

Diagnóstico de la fertilidad química de suelos (Rhodic Paleudult) en sistemas agrarios y forestal de la región Oriental de Paraguay

Diagnosis of the chemical fertility of soils (Rhodic Paleudult) in agricultural and forest systems of the Eastern region of Paraguay

Carlos Javier Villalba Martínez^{1*}, Agustín Merino García²  y Jorge Etchevers Barra³

¹ Universidad Nacional de Caaguazú. Coronel Oviedo, Paraguay.

² Universidad Santiago de Compostela. Santiago de Compostela, España.

³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Montecillo, México.

RESUMEN

Los sistemas de manejos de suelos afectan la calidad y sostenibilidad de la producción agrícola, especialmente en los trópicos. Los suelos de la zona Vaquería de Paraguay presentan una extrema fragilidad a la sobreexplotación, por la alta extracción de nutrientes del suelo. Una práctica frecuente para reducir su degradación, es la siembra directa, si bien este sistema aumenta el rendimiento en el corto plazo, al transcurrir el tiempo desde su implementación, se observa descenso en la productividad. Ello podría deberse a la sobreexplotación del recurso y a la baja reposición de los nutrientes extraídos por el cultivo. El objetivo del presente estudio fue determinar las propiedades químicas del suelo en que se ha practicado siembra directa durante 15 años y compararlas con las de un suelo bajo pastura establecida sobre suelo agrícola. El suelo elegido fue un Rhodic Paleudult, arenoso, pobre en materia orgánica y baja CIC, representativo de la zona. Se compararon tres sistemas de manejo: (a) el sistema de manejo siembra directa de soja y maíz sin que se retiren los residuos de cosecha (quince años consecutivos); con (b) una pastura nativa; y, con (c) bosque natural como testigo. El diseño experimental fue de bloques al azar con cinco repeticiones. Las muestras se tomaron 3 años consecutivos (2017, 2018 y 2019) se recolectaron muestras de suelos de la capa de 0 a 20 cm. Las muestras fueron analizadas para determinar pH, materia orgánica, Al³⁺, CIC, macro y micronutrientes, para evaluar su dinámica en el corto tiempo. El estudio no reveló variaciones significativas durante los 3 años de seguimiento, de ninguno de los parámetros evaluados. La comparación de los tratamientos mostró que, el suelo manejado con siembra directa presentó mayor acidez y menor disponibilidad de nutrientes en comparación con la pastura y el bosque.

Palabras claves: Acidez de suelo, aluminio disponible, disponibilidad de nutrientes.

ABSTRACT

Soil management systems affect the quality and sustainability of agricultural production, especially in the tropics. The soils of the Vaquería area of Paraguay present an extreme fragility to overexploitation, due to the high extraction of nutrients from the soil. A frequent practice to reduce its degradation is direct sowing, although this system increases yield in a short term, as time passes since its implementation, a decrease in productivity is observed. This could be due to the overexploitation of the resource and the low replacement of the nutrients extracted by the crop. The objective of this study was to determine the chemical properties of the soil in which direct sowing has been practiced for 15 years and to compare them with those of a soil under pasture established on agricultural soil. The soil chosen was a Rhodic Paleudult, sandy, poor in organic matter and low CEC, representative of the area. Three management systems were compared: (a) the direct sowing of soybeans and corn without removing harvest residues (fifteen consecutive years); with (b) a native pasture; and, with (c) natural forest as witness. The experimental design was randomized blocks with five replications. The samples were taken 3 consecutive years (2017, 2018 and 2019) soil samples were collected from the 0 to 20 cm layer. The samples were analyzed to determine pH, organic matter, Al³⁺, CEC, macro and micronutrients, to evaluate their dynamics in a short time. The study did not reveal significant variations during the 3 years of follow-up in any of the parameters evaluated. The comparison of the treatments showed that the soil managed with direct sowing presented higher acidity and lower availability of nutrients compared to the pasture and the forest.

Keywords: Soil acidity, available aluminum, availability of nutrients.

***Autor para correspondencia:**
villalba.javierdgi@gmail.com

Conflicto de interés:
El autor declara no tener conflicto de interés.

Licencia:
Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Historial:
Recibido: 05/01/2020;
Aceptado: 25/10/2020

Período de Publicación:
Julio-Diciembre de 2020

INTRODUCCIÓN

La producción agrícola, en conjunto con la ganadería, es la principal actividad económica del Paraguay. Ambas representan el 35% del producto interno bruto del país (Lesmo Duarte, da Costa, Villalba González y Lesmo Duarte (2017); Ruiz Díaz y Cabral López, 2018). La región oriental concentra las mayores áreas de producción agrícola, principalmente de soja y maíz, por las condiciones climáticas subtropicales favorables (precipitación y temperatura promedio anual de 1500 mm y 21°C, respectivamente), los suelos son extremadamente frágiles, debido a que presentan texturas arenosas, bajo contenidos en MOS y baja capacidad de intercambio catiónico, por lo que las sobreexplotaciones de estos suelos amenazan la sustentabilidad en el largo plazo.

Desde la década de años 80, Paraguay experimentó un fuerte incremento de la superficie destinada a la producción agrícola, en parte, atribuible a la mecanización del cultivo de la soja y razones de mercado (Hahn y Fioretto, 2017). Con anterioridad a esa fecha, el sistema de labranza predominante consistía en la labranza del suelo, lo que provocaba severos procesos de degradación de suelo, con altas tasas de erosión y pérdida de la fertilidad química y biológica de los suelos. Para contrarrestar este problema, a partir de 1980 se introdujo la práctica de la no labranza, lo que derivó en que la superficie cultivada alcanzase 1.300.000 ha, y que paralelamente hubiese incremento de los rendimientos de los cultivos (Vallejos, Kliewer, Florentín, Casaccia, Calegari y Derpsch, 2001; Derpsch, Florentín y Moriya, 2000).

El aumento de mecanización con la siembra directa de soja y maíz a nivel país (superior a 80%), hizo que Paraguay se colocase en el primer lugar mundial en adopción del sistema de conservación de suelos por superficie (Hahn y Fioretto, 2017). Trabajos conducidos por Souza, Costa, Anghinoni, Carneiro, Martins & Bayer (2014), en un suelo Rhodic Paleudult similar a los de las áreas de interés de este estudio, dan cuenta que la labranza cero, al igual que las pasturas, mantienen la concentración de carbono orgánico, en contraste con la labranza convencional, pero que el nitrógeno total (NT) era menor si se comparaban con suelos bajo agricultura. Diferentes estudios muestran que, la práctica del no laboreo mejora los niveles de MOS, agregación y de disponibilidad de nutrientes según Pozzi Jantalia, Pereira Dos Santos, Boddey, Alves, Urquiaga & Kohham (2004), Karayel (2009) y Souza et al. (2014), quienes la han comparado con el laboreo intensivo, en ambientes y suelos similares.

En los terrenos degradados otra práctica habitual es el establecimiento de praderas o pasturas, al igual que la siembra directa, las pasturas disminuyen

la degradación de los suelos y contribuyen a la recuperación de la capacidad productiva (Díaz-Rossello y Durán, 2011). Estudios realizados en zonas brasileñas con suelos y ambientes similares, muestran que las pasturas implantadas en terrenos agrícolas aumentan el contenido de MOS, disminuye la acidez del suelo y aumenta la disponibilidad de nutrientes. igualmente ocurre con la rotación soja o maíz con pastura, un sistema que favorece el desarrollo y al mismo tiempo contribuye a proteger los suelos. (Martins et al., 2014 ; Martins et al., 2016 ; Martins et al., 2020).

A pesar de la importancia de la agricultura en Paraguay, hay poca información del efecto del uso de la tierra sobre las propiedades químicas en el largo plazo, que causan las diversas prácticas de manejo del suelo empleadas para la producción intensiva de cultivos. La calidad del suelo, incluye variables que permiten evaluar su condición, estos son denominados indicadores de calidad de suelo (ICS), e indican si la calidad del suelo mejora, permanece constante o decrece, por el cambio de uso de suelo por las prácticas agrícolas (Astier Calderón, Maass-Moreno y Etchevers-Barra, 2002; Cantú, Becker, Bedano y Schiavo, 2007; Ghaemi, Astaraei, Emami, Nassiri Mahalati & Sanaeinejad, 2014).

De los estudios anteriores se deduce que la producción de cultivos en los suelos frágiles de Paraguay podría estar comprometida por la degradación paulatina de los suelos como consecuencia de la intensificación de la agricultura, a pesar de la introducción de la práctica del no laboreo. La información sobre el estado de fertilidad de los suelos, en los diferentes sistemas de cultivo, es escasa. Para abordar esta cuestión, se han seleccionado parcelas agrícolas que se han manejado con el sistema siembra directa y parcelas de pastura establecidas sobre suelos agrícolas, las cuales se han comparado entre sí y con un bosque nativo que ha tenido algún grado de intervención antrópica. El objetivo del estudio fue determinar la evolución de determinadas propiedades del suelo (MOS, pH y elementos extraíbles) importantes para la sostenibilidad agrícola en la zona, manejadas con siembra directa o pastura, después de dos décadas de manejo continuo con esos sistemas. Esta información permitirá optimizar los sistemas de manejo para realizar una gestión sostenible del recurso suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el Departamento de Caaguazú, Paraguay, en el municipio Vaquería (X: 668608 y Y:7271994). El clima de la zona es subtropical sin estación seca (Cfa), según la clasificación de Köppen-Geiger. La temperatura y

precipitación medias anuales son 22°C y 1600 mm, respectivamente (Dirección Nacional de Aeronáutica Civil, 2019). El material geológico que dio origen al suelo es Arenisca Roja. El relieve en la zona de estudio es plano con pendientes menores a 3%. El suelo ha sido clasificado como Rhodic Paleudult (Soil Taxonomy), con horizontes A ócrico (0-30cm) y B argílico (30-100cm), y se caracteriza por su textura franco arenosa, baja concentración de MOS y baja CIC.

Historial del área de estudio y diseño experimental

El estudio se estableció en tres parcelas adyacentes localizadas en una zona homogénea dentro de una finca de 1000 ha, representativa de la región. Los sistemas investigados fueron: (a) siembra directa (SD) con cultivo intensivo de soja y maíz durante los últimos 15 años; (b) pradera natural (PN) dedicada a pastoreo extensivo de ganado bovino, establecida sobre un suelo agrícola hace a aproximadamente 30 años; y, (c) bosque nativo (BN) con escasa intervención antrópica, que sirvió como referencia.

Las parcelas de cultivo presentan un historial de 15 años de siembra directa, sin laboreo: el cultivo principal es la soja (*Glycine max* (L.) Merr.), en los meses de primavera-verano (setiembre-marzo) y maíz en otoño (marzo - julio). El rendimiento promedio de la soja y maíz es de 3000 y 4000 kg ha⁻¹ de grano, respectivamente. La fertilización de base que se aplica a ambos cultivos es de 8 kg de N, 60 kg de P₂O₅ y 20 kg de K₂O, por ciclo de cultivo. Los residuos de cosecha se dejan en el terreno, como cobertura vegetal. En el caso de la soja estos son aproximadamente 7.000 kg ha⁻¹ y en el de maíz, 15.000 kg ha⁻¹.

La pastura natural posee predominancia de una gramínea nativa del Paraguay (*Paspalum notatum*), que se caracteriza por poseer una alta cantidad de raíces en los primeros 5 cm de profundidad. La pastura no se fertiliza y se destina al pastoreo de bovinos. Esta especie presenta resistencia a sequías y ha sido históricamente sobrepastoreada.

El bosque nativo con escasa intervención antrópica se caracteriza por la presencia de árboles nativos como el yrvyra pyta (*Peltophorum dubium*), tajá (*Handroanthus impetiginosus*), cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), y posee una abundante cubierta vegetal (mantillo) sobre el suelo.

El experimento se condujo de acuerdo a un diseño experimental de bloques al azar donde los tratamientos fueron los sistemas de manejos de suelos (Tabla 1), con cinco repeticiones por unidad experimental. Cada una de las 15 parcelas presentaba una superficie de 5.600 m² (80 x 70 m). Cada

Tabla 1. Descripción de manejos evaluados.

Tratamientos	Sistema de manejo	Especies
BN	Bosque Natural	(<i>Peltophorum dubium</i>), (<i>Handroanthus impetiginosus</i>), (<i>Cedrela fissilis</i> Vell.)
SD	Siembra Directa	(<i>Glycine max</i> (L.) Merr.), (<i>Zea mays</i>)
PN	Pastura Natural	(<i>Paspalum notatum</i>)

bloque fue delimitado previamente considerando su homogeneidad, topografía edáfica y manejo.

Recolección y preparación de las muestras de suelos

Los muestreos se efectuaron en 3 años consecutivos (2017, 2018, 2019). De cada unidad experimental se extrajeron seis muestras de suelo, de la profundidad 0-20 cm, las que se mezclaron para constituir una muestra compuesta por unidad experimental. Se utilizó una barrena muestreadora de fertilidad de suelos. Las muestras fueron almacenadas en bolsas de plástico, etiquetadas y remitidas al laboratorio para su análisis. Las muestras se secaron al aire, tamizaron y homogeneizaron antes de análisis químico.

Análisis químicos de suelos

El pH se determinó con CaCl₂ 0,01M, relación suelo solución 1:2. La MOS oxidable, por el método combustión húmeda (Walkley y Black) descrito por Jackson (1976); el aluminio intercambiable se extrajo con KCl 1 M; el fósforo, potasio, hierro, cobre, manganeso y zinc se extrajeron con el reactivo Mehlich 1 (Raij, Andrade, Cantarella é Quaggio, 2001) y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica (EAA), excepto el fósforo que se evaluó mediante un método colorimétrico con molibdeno (Raij et al., 2001).

El nitrógeno total (NT) se midió por el método de Kjeldahl (sin modificación para incluir nitratos) (Bremmer, 1965). El calcio y el magnesio se extrajeron con acetato de amonio (1M, pH 7) y se midieron por espectrometría de absorción atómica (Raij et al., 2001).

Tratamiento de datos

Para comprobar diferencias entre las diferentes prácticas y entre años de un mismo tratamiento, previo análisis de normalidad de datos, se realizó un análisis de varianza ANOVA y las medias se compararon mediante la prueba de Tukey. Así mismo, se practicaron regresiones lineales y correlaciones, utilizando el programa Statistical Analysis System, versión 9.2 (SAS Institute INC., 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los análisis químicos realizados en cada uno de los tratamientos en los 3 años consecutivos de evaluación. Para un mismo sistema, el análisis estadístico no reveló diferencias significativas entre años de evaluación, para ninguno de los parámetros edáficos medidos. Según los criterios establecidos por Castellanos, Uvalle Bueno, Aguilar Santelises (2000), los suelos en los tres sistemas estudiados son, en general, muy ácidos (4,5-5,5), con porcentajes medio-bajo de MOS (2,4-2,0%) y de nitrógeno total (0,1 %) así como, niveles bajos de CIC (9-11 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), la baja CIC es concordante con resultados exhibidos por los Rhodic Paleudult (Souza et al., 2014, Fink et al., 2014).

En los tres tratamientos evaluados, las concentraciones de Ca, Mg y K extraíbles fueron bajas a muy bajas (Tabla 3). Los niveles de Al fueron altas, congruentes con el fuerte carácter ácido de los suelos. Las concentraciones de los microelementos estudiados fueron bajas, en todos los casos. Los resultados de los nutrientes son similares a los reportados por Fink et al. (2014), donde caracterizaron químicamente un suelo Rhodic Paleudult bajo diferentes manejos. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los análisis químicos comparando los tres sistemas estudiados.

Los resultados muestran que los suelos cultivados con el sistema SD por aproximadamente 15 años, presenta pH bajo, alta concentración de Al extraíble, así como baja concentración de P extraíble Mehlich 1 y de Ca, Mg y K intercambiable, en comparación con los manejados con PN y BN.

La concentración media de MOS y NT no presentaron diferencias estadísticas significativas entre los tres sistemas estudiados. Los mayores contenidos MOS en los suelos de cultivo y pastura podría deberse a la alta cantidad de restos de cultivos incorporados por la soja y el maíz, y en el caso de la pastura, a la alta densidad radical de la especie dominante. En cuanto al NT no se encontraron variaciones para los años de estudio y en la diferencia de manejos de suelos. Pramod et al. (2020), observaron que, en SD con aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, incrementaba las reservas de C y NT en el perfil del suelo, igualmente que dejar los rastrojos sobre la superficie aumentaba la retención de las aplicaciones del N mineral.

La SD mostró una tendencia a ser superior en MOS que el BN, aunque la diferencia entre medias no fue estadísticamente significativa. Ello se explica por los residuos de cosechas que se dejan en la superficie de la capa arable (Powlson et al., 2014). Hevia et al. (2007), reportaron que la siembra directa conserva e incrementa los tenores de MOS. Bono, Álvarez, Buschiazzi & Cantet (2008) y Novelli, Caviglia & Melchiori et al. (2011) acotaron que dicha acumulación ocurre principalmente en las primeras capas del suelo, hasta los 30 cm de profundidad. En suelos del orden Oxisol en el sur de Brasil, se han reportado incrementos en la MOS, en los primeros 20 cm de profundidad, en suelos manejados con el sistema SD, lo cual ha significado aumento en la disponibilidad de NT (Sá et al., 2001). De manera similar ocurrió un pequeño aumento de MOS en el sistema PN con respecto al BN, por las raíces finas y alta densidad radical que aporta PN cantidades significativas de MOS al suelo. En los bosques maduros suele ocurrir

Tabla 2. Resultados de análisis químicos de suelos en los tres años de evaluación en los tres sistemas estudiados.

SISTEMA Y AÑO†	pH	MO	NT	P	CIC	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Fe	Cu	Zn	Mn
	CaCl ₂		%	mgkg ⁻¹			cmol _c dm ⁻³					mgkg ⁻¹	
BN. 2017	5,0a‡	2,2a	0,11a	22a	9,0a	0,9a	1,75a	0,48a	0,35a	37,1a	1,5a	2,3a	8,2a
BN. 2018	5,1a	1,9a	0,10a	16a	8,6a	1,0a	1,58a	0,43a	0,32a	40,4a	1,3a	1,7a	9,9a
BN. 2019	5,1a	2,0a	0,10a	20a	8,8a	0,9a	1,67a	0,42a	0,34a	38,0a	1,4a	2,0a	9,1a
D est.	0,1	0,2	0,1	3,1	0,2	0,1	0,1	0,03	0,02	2,0	0,1	0,3	0,9
SD. 2017	4,8a	2,4a	0,12a	4,1a	7,7a	1,9a	1,22a	0,20a	0,08a	33,2a	1,4a	1,7a	9,0a
SD. 2018	4,6a	2,2a	0,11a	3,2a	8,8a	3,0a	0,39a	0,30a	0,04a	34,7a	1,6a	2,1a	8,8a
SD. 2019	4,5a	2,5a	0,13a	3,5a	8,7a	2,7a	0,79a	0,24a	0,04a	36,6a	1,2a	1,7a	8,9a
D est.	0,2	0,2	0,01	0,5	0,6	0,6	0,4	0,05	0,02	1,7	0,2	0,2	0,1
PN. 2017	5,7a	2,5a	0,13a	3,6a	8,7a	0,3a	1,81a	0,25a	0,05a	35,0a	1,5a	2,0a	11,7a
PN. 2018	5,6a	2,0a	0,10a	2,2a	8a	0,3a	1,61b	0,24a	0,07a	31,3a	1,3a	2,9a	10,3a
PN. 2019	5,2a	2,8a	0,14a	2,9a	8,4a	1,3a	2,03a	0,23a	0,09a	32,9a	1,4a	2,1a	9,9a
D est.	0,3	0,4	0,02	0,7	0,4	0,6	0,2	0,01	0,02	1,9	0,1	0,5	0,9

† BN: Bosque nativo; SD: Siembra directa; PN: Pastura natural.

‡VALORES CORRESPONDIENTES AL AÑO DE OBSERVACION DENTRO DE CADA SISTEMA DE MANEJO, CON LETRAS son significativa diferentes ($p \leq 0.05$), según el test de Tukey.

Tabla 3. Resultados de análisis químicos de suelos en los tres evaluados los datos representan las medias de los tres años (n= 9, en cada caso).

SISTEMA [†]	MOS	NT	pH	P	Al ³⁺	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Fe	Cu	Zn	Mn
†	%		CaCl ₂	mgkg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³		mgkg ⁻¹						
BN	2,0a	0,10a	5,0b	18a	0,9 ^a	8,8a	1,7a	0,4a	0,34a	35a	1,3a	2a	9,0a
SD	2,4a	0,12a	4,6c	3,6b	2,4c	8,4a	0,8b	0,2b	0,05b	34a	1,3a	1,8a	8,9a
PN	2,4a	0,12a	5,4a	3,0b	0,6 ^a	8,4a	1,8a	0,4a	0,07b	33a	1,4a	2,3a	10,0a

† BN; Bosque nativo; SD; Siembra directa; PN: Pastura natural. Medias con letra diferente en una misma columna son estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$)

una menor deposición de ramas y hojas que en los bosques en pleno desarrollo (Ramachandran Nair, Mohan Jumar, Kumar & Nair, 2009; Vallejo, Roldán & Dick, 2012; Martínez, Cajas, León & Osorio, 2014), y una mayor tasa de descomposición, por la humedad que guarda su suelo a lo largo de casi todo el año (Pietsch et al., 2014).

La mayor acidez (pH 4,6) se encontró en el sistema SD (cultivos de soja y maíz), significativamente más ácido en las parcelas PN y BN, cuyos valores se ubicaron en el rango pH 5,0 - 5,6. El pH más elevado se observó en el suelo con PN, independientemente del año de muestreo. La concentración media de Al extraíble fue mayor en las parcelas con SD y mínimo en PN, siendo la de BN intermedia. La media de la CIC, en todos los suelos, fue baja (8,4 a 9,6 cmol_c dm⁻³) y estadísticamente igual entre sistema de manejo estudiado.

Los suelos de los sistemas SD Y PN presentaron concentraciones muy bajas de P y K extraíbles, inferiores a los del bosque natural. Esta misma situación se produce con el Ca y Mg, con concentraciones muy bajas. Estos resultados son congruentes con los reportados para este tipo de suelo (Souza et al., 2014). La cantidad de fertilizantes que anualmente se les aplica a sistemas SD, no han sido suficientes para construir un almacén duradero de estos elementos en el suelo.

En la parcela con SD se encontró la menor concentración de nutrientes, esto podría deberse a la baja reposición de elementos que hace la fertilización aplicada en comparación con la alta extracción nutrimental del cultivo de la soja. El promedio de extracción nutrimental del cultivo de la soja en kg por tonelada de grano: 55 de N, 5 de P y 18 de K por ciclo de cultivo (Ciampintti y Garcia, 2007). El balance entre la demanda que impone el cultivo y la oferta que muestra el suelo, es de suma importancia para mantener la fertilidad. Los suelos que se desarrollan sobre una vegetación nativa como el caso del bosque y la pastura presentan sistema relativamente en equilibrio del (Fisher y Blinkley, 2000). La disponibilidad de P en los suelos ácidos tiende a ser baja por la precipitación con el aluminio (Rivera Méndez, Moreno Chacón, Herrera Corzo & Romero Angulo, 2016). Con respecto a lo

micronutrientes, las concentraciones de Fe, Cu, Zn y Mn no presentaron diferencias significativas entre los manejos de suelos.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de análisis de correlaciones entre los parámetros de fertilidad de suelos estudiados.

Como es natural, el pH se relacionó negativamente con él Al extraíble y positivamente con los elementos generadores de bases (Ca, Mg, K). Los niveles de P extraíbles con el método de Mehlich I se relacionan con el pH, pero no, con la MOS, al respecto Fink, Inda, Bavaresco, Barrón, Torrent & Bayer (2016), mencionan que el P presenta una alta capacidad de fijación con el Fe en zonas subtropicales de Brasil. Con respecto a los micronutrientes, éstos se correlacionaron positivamente con la MOS. Y en el caso de Cu, Zn y Mn, también con el pH, posiblemente como efecto indirecto por la relación pH-MOS.

La MOS aumenta la disponibilidad de Fe, Mn, Zn, pero tiene menor influencia en el Cu, igualmente la fertilización con macronutrientes incrementa la disponibilidad de estos micronutrientes en el suelo (Zhang, Wang & Jin, 2001; Li et al., 2007). Seguidamente se ilustra la regresión entre el pH del suelo y la concentración de Al, así también, con las bases intercambiables.

Los resultados de las evaluaciones muestran que, al aumentar el pH del suelo, disminuye la concentración de Al³⁺ (Figura 1 (a)) e incrementa la disponibilidad de Ca, Mg y K (Figura 1 (b, c, d)). La fuerte acidez limita el crecimiento de los cultivos debido a la baja disponibilidad de los nutrientes esenciales especialmente de Ca y Mg y a la toxicidad del Al (Kochian, Hoekenga & Piñeros, 2004). Se ha observado en esta investigación que el Al incrementa al disminuir la acidez del suelo por debajo de pH 5; esto es, concentraciones que pueden afectar el crecimiento de las plantas (Porta, López-Acevedo & Roquero, 2003; Álvarez, Sam y Reynaldo, 2005; Liao et al., 2006; Cristancho, Hanafi, Syed Omar y Rassi, 2010). En los suelos de la PN y BN, en cambio en la SD en cultivos con SD se ha visto que la fertilidad química y biológica del suelo disminuye con monocultivos con soja (Quinteiro Ribeiro et al., 2013; Anda, Shamshuddin & Fauziah, 2013;

Tabla 4. Coeficientes correlación entre parámetros de fertilidad de suelos.

Variable	pH	Al ³⁺	MO	NT	CIC	P	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Fe	Cu	Zn	Mn
pH	1												
Al ³⁺	-0,93*	1											
MO	-0,80*	----	1										
NT	0,58	----	0,67	1									
CIC	0,67	0,69	----	----	1								
P	0,88*	----	----	----	----	1							
Ca ⁺²	0,84*	----	----	----	0,7*	----	1						
Mg ⁺²	0,85*	----	----	----	0,54	----	0,83*	1					
K ⁺	0,64*	----	----	----	0,64*	----	0,82*	0,92*	1				
Fe	----	----	0,83*	----	----	0,70*	----	----	----	1			
Cu	0,91*	----	0,98*	----	----	----	----	----	----	----	1		
Zn	0,99*	----	0,89*	----	----	----	----	----	----	----	----	1	
Mn	0,95*	----	0,94*	----	----	----	----	----	----	----	----	----	1

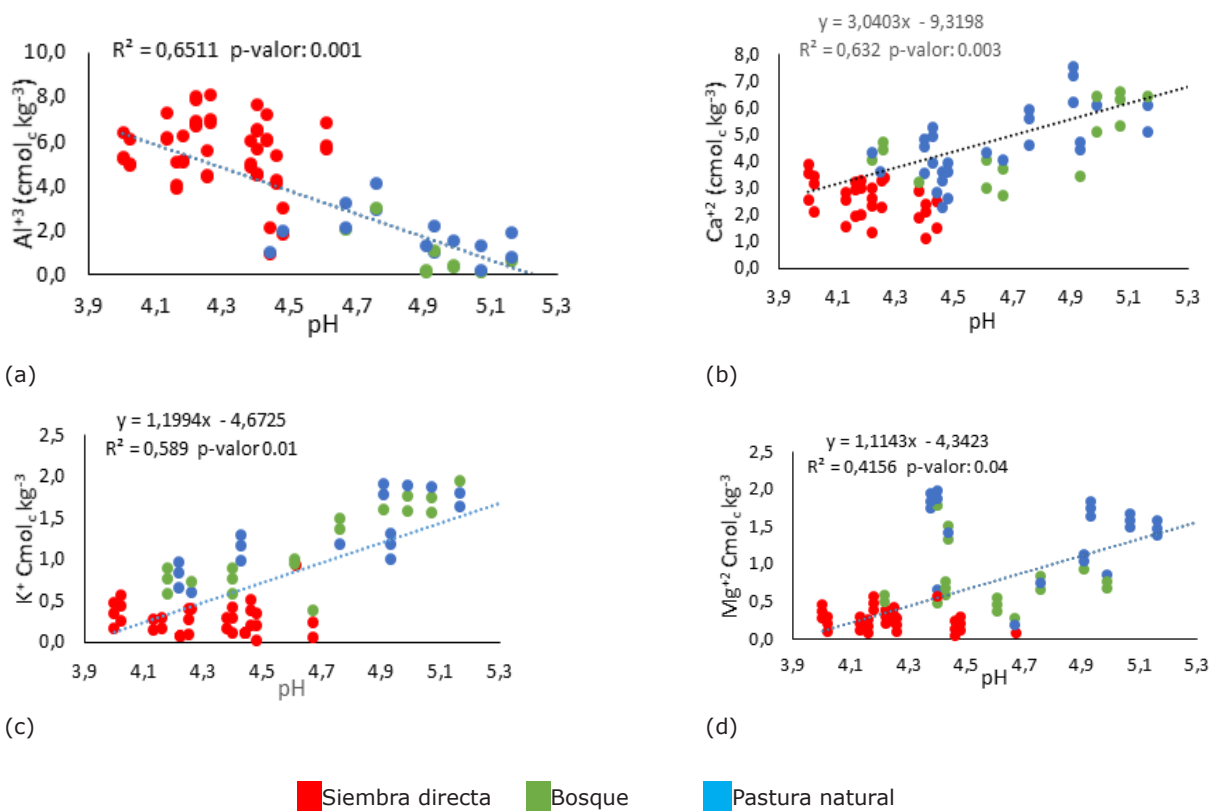


Figura 1. Relación entre el pH y diferentes parámetros. (a) Relación pH y Al³⁺, (b) Relación pH y Ca⁺², (c) Relación pH y K⁺, (d) Relación pH y Mg⁺².

Eberlein, Heuer, Vilda & Westphal, 2016).

CONCLUSIONES

Los resultados de los indicadores de fertilidad de suelos y nutrientes disponibles se mantuvieron prácticamente constante los 3 años de evaluación presentando leves variaciones.

La siembra directa presenta mayor acidez y por ende mayor concentración de aluminio en comparación con la pastura y el bosque nativo.

En cuanto a los nutrientes disponibles, la menor concentración se encuentra en el sistema de siembra directa con los monocultivos de soja y maíz.

Se observa una alta correlación entre el pH y el Al intercambiable. Al aumentar la acidez de suelo, incrementó el Al³⁺ y disminuyó la disponibilidad de los macronutrientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astier Calderón, M., Maass-Moreno, M. y Etchevers-Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36, 605-620.
- Álvarez I., Sam, O. y Reynaldo, I. (2005). Cambios inducidos por el aluminio en la morfogénesis radicular del arroz. *Cultivos Tropicales* 26 (1), 21-25.
- Anda, M., Shamshuddin, J. & Fauziah, C. I. (2013). Increasing negative charge and nutrient contents of a highly weathered soil using basalt and rice husk to promote cocoa growth under field conditions. *Soil and Tillage Research* 132, 1-11.
- Bono, A., Álvarez, R., Buschiazzo, D. & Cantet, R. J. C. (2008). Tillage effects on soil carbon balance in some semiarid agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72 (4), 1140-1149. 10.2136/sssaj2007.0250
- Bremmer, J. M. (1965). Nitrógeno total. In C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbial properties. Number 9 in series Agronomy*, American Society Agronomy : Inc. Publisher. pp. 1149 – 1178.
- Cantú, M. P., Becker A., Bedano, J. C. y Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices en la Pampa Argentina. *Ciencia Suelo* 25 (2), 173-178.
- Castellanos, Uvalle Bueno, J. X. y Aguilar Santelises, S. (2000). *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos*. 2a. ed. Guanajuato, México : Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende. pp. 34-74.
- Ciampitti, I. A. y García, F. O. (2007). Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. *Informaciones Agronómicas* No. 33, Archivo Agronómico No. 11. IPNI Canada. Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Cristancho, R. J. A., Hanafi, M. M., Syed Omar, S. R. y Rassi, M. Y. (2010). Variations in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) progeny response to high aluminum concentrations in solution culture. *Plant Biology* 13 (2), 33-42.
- Derpsch, R., Florentín, M.A. y Moriya, K. (2000). *Importancia de la siembra directa para alcanzar a sustentabilidad agrícola. Proyecto Conservación de Suelos*. San Lorenzo, Paraguay : MAG - GTZ, DEAG. 40 p.
- Díaz-Rossello, R. y Durán, H. (2011). Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola-lecheros mixtos en Uruguay. *Agrociencia*, 15 (2), 109-119.
- Eberlein, C., Heuer, H., Vidal, S. & Westphal, A. (2016). Microbial Communities in *Globodera pallida* Females Raised in Potato Monoculture Soil. *Phytopathology* 106(6), 581-90.
- Souza, E. D. de, Costa, S.E.V.G.A., Anghinoni, I., Carneiro, M. A. C., Martins, A. P. & Bayer, C. (2014). Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long-term tillage systems. *Soil Till. Res.* 139, pp. 28-36.
- Fisher, R. F. & Binkley, D. (2000). *Ecology and Management of Forest Soils*. 3a ed. New York : John Wiley & Sons Inc, 489 p.
- Fink, J. R., Inda, A. V., Bavaresco, J., Almeida, J. A. de, Bissani, C. A., Giasson, E. & Nascimento, P. C. do. (2014). Chemical and mineralogical changes in a Brazilian Rhodic Paleudult under different land use and managements. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38, 1304-1314.
- Fink, J. R., Inda, A. V., Bavaresco, J., Barrón, V., Torrent, J. & Bayer, C. (2016). Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil Tillage Res.* 155, 62-68.
- Ghaemi, M., Astaraei, A. R., Emami, H., Nassiri Mahalati, M. & Sanaeinejad, S. H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds- east of Mashhad- Iran. *J. Soil Sci. Plant Nut* 14 (4), 987-1004.
- Hahn E. y Fioretto C. (2017). Fertilidad de los suelos de la Región Oriental. In: E. Hanh (Ed.) *Diagnóstico de la Fertilidad de los suelos de la Agricultura Familiar paraguaya* : Región Oriental. Asunción : Atlas, p. 177-191.
- Hevia, G. G., Mendez, M. & Buschiazzo, D. E. (2007). Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma* 140 (1-2), 90-96.
- Jackson, M. L. (1976). *Análisis químico de suelos*. Barcelona : Omega. 662 p.
- Karayel, D. (2009). Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil Till. Res.* 104 (1), 121-125.
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A. & Piñeros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous. *Annual Review of Plant Biology* 55, 459-493.

- Lesmo Duarte, N. D., da Costa, J. S., Villalba González, M. y Lesmo Duarte, C. R. (2017). Competitividad de la soja y la carne bovina en Paraguay. *Investig. Agrar.* 19(2), 86-92. <http://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/353/372>
- Li B.Y., Zhou D.M., Cang L., Zhang H.L., Fan X.H. & Qin S.W. (2007). Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications. *Soil and Tillage Research* 96 (1-2), 166-173.
- Liao, H., Wan, H., Sha, J., Wang, X., Yan, X., y Kochian, L. (2006). Phosphorus and Aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system. *Plant Physiology*, 141, 674-684.
- Martins, A. P., Andrade Costa, S.E.V.G. de, Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Balerini, F., Cecagno, D. & Carvalho, P.C.F. (2014). Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. *Agric. Ecosyst. Environ.* 195, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.012>.
- Martins, A. P., Cecagno, D., Borin, J. B. M., Arnuti, F., Lochmann, S.H., Anghinoni, I., Bissani, C. A., Carvalho, P. C. F. (2016). Long-, medium- and short-term dynamics of soil acidity in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 104 (1), 67-77. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9759-5>.
- Martins, A. P., de Oliveira Denardin, L. G. de, Tiecher, T., Moraes Borin, J. B., Schaidhauer, W., Anghinoni, I. ... Kumar, S. (2020). Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. *Geoderma* 359. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113986>
- Martínez, J., Cajas, Y. S., León, J. D. & Osorio, N. W. (2014). Silvopastoral Systems Enhance Soil Quality in Grasslands of Colombia. *Applied and Environmental Soil Science*, 1-8. [10.1155/2014/359736](https://doi.org/10.1155/2014/359736)
- Novelli, L., Caviglia, O. & Melchiori, R. (2011). Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167, 254-260.
- Powlson D. s., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sánchez, P.A. y Cassman, K. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 4 (8), 678-683.
- Pietsch K. A., Ogle, K., Cornelissen, J. H. C., Cornwell, W. K., Bönisch, G., Craine, J.M., Zanne, C. (2014). WirthGlobal relationship of wood and leaf litter decomposability: the role of functional traits within and across plant organs. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 23, 1046-1057. [10.1111/geb.12172](https://doi.org/10.1111/geb.12172)
- Pramod Jha., Hati., K.M., Dalal., Ram C., Dang., Y. P., Kopittke., P. M. & Menzies, N. W. (2020). Soil carbon and nitrogen dynamics in a Vertisol following 50 years of no-tillage, crop stubble retention and nitrogen fertilization. *Geoderma*, 358. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113996>
- Porta, J., López-Acevedo, M. & Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid : Mundi-Prensa.
- Quinteiro Ribeiro, M. A., Furtado de Almeida, A.-A., Schramm Mielke, M., Pinto Gomes, F., Viana Pires, M. & Baligar, V. C. (2013). Aluminum effects on growth photosynthesis and mineral nutrition of cacao genotypes. *Journal of Plant Nutrition* 36 (8), 1161-1179.
- Ramachandran Nair, P. K., Mohan Kumar, B., Kumar, B. & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172 (1), 10-23.
- Rivera Méndez, Y., Moreno Chacón, L., Herrera Corzo, M. & Romero Angulo, H. M. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Palmas* 37 (1), 11-23.
- Ruiz Díaz Arce, G. A. y Cabral López, M. A. (2018). Comercio bilateral entre Paraguay y Estados Unidos: un análisis de su desarrollo en el periodo 1994-2016. *Revista Relaciones Internacionales. Escuela de Relaciones Internacionales*, 91 (2).
- Raij, B. Van, Andrade, J. C. De, Cantarella, H. é Quaggio, J. A. (Ed.). (2001). *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas: IAC.
- SAS Institute Inc. (2007). *SAS OnlineDoc® 9.2*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Zhang, S.X., Wang, X.B. & Jin, K. (2001). Effect of different N and P levels on availability of zinc, copper, manganese and iron under arid conditions. *Plant Nutr. Fert. Sci.* 7, 391-396.
- Sá J. C. M., Cerri, C. C., Dick, W. A., Lal, R., S. Venske Filho, Piccolo, M. C. y Feigl, B. J. (2001). Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 1486-1499.
- Pozzi Jantalia, C., Pereira Dos Santos, H., Boddey, R., Alves, B. J. R., Urquiaga, S. & Kohham, R. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil Till Res* 76 (1), 39-58.
- Vallejos, F., Kliewer, I., Florentín, M. A., Casaccia, J., Calegari, A. y Derpsch, R. (2001). *Abonos verdes y rotación de cultivos en siembra directa. Sistemas de producción tractorizados. Proyecto Conservación de Suelos MAG - GTZ, DEAG*. San Lorenzo, Paraguay. 85 p.
- Vallejo, V. E., Roldán, F. & Dick, R. P. (2012). Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest in Colombia. *Biology and Fertility of Soils* 46 (6), 577-587. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0466-8>
- Walkley, A. é Black, I. A. (1946). A examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-38.