados ácidos interiores de clima cálido. *Temas Agrarios* 13(1), 32. Doi: [10.21897/rta.v13i1.662](https://doi.org/10.21897/rta.v13i1.662)
- Combatt-Caballero, E., Novoa-Yáñez, R., Barrera-Violeth, J. L. 2012.** Caracterización química de macroelementos en suelos cultivados con plátano (*Musa AAB Simmonds*) en el departamento de Córdoba, Colombia. *Acta Agronómica*, 61(2), 166-176.
- Contreras-Santos, J.L., Martínez-Atencia, J. Cadena-Torres, J; Novoa-Yanez, RS, Tamara-Morelos, R. 2020.** Una evaluación de las propiedades físicoquímicas de suelo en sistema productivo de maíz - algodón y arroz en el Valle del Sinú en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* 23(2):1-10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1375>
- Cremona, M. V., Enríquez, A. S. 2020.** Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica. *Presencia*, 5–8. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/7709/INTA_CRPatagoniaNorte_EEABariloche_Cremona_MV_Algunas_Propiedades_Del_Suelo_Que_Condicionan_Su_Comportamiento.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas – FENALCE. 2019.** Indicadores Cerealistas 2019-A. Departamento Económico y Apoyo a la Comercialización. Pag. 72. <https://www.fenalce.org/archivos/indicerealista2019A.pdf>
- Funmilayo, AY., Abenu, A. 2019.** Evaluation of Soil Deterioration Index under Different Farm Management practices In Lafia Region , Nasarawa State – Nigeria. *Confluence Journal of Environmental Studies*, 13(1), 101–106.
- González, RL. 2014.** Estabilidad estructural de agregados en tres sistemas de uso de suelo en el sector Venenillo, Distrito Rupa Rupa. Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de La Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Tingo María, Perú. 58 p.
- Hillel, D. 1982.** *Introduction to soil physics.* Academic Press. San Diego, California. 364 pg.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. 2009.** Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento de Córdoba. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Lince-Salazar, L. A., Castro, A. F., Castaño, W. A. 2020.** Estabilidad de agregados de suelos de la zona cafetera colombiana. *Revista Cenicafé*, 71(2), 73–91. <https://doi.org/10.38141/10778/71206>
- Prieto, B., Peroza, J., Grandett, G. 2010.** Efecto de labranza y manejo de materiales orgánicos sobre algunas propiedades físicas y químicas de un vertic endoaquept del valle del Sinú, Córdoba Colombia. *Temas Agrarios* 15(2), 27. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/432>
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K. 2000.** Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099–2103. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- US Department of Agriculture -USDA. 1999.** Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, Instituto de Calidad de Suelos, agosto, 1999. 82 pg.
- Zuñiga, O., Osorio, J. C., Cuero, R., Peña, J. A. 2011.** Evaluación De Tecnologías Para La Recuperación De Suelos Degradados Por Salinidad Evaluation of Technologies for the Recovery of Soils Degraded By Salinity. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1), 5769–5779.