

IMPACTO DEL PASTOREO EN PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE UN PSAMMACUENT EN PASTIZALES DEL NORDESTE ARGENTINO

The impact of grassland management on physical and chemical properties of a psammaquent in northeastern Argentina

Kurtz, D.¹, Rey Montoya, S.^{2,3}, Ybarra, D.^{2,4}, Grancic, C.² y Sanabria, C.²

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Grupo Recursos Naturales. Estación Experimental Corrientes

RESUMEN

Los pastizales naturales cubren gran parte del Nordeste Argentino y son la principal fuente de forraje del ganado. Cada vez hay más cuestionamientos a la ganadería tradicional y su impacto sobre el ambiente. El manejo holístico (MH) pregona alternativas sustentables de gestión de los pastizales para evitar su degradación, caracterizado principalmente por el manejo controlado del pastoreo. En este trabajo evaluamos el impacto del MH sobre propiedades físico-químicas de suelos arenosos francos, clasificados como *Psammaquent típico*. Se compararon suelos de pastizales naturales bajo pastoreo continuo (PC), MH reciente (2 años) y MH prolongado (4 años). No se encontraron cambios significativos en el pH, ni en la estabilidad estructural ni en la densidad aparente del suelo, debido al MH, pero sí una disminución de la conductividad eléctrica en la capa superficial del suelo. Sin embargo, el MH produjo mejoras significativas en la mayoría de las propiedades químicas del suelo aquí estudiadas (carbono y nitrógeno total del suelo y fósforo disponible). Por su importancia en la mitigación del cambio climático, uno de los resultados más importantes fue el incremento cercano al 25% del carbono y nitrógeno total del suelo, comparado con PC. A su vez, en los tratamientos de MH, el fósforo disponible en superficie se duplicó, aunque disminuyó con la profundidad. Sería conveniente estudiar si la tendencia que manifiestan las mejoras en las propiedades del suelo aquí estudiadas persiste, se detiene o se incrementa a través del tiempo.

Palabras clave. manejo holístico, secuestro de carbono, sustentabilidad.

SUMMARY

Natural grasslands cover most of the Northeast of Argentina and are the main source of feed for livestock. Currently, traditional grazing management are under review because of its impact on the environment. Holistic management (MH) was proposed as a sustainable alternative to avoid grassland degradation, by focusing on grazing management. In this work, we evaluate the impact of MH on physical and chemical properties of a sandy loam soil, classified as *Typic Psammaquent*. Natural grassland soils under continuous grazing (PC) were compared to soils under recent MH (2 years) and longer MH adoption (4 years). MH produced neither significant change in pH, nor in soil structural stability and bulk density. Nevertheless, the soil electric conductivity, in the upper soil horizon, was lower than in the PC. However, most of the soil chemical properties improved significantly because of MH (i.e. soil total carbon and nitrogen and available phosphorus). Due to its importance for climate change mitigation, one of the most important results was the increase of nearly 25% in total soil carbon and nitrogen. Finally, yet importantly, the surface available phosphorus in MH was doubled, compared to PC, although it decreased with soil depth. This research points out to the need for deeper studies to establish whether the trend shown by the soil properties persists, stops, or increases over time.

Key words. carbon sequestration, grasslands, holistic management, sustainability.

Recibido: agosto 2020

Aceptado: diciembre 2020

¹PhD, MSc, Ingeniero Agrónomo. kurtz.ditmar@inta.gob.ar

^{2,3}Dra, Ingeniera Agrónoma. ^{2,4}MSc, Ingeniero Agrónomo. ³Ingenieras Agrónomas

Introducción

En la región Nordeste de la Argentina (NEA) los pastizales naturales cubren alrededor del 40% del área total y están compuestos por especies estivales, principalmente gramíneas C₄, que crecen activamente desde la primavera hasta el otoño. El manejo tradicional del ganado básicamente contempla, el pastoreo continuo y la carga animal fija que determina sobrepastoreo en algunas situaciones y sub-pastoreo en otras. En los últimos años, se comenzaron a considerar nuevas alternativas de gestión adaptativa y sustentable de los pastizales, que consideren entre otros aspectos, la salud del suelo (Teague et al., 2016; Derner et al., 2018). Entendiéndose por salud edáfica al estado de las propiedades dinámicas del suelo en un momento determinado, éstas son aquellas en las que los cambios son visibles en el corto plazo, como ser contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, estabilidad estructural, biomasa y actividad microbiana (Porta et al., 2013).

El manejo holístico (MH) según Savory (1983) es un marco conceptual donde la toma de decisiones requiere de un continuo monitoreo de variables económicas, sociales y ambientales. El MH busca entender el funcionamiento del ecosistema, para ello se piensan y planifican las decisiones (incluso con la participación de todo el personal) y se evalúan los resultados buscando la mejora continua. Los principios del MH fueron desarrollados a lo largo de décadas de trabajo con productores y técnicos de distintas partes del mundo (Savory y Butterfield, 2016). La planificación holística del pastoreo es un proceso que permite lidiar con la complejidad de los sistemas ganaderos (Butterfield, 2006). El procedimiento planificado del pastoreo intenta imitar el comportamiento de los herbívoros silvestres en presencia de predadores, que se agrupan y tienden a mantenerse en movimiento, lo que genera una alternancia de pulsos de pastoreo y descanso. En el MH se planifican descansos de acuerdo con el tiempo requerido por las plantas para recuperarse del pastoreo anterior en base a la disponibilidad de la oferta forrajera. El MH también busca aprovechar eficientemente y de manera sustentable la biomasa producida por los pastizales, evitando descansos muy largos o cortos, que puedan afectar la sustentabilidad productiva del pastizal. En pastizales naturales del Nordeste Argentino (Provincia de Corrientes) hay estudios que han demostrado que, el pastoreo de pulsos utilizado de manera apropiada genera beneficios en la productividad del pastizal y una reducción de la biomasa muerta seca en pie (Kurtz et al., 2016); además de preservar la diversidad vegetal (Kurtz et al., 2018). Sin embargo, son escasos los estudios del efecto del MH en el suelo (Kurtz, 2016) y debido a la diversidad edáfica de la región (Escobar et al., 1996), es conveniente estudiar los impactos considerando el tipo de suelo, ya que las prácticas de manejo del pastizal pueden actuar en forma disímil según las diferencias en los tipos de suelo (Xu et al., 2018).

La mayor parte de los pastizales del mundo están sometidos a la presión ejercida por el pastoreo de los

animales. La adecuada gestión del pastoreo es crucial ya que el sobrepastoreo excesivo, que no contempla los tiempos de recuperación de la vegetación, puede afectar la sostenibilidad de la producción ganadera en el largo plazo (Sato et al., 2019). El suelo es parte del ecosistema, por lo que mantener o mejorar sus propiedades es fundamental para conservar los niveles productivos y la provisión de servicios ecosistémicos. Según Casco et al. (2019) sería factible favorecer a las especies con mejor valor forrajero incrementando la presión de pastoreo, a su vez el sistema de pastoreo influye en la productividad del pastizal. En consecuencia, esto podría producir tanto efectos positivos como negativos en las propiedades del suelo. Hay estudios que indican que el pastoreo rotativo gestionado adecuadamente, mantiene el suelo cubierto a través de la acumulación del material en superficie (Jacobó et al., 2006), lo que aporta a incrementar no solo la estabilidad estructural del suelo, sino también el carbono orgánico del mismo (Teague et al., 2011). En recientes revisiones bibliográficas, se indicó que por diferencias en el manejo del pastoreo se producen tasas de secuestro de carbono (C) muy variables, de entre 0 y 4,2 t de C ha⁻¹ año⁻¹ (Tessema et al., 2020; Xu et al., 2018). Adicionalmente, el pastoreo parece tener un impacto relativamente inmediato sobre los nutrientes y propiedades edáficas (Sato et al., 2019). Sin embargo, hay evidencias que indican que el efecto del pastoreo no influye ni en la densidad aparente (Sato et al., 2019; Teague et al., 2011), ni en la estabilidad estructural (Amorim et al., 2020); aunque se hallaron cambios en el pH, la conductividad eléctrica y el fósforo disponible (P) (Amorim et al., 2020). Por lo tanto, los resultados de las variaciones edáficas bajo los distintos sistemas de pastoreo, en distintas partes del mundo, son aparentemente controversiales. Además, el uso de algunas herramientas del MH y del pastoreo rotativo han sido también frecuentemente cuestionadas (Carter et al., 2014; Teague et al., 2011). No obstante, hay evidencias de que el pastoreo de pulsos, con altas cargas, estimula la producción de forraje (Cromsigt y Olf, 2008; Hempson et al., 2015; McNaughton, 1984; Kurtz et al., 2016) lo que supone un efecto positivo y deseado en sistemas pastoriles.

En el contexto de este trabajo, el MH incluyó cambios en el apotramiento y como consecuencia cambios tanto en el tiempo de pastoreo, como en el tiempo de recuperación del pastizal, lo que se tradujo en cambios en la carga animal invernal y en la carga animal instantánea. El objetivo general de este trabajo consistió en aportar conocimientos sobre el manejo sustentable de los pastizales naturales en Corrientes, mientras que los objetivos específicos se vincularon en determinar los efectos del MH sobre las principales propiedades físico-químicas de uno de los suelos de mayor distribución en la provincia de Corrientes, *Psammacuent típico*, serie Chavarría. Esta serie presenta suelos de muy baja fertilidad, arenosos francos (> de 80% de arena), de muy baja capacidad de intercambio catiónico (< a 3 cmol.c.kg⁻¹), de muy bajo contenido de carbono orgánico (< a 0,5%), con trazas de fósforo y susceptibles a excesos

estacionales de agua por saturación del perfil al elevarse las napas freáticas. Se ha calculado que esta serie ocupa alrededor de 300000 has en Corrientes (Escobar et al., 1996). Debido a su fragilidad, cualquier cambio en el uso de este tipo de suelo podría provocar cambios irreversibles, atentando contra la sustentabilidad del sistema. La hipótesis propuesta fue que a través de MH de pastizales sobre suelos arenosos francos se mantiene e incluso mejoran las propiedades edáficas tanto en superficie como en profundidad evitando la degradación del recurso.

Materiales y Métodos

El trabajo fue desarrollado en la Estancia Rincón de Corrientes, localizada en el departamento Concepción, Corrientes (Figura S1). Todos los tratamientos se localizaron en pastizales naturales de similar composición florística. El tapiz vegetal se caracteriza por pastos que crecen en forma de matas, donde la paja colorada (*Andropogon lateralis*) y *Rhynchospora tenuis* son las especies dominantes, mientras que en la intermata dominan especies como *Axonopus* sp. y *Paspalum notatum* (Carnevali, 1994). En general, los pastizales localizados en la zona poseen una productividad promedio de 4000 kg de MS ha.año⁻¹ (Casco et al., 2019). Son de los pastizales más productivos de la provincia, que, por la acción de una capa de agua no salina cerca de la superficie, prácticamente no sufren déficits hídricos. El MH en el sitio de estudio comenzó en noviembre de 2013, incorporándose un nuevo sector en el año 2015. La planificación del manejo y los ajustes de carga se realizaron dos veces al año, una al comienzo de la estación de activo crecimiento (octubre) y la otra al comienzo de la estación de escaso crecimiento (abril). En este trabajo se evaluaron 3 tratamientos, con 3 repeticiones distribuidas en una misma comunidad vegetal. En cada tratamiento, las repeticiones corresponden al mismo circuito de manejo del pastoreo, perteneciendo a diferentes potreros, alejados al menos 1 km entre sí, y al menos 3 km entre tratamientos.

Los tratamientos evaluados fueron: (i) campo natural (comunidad en pseudo-climax) bajo manejo de pastoreo continuo tradicional (PC), (ii) campo natural bajo manejo de pastoreo holístico reciente con 2 años de implementado (holístico nuevo, HN) y (iii) campo natural con manejo del pastoreo holístico en proceso de estabilización, implementado hace 4 años (holístico viejo, HV). Todos los tratamientos se localizaron en el paisaje de planicies arenosas, a la misma elevación sobre el nivel del mar (63 metros sobre el nivel del mar) y sobre suelos pertenecientes a la serie Chavarría (*Psammacuent típico*) (Escobar et al., 1996; Navarro de Rau y Kurtz, 2019). La serie Chavarría presenta un epipedón ócrico, arenoso franco, débilmente estructurado con predominio de bloques subangulares débiles y granos sueltos de arena, poroso, de color pardo amarillento en húmedo; con manchas orgánicas provenientes de la descomposición de raíces finas, localizadas en toda el área del horizonte. Entre 65 a 80 cm se detecta el horizonte Cg que es arenoso franco, pardo claro, saturado con agua no salina, de colores gley, sin estructura,

con masas no cementadas de hierro y áreas localizadas de pérdida de arcillas y hierro por lavado. A partir de los 80 cm y a través de un límite abrupto se encuentra un horizonte argílico (2Btbg), franco arcillo arenoso, moderadamente estructurado, plástico y ligeramente adhesivo, con escasas plintitas y vetas gleizadas amarillentas. Esta discontinuidad litológica hace que se forme una capa de agua estacional.

La implementación de los tratamientos bajo MH implicó un mayor número de potreros, un mayor tiempo de recuperación del pastizal, una disminución del tiempo de pastoreo y un aumento de la carga total e instantánea (Cuadro 1). La carga animal se ajustó anualmente en todos los tratamientos realizando una evaluación de disponibilidad forrajera mediante cortes de biomasa y por el método Botanal, que estima la biomasa de las especies que componen el pastizal (Tohill et al., 1978). La asignación de la carga animal se ajustó a la disponibilidad de forraje antes del inicio del período invernal (Sampedro, 2013). El criterio de definición de días de descanso y recuperación siguió la siguiente dinámica: un pastoreo más rápido en primavera, para controlar ápices reproductivos y otro más lento en verano, para acumular forraje diferido para el invierno. Se comenzó con 70-140 días, pero a través del monitoreo de la condición animal se llegó a la conclusión de que estos tiempos eran demasiado largos y la calidad forrajera disminuía, debido a ello se decidió bajar el tiempo de recuperación a 55-110 días. En la primavera de 2018 el tratamiento HV se subdividió con alambres eléctricos, lo cual redujo considerablemente los tiempos de pastoreo y aumentó la densidad de los animales (Cuadro 1).

Las muestras de suelo fueron tomadas en octubre del 2018 con un calador de acero inoxidable, entre las matas del pastizal, a partir de 5 muestras compuestas para cada una de las repeticiones, y cada una a 2 profundidades (0-10 y 10-30 cm). La metodología del estándar seguido para los muestreos de suelo establece estos estratos (Borrelli et al., 2012) y está relacionado a la zona de mayor crecimiento de raíces. El muestreo se realizó en 9 estaciones, ubicadas hacia el exterior de una transecta fija, a 5 m de distancia perpendicular de cada estaca numerada. Las muestras se procesaron y analizaron siguiendo las normas de Calidad IRAM y normas consensuadas por la Red de Interlaboratorios de Suelos, Aguas y Vegetales (RILSAV) de INTA. El acondicionamiento de éstas se inició con el secado al aire, seguido de molido y tamizado excepto para las determinaciones de estabilidad estructural y densidad aparente, las cuales además fueron tomadas de manera diferente que para las restantes variables. La densidad aparente (dap) se determinó por duplicado con el método del cilindro, extrayendo las muestras en el campo con un cilindro de acero inoxidable de volumen conocido, para posterior determinación de la masa seca mediante secado en estufa a 105°C hasta peso constante. La estabilidad estructural de los suelos se determinó con el método de Le Bissonnais (1996). Con este método se obtuvo el diámetro medio ponderado de agregados estables. Se utilizaron muestras no disturbadas, tomadas de los primeros 20 cm del

Cuadro 1. Atributos descriptivos del manejo del pastoreo en los tratamientos aplicados: pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV). El muestreo de suelos fue realizado en la primavera de 2018.

Table 1. Descriptive attributes of the evaluated grazing management: continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV). Soil sampling was done in the spring of 2018.

Atributo	Tratamiento	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18	2018/19
Cantidad de potreros	PC	1	1	1	1	1	1
	HN	1	1	5	5	5	5
	HV	6	6	6	6	11	22
Tiempo de recuperación del pastizal* (días)	PC	0	0	0	0	0	0
	HN	0	0	70-140	55-110	55-110	55-110
	HV	70-140	70-140	70-140	55-110	55-110	55-110
Tiempo de pastoreo (días)	PC	180	180	180	180	180	180
	HN	180	180	17,5-35	13,7-27,5	13,7-27,5	13,7-27,5
	HV	14-28	14-28	14-28	9-18	3,2-6,4	3,2-6,4
Carga animal invernada (EV/ha)	PC	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	HN	0,55	0,55	0,55	0,61	0,69	0,69
	HV	0,55	0,69	0,88	0,93	0,82	0,84
Carga instantánea (EV/ha)	PC	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
	HN	0,55	0,55	0,55	3,00	3,30	3,30
	HV	3,3	4,20	5,20	5,60	4,90	15,20

*Se refiere al rango de tiempo especificado en días, en que el pastizal permanece en descanso sin pastoreo. La duración depende de la época, el descanso es mayor durante la época de escaso crecimiento y menor en la de activo crecimiento. EV, se refiere a equivalente vaca.

* It refers to the resting time under no grazing, expressed in days. Grazing time depends on the season, it is longer during the winter than in summer. EV refers to equivalent cow units.

suelo. El resultado fue expresado bajo la forma de diámetros medios ponderados, donde: valores menores a 0,4 mm representan agregados muy inestables; entre 0,4-0,8 mm, inestables; entre 0,8-1,3 mm, medianamente estables; de 1,3-2 mm, estables y mayores a 2 mm, muy estables. En estos suelos con más del 80% de arena, era poco probable encontrar agregados estables. Sin embargo, para extraer suelo inalterado, procedimos a usar una pala estándar (de 20 cm de hoja) abarcando el horizonte A, donde tiene el máximo desarrollo de raíces y donde uno esperaría cambios en la estabilidad. Se decidió analizar los agregados de esa única profundidad, sin dividirla más para que no se altere excesivamente la muestra y que no se deterioren innecesariamente los agregados. El pH se analizó por el método potenciométrico, con una relación suelo: agua de 1:2,5. La conductividad eléctrica (CE) fue determinada por conductimetría, utilizando una relación suelo: agua 1:2,5 y expresada en dS. m⁻¹. El fósforo disponible (P ASIM; ppm) se determinó mediante la metodología de Bray & Kurtz I (IRAM 29570-1). El carbono total (CT) y nitrógeno total (NT) se determinaron mediante el analizador de carbono y nitrógeno marca LECO Truspec, basado en la combustión completa e instantánea de la muestra en una atmósfera de oxígeno puro a 950 – 1400°C. Se estimó el stock de carbono multiplicando el valor de carbono por la densidad aparente expresándolo en t.ha⁻¹. Por otro lado, se realizó la descripción completa del perfil del suelo en calicatas en cada tratamiento siguiendo como guía el libro de Campaña para

Descripción y Muestreo de Suelos del Instituto de Suelos (CIRN-INTA). Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante ANOVA. Las comparaciones de las medias se efectuaron mediante la prueba LSD (p<0,05). Se empleó el programa InfoStat (Di Rienzo et al., 2018).

Resultados

Al analizar la dap no se detectaron diferencias significativas por efecto de los tratamientos (p>0,05), ni en superficie (PC 1,3 g.cm⁻³ ± 0,02 = HN 1,3 g.cm⁻³ ± 0,04 = HV 1,29 g.cm⁻³ ± 0,02), ni en profundidad (PC 1,58 g.cm⁻³ ± 0,02 = HN 1,56 g.cm⁻³ ± 0,02 = HV 1,54 g.cm⁻³ ± 0,01). Los valores de diámetro medio ponderado de agregados estables presentaron una tendencia positiva bajo HN y HV en comparación a PC, sin embargo, las diferencias no resultaron estadísticamente significativas (p=0,1304; Figura 1). Tampoco el pH registró cambios significativos por efectos de los tratamientos (p>0,05), en superficie los valores de pH fueron: PC 5,50 ± 0,03, HN 5,48 ± 0,03 y HV 5,51 ± 0,06, mientras que en profundidad fueron: 5,74 ± 0,05 para PC, 5,78 ± 0,05 para HN y 5,65 ± 0,04 para HV. Con respecto a la CE, en superficie, los tratamientos PC y HN presentaron valores significativamente (p<0,05) más altos (>0,06 dS.m⁻¹) que HV (0,04 dS.m⁻¹), siendo que en profundidad todos los tratamientos presentaron valores muy bajos y similares entre sí (Figura 2).

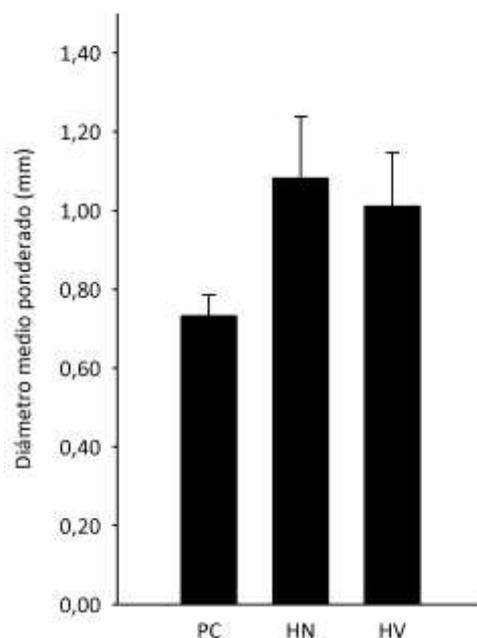


Figura 1. Diámetro medio ponderado (mm) de agregados estables en el suelo a una profundidad de 0-20 cm, según tratamientos: pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV). Los valores son medias + 1 error estándar. Ausencia de letras indica que no hay diferencias significativas.

Figure 1. Diameter of soil stable aggregates under continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV). All data at a depth of 0-20 cm. The means + 1 standard error, no letters indicate no significant differences.

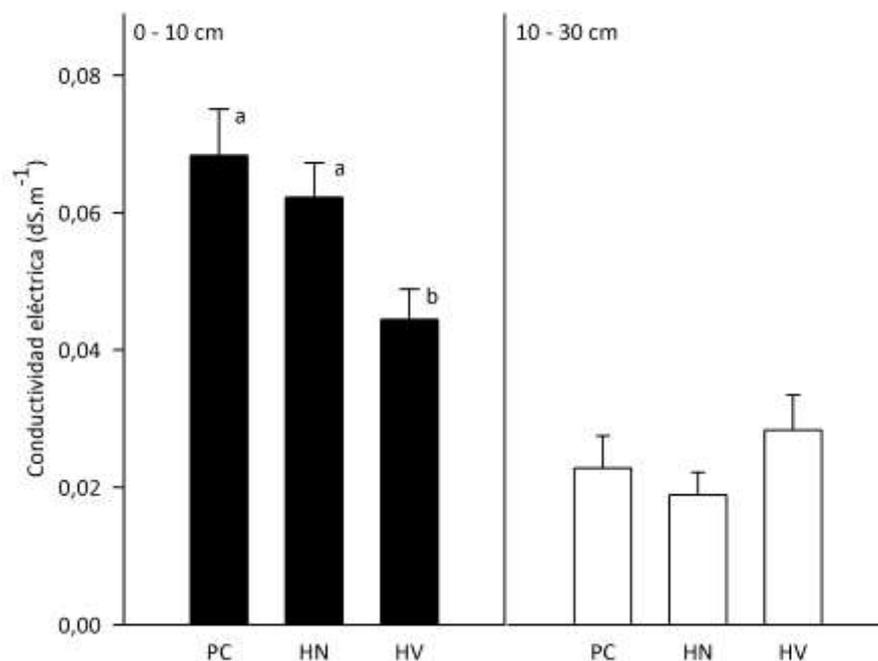


Figura 2. Conductividad eléctrica del suelo (CE) bajo distintos tratamientos: pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV), según la profundidad de 0-10 y de 10-30 cm. Los valores son medias + 1 error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) dentro de cada profundidad de suelo, ausencia de letras indica que no hay diferencias significativas.

Figure 2. Soil electric conductivity (EC) under continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV). Data were collected at 0-10 and 10-30 cm depth. The means + 1 standard error. Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) within each soil depth, no letters indicate no significant differences.

El porcentaje de CT en superficie presentó diferencias significativas en el siguiente orden: HV (1,01%) > HN (0,88%) > PC (0,78%). El mismo orden se halló de 10-30 cm de profundidad, donde el CT (%) presentó diferencias significativas ($p < 0,05$): HV (0,77%) > HN (0,68%) > PC (0,58%) (Cuadro 2). Con respecto al NT se observaron diferencias ($p < 0,05$) entre tratamientos y según la profundidad de muestreo. NT en superficie presentó diferencias significativas en el siguiente orden: HV (0,11%) > HN (0,10%) > PC (0,09%), y a mayor profundidad presentó las diferencias significativas de la siguiente manera: HV (0,08%) > HN (0,07%) > PC (0,06%) (Cuadro 2). Por otro lado, el mayor contenido de P ASIM en superficie se detectó en HV (4,7 ppm), significativamente más alto que en HN y PC (3,19 y 2,62 ppm respectivamente). A mayor profundidad todos los

tratamientos presentaron valores muy bajos de P ASIM, pero en HV los niveles fueron significativamente más bajos (0,45 ppm) que en HN y PC (0,87 y 0,85 ppm respectivamente) (Cuadro 2).

Finalmente, el stock de C ($t \cdot ha^{-1}$) se incrementó por efecto de los tratamientos (Figura 3). Éste en superficie no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) entre HV (12,77 $t \cdot ha^{-1}$) y HN (11,96 $t \cdot ha^{-1}$), pero ambos presentaron mayor stock que PC (10,2 $t \cdot ha^{-1}$) ($p < 0,05$). También a mayor profundidad el stock de C presentó diferencias significativas por el efecto del tratamiento. Los tratamientos HV (23,07 $t \cdot ha^{-1}$) y HN (21,25 $t \cdot ha^{-1}$) no se diferenciaron entre ellos, pero ambos presentaron mayor stock que PC (17,38 $t \cdot ha^{-1}$) ($p < 0,05$).

Cuadro 2. Concentración de carbono (C) y nitrógeno total (N) y fósforo asimilable (P ASIM) del suelo en los diferentes tratamientos: pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV).

Table 2. Soil organic carbon (C), soil nitrogen (N) and soil assimilable phosphorus (P ASIM) under continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV).

Tratamiento / profundidad	Variables					
	CT (%)		NT (%)		P ASIM (ppm)	
0-10 cm						
PC	0,78 ± 0,28	c	0,09 ± 0,002	c	3,19 ± 0,28	b
HN	0,88 ± 0,03	b	0,10 ± 0,002	b	2,62 ± 0,25	b
HV	1,01 ± 0,02	a	0,11 ± 0,002	a	4,70 ± 0,81	a
10-30 cm						
PC	0,58 ± 0,02	c	0,06 ± 0,002	c	0,85 ± 0,02	a
HN	0,68 ± 0,03	b	0,07 ± 0,002	b	0,87 ± 0,10	a
HV	0,77 ± 0,02	a	0,08 ± 0,002	a	0,45 ± 0,06	b

Los valores son medias ± 1 error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) dentro de cada profundidad de suelo, ausencia de letras indica que no hay diferencias significativas.

The means ± 1 standard error. Different letters indicate significant differences ($p < 0,05$) within each soil depth, no letters indicate no significant differences.

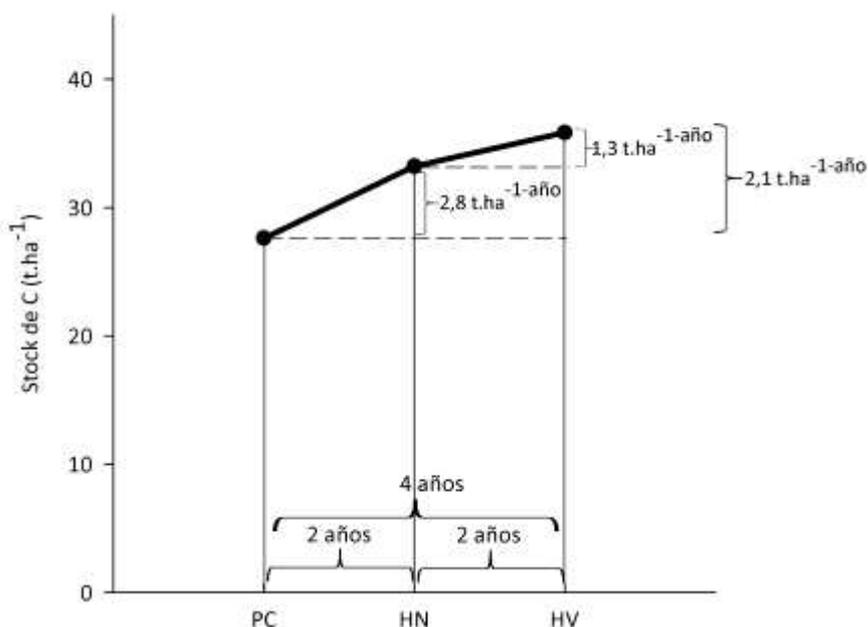


Figura 3. Stock de carbono de 0 a 30 cm ($t.ha^{-1}$) bajo distintos tratamientos: pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV).

Figure 3. Soil carbon stock up to 30 cm ($t.ha^{-1}$) in continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV).

Discusión

La comprensión de los impactos que producen los diferentes regímenes de pastoreo sobre la condición del suelo es limitada (Sato et al., 2019). La dap permite evaluar la compactación y el espacio poroso del suelo, lo que a su vez puede alterar el crecimiento de las raíces, el movimiento de los gases y el agua en el suelo. Esta propiedad edáfica estuvo dentro de límites considerados “normales” para la textura arenosa-franca predominante en estos suelos. La dap registrada en superficie fue 17% más baja que en profundidad, debido a la estratificación genética natural del suelo. El suelo no sufrió incrementos significativos cuando los lotes se destinaron al MH en ninguna de las profundidades estudiadas, probablemente por la elevada proporción de arena de estos suelos (>80%) y su escasa agregación. Otros autores también indicaron que la dap se modifica por el sistema de manejo de pastizal (Teague et al., 2011; Kurtz, 2016; Sato et al., 2019; Amorim et al., 2020), sin embargo, no coinciden con los resultados aquí detectados. Chen et al. (2015) quienes evaluaron los efectos del pastoreo en suelos franco-arenosos tampoco encontraron diferencias en la dap y lo atribuyeron a la relativamente corta duración de la alta carga instantánea. Con respecto a la estabilidad de agregados, en un *Psammocent* sería poco probable encontrar agregados estables ya que poseen más del 80% de arena y por ende muy poco material agregante. Sin embargo, observamos una tendencia de mejor estabilidad estructural en HN y HV respecto a PC.

Entendemos que esta tendencia a la agregación del suelo estaría influenciada por la acción natural de sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes de la actividad microbiana (Soil Science Society of America, 1997; Teague et al., 2011). Estudios anteriores indican una correlación positiva entre la estabilidad estructural, el C orgánico y la actividad microbiana del suelo (Milne y Haynes, 2004), lo que nos lleva a esperar mejoras en la estabilidad de agregados con el paso del tiempo por el efecto del MH.

Con relación al pH, éste indica la actividad de los iones de hidrógeno y es uno de los indicadores más importantes de la calidad del suelo. En todos los tratamientos el pH fue menor en superficie que en profundidad; y hasta el momento del muestreo, el MH no produjo cambios significativos en el pH del suelo. Evidencias recientes indican que el pastoreo tiene muy poca influencia en el pH del suelo (Abdalla et al., 2018). Debido a la baja proporción de arcilla, los resultados de este trabajo hacen suponer que los factores que mantuvieron el pH dentro del rango de variabilidad del suelo fueron, el humedecimiento casi permanente de éstos y el poder tampón asociado casi exclusivamente a la materia orgánica del suelo (Fassbender y Bornemisz, 1987). Por otro lado, con el incremento de la carga animal en HV y la mejor distribución de las deposiciones, no concentradas cerca de comederos o aguadas, muy comunes en sistemas de pastoreo continuo (Amorim et al., 2020; Sanderson et al., 2010), se esperaba un incremento en la fertilidad y por ende de la CE (Teague et al., 2011). Sin embargo, en la capa

superficial del suelo, se encontraron valores de CE significativamente más bajos, en HV comparado con HN y PC. No obstante, todos los valores de CE son muy bajos en el rango de suelos no halomórficos. Teague et al. (2011), señalaron cambios en algunos parámetros que influyen en la CE en el suelo (como el Na y Mg) comparando sistemas de manejo del pastizal, pero indicaron que no está clara la razón de estas diferencias. Este punto amerita mayor trabajo de investigación experimental.

Con respecto al P disponible, en estos suelos los valores normalmente son bajos y están en torno a 2 ppm (Escobar et al., 1996). En este trabajo se detectó que la concentración de P fue 3 veces más alta en superficie que en profundidad, y si bien los valores son bajos, en HV el incremento fue de casi el 100%. En sistemas de manejo tradicional del ganado, las áreas de concentración de la hacienda y por lo tanto de las deposiciones fecales, por lo general están en las proximidades de los comederos, aguadas y refugios naturales. Estas áreas de concentración se enriquecen con nutrientes, como el P ASIM (Sanderson et al., 2010), en comparación con las partes menos alteradas del pastizal. Casi el 60% del P ingerido por los animales regresa al suelo con las heces (Alvarez-Fuentes et al., 2016). La mayor concentración de P ASIM en HV (1,5 ppm, más alto que HN y 2 ppm, más alto que en PC) estaría indicando una mejor distribución de heces, asociado también a las fracciones de P orgánico que estarían siendo liberadas a través del proceso de mineralización. Contrariamente, el P ASIM de 10 a 30 cm fue más bajo en HV, posiblemente debido a la movilización de éste hacia el horizonte superior por mayor crecimiento radical (Teague et al., 2011).

Similarmente, el NT fue 33% más alto en superficie que en profundidad. Luego de 2 años de implementado el MH, NT fue 10% más alto que en PC y luego de 4 años 20% más alto. Por otro lado, en la profundidad de 10 a 30 cm, en relación con PC, NT fue 15% mayor en HN y 25% en HV. Posiblemente estos incrementos se deben a la mejor distribución de las deposiciones de los animales en HN y HV. En un trabajo reciente en Corrientes, en un suelo Argiudol acuico, también se detectó un incremento de CT y NT como respuesta al pastoreo de pulsos (Kurtz, 2016). Las concentraciones de CT disminuyeron con la profundidad del suelo coincidiendo con lo reportado por Conant et al. (2017). Capturar C en los suelos produce efectos ambientales positivos, se ha demostrado una relación positiva entre el C del suelo y la biodiversidad (Peri et al., 2019) y se ha señalado que su captura en el suelo aporta a mitigar los efectos del cambio climático (Xu et al., 2018). Para la capa superficial de suelo (de 0-10 cm), en HN el CT fue 12% más alto que en PC y en HV, un 23% más alto. De manera similar, en la profundidad de 10 a 30 cm, comparado con PC, CT fue 15% mayor en HN y 25% en HV.

Los resultados indican que el MH produce incrementos muy rápidos y significativos en el CT del suelo. Dada una determinada textura, la materia orgánica se acumula dependiendo del aporte que recibe el suelo hasta un punto de equilibrio (Matus y Maire, 2000). Los resultados de este

trabajo todavía no permiten afirmar si dicho equilibrio se ha alcanzado o no. Estudios recientes, confirmaron que los cambios en el stock de C en el suelo están estrechamente asociados con los cambios en la producción de raíces, como resultado de los cambios en el manejo del pastoreo (Chen et al., 2015). Por otro lado, el pisoteo, por aumento de carga en HV y en HN incorpora biomasa aérea al suelo (Kurtz et al., 2016), lo que aportó al incremento de C en suelo aquí registrado. En el suelo, CT y NT a menudo presentan una respuesta lineal y directa al manejo del pastoreo (Xu et al., 2018), sobre todo en zonas de clima húmedo y cálido (Abdalla et al., 2018). Las evidencias indicarían que la mayor cantidad de C (de diversa labilidad, no evaluada en este trabajo) estaría evitando la pérdida del N por lixiviación o desnitrificación, o inmovilizado por el aporte de material vegetal de una alta relación C/N, material lignificado, muerto y aplastado no consumido e incorporado al suelo por los animales. Estos resultados coinciden con trabajos anteriores donde se confirmó que la adición de rastrojos disminuyó la mineralización neta de N (Jin et al., 2013). Cabe aclarar que todavía es poco claro el motivo de que algunos suelos capturan más C que otros (Schmidt et al., 2011) y por lo tanto de la forma en que la captura puede ser modificada. En este estudio se confirmó que, en los potreros donde se aplicó el MH, hubo una mayor cantidad de C en el suelo, comparado con los potreros bajo manejo continuo tradicional (PC). En los primeros 10 cm de suelo, el incremento registrado fue de entre 1,7 a 2,5 t C.ha⁻¹ (en HN y HV respectivamente). De manera similar, en la profundidad de 10 a 30 cm, los incrementos están entre 3,87 y 5,69 t C.ha⁻¹ (HN y HV respectivamente), comparado con PC. Por lo tanto, la aplicación del MH significó, en este suelo, una captura de C edáfica que oscila entre 5,6 y 8,24 t C.ha⁻¹. Sin embargo la tasa de captura de C, no es constante a través del tiempo, al cabo de los 2 primeros años la tasa de captura fue de 2,8 t C.ha⁻¹año⁻¹, los dos últimos años fue de 1,3 t C.ha⁻¹ t.ha⁻¹año⁻¹. Mientras que si se consideran los 4 años desde su implementación, la tasa de captura fue de alrededor de 2,1 t C .ha⁻¹año⁻¹ (Figura 3). Apoya esta evidencia, un estudio reciente donde se encontró correspondencia entre la duración del estudio y la tasa de secuestro de C (Conant et al., 2017).

Conclusiones

En la región del Nordeste Argentino, los pastizales naturales desarrollados sobre suelos de textura arenosa franca (i.e. *Psammicuent*) en general son de baja fertilidad y susceptibles a la degradación por mal manejo, lo que condiciona y restringe fuertemente su uso. Para las condiciones de este estudio, el manejo holístico produjo mejoras significativas en propiedades químicas del suelo. Por su importancia en la mitigación del cambio climático unos de los resultados más importantes fue el incremento del carbono total y del nitrógeno total del suelo. Los tratamientos aplicados en este trabajo se localizaron bajo condiciones de suelo similares y como se encuentran bajo

las mismas condiciones climáticas, asumimos que las variaciones en las propiedades del suelo aquí expuestas se deben principalmente al sistema de pastoreo aplicado. A futuro, se recomiendan estudios más detallados que incluyan el análisis de las diferentes fracciones de la materia orgánica, para conocer la proporción de las fracciones más recalcitrantes y las más dinámicas (Liao et al., 2006). Asimismo, sería conveniente estudiar si la tendencia que manifiestan las propiedades aquí estudiadas persiste, se detiene o se incrementa a través del tiempo.

Agradecimientos

A Mercedes y Raymunda Falcón, y a Pablo Matteio por su trabajo en el laboratorio de suelos. A Pedro Insaurralde, Andrés Verón y Fabricio Barbadillo por la ayuda brindada durante la toma de muestras. A Pablo Borelli y Santiago Angelillo por las interesantes discusiones y aportes a este trabajo y al Establecimiento Rincón de Corrientes por los aportes económicos para realizarlo. A los atentos y adecuados comentarios de los revisores anónimos y el editor de la revista que ayudaron a mejorar la redacción de este trabajo.

Bibliografía

- ABDALLA, M., HASTINGS, A., CHADWICK, D.R., JONES, D.L., EVANS, C.D., JONES, M.B., REES, R.M. and SMITH, P. 2018. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 253: 62-81.
- ALVAREZ-FUENTES, G., APPUHAMY, J.A.D.R.N. and KEBREAB, E. 2016. Prediction of phosphorus output in manure and milk by lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 99: 771-782.
- AMORIM, H.C.S., ASHWORTH, A.J., MOORE, P.A., WIENHOLD, B.J., SAVIN, M.C., OWENS, P.R., JAGADAMMA, S., CARVALHO, T.S. and XU, S. 2020. Soil quality indices following long-term conservation pasture management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 301: 107060.
- BORRELLI, P., BOGGIO, F., STURZENBAUM, P., PARAMIDANI, M., HEINKEN, R., PAGUE, C., STEVENS, M. y NOGUÉS, A. 2012. Estándar de Pastoreo Regenerativo y Sustentable (GRASS), p. 117.
- BUTTERFIELD, J. 2006. *Holistic Management Handbook: Healthy Land, Healthy Profits*. Island Press, Washington, D.C. [u.a.].
- CARNEVALI, R. 1994. *Fitogeografía de la Provincia de Corrientes*. Cartas, Escalas 1: 500.000 Y 1: 1.000.000. Corrientes. Gobierno de la Provincia de Corrientes, INTA, 324 p.
- CARTER, J., JONES, A., O'BRIEN, M., RATNER, J. and WUERHNER, G. 2014. Holistic management: misinformation on the science of grazed ecosystems. *International Journal of Biodiversity*, Vol. 2014, 10 p.
- CASCO, J., F., GOLDFARB, M.C., GÁNDARA, F., ROBERTO y NUÑEZ, F. 2019. Características agronómicas de cuatro pastizales del centro norte de Corrientes-Argentina. Ediciones INTA, Corrientes. Argentina.
- CHEN, W., HUANG, D., LIU, N., ZHANG, Y., BADGERY, W.B., WANG, X. and SHEN, Y. 2015. Improved grazing management may increase soil carbon sequestration in temperate steppe. *Scientific Reports* 5: 10892.
- CONANT, R.T., CERRI, C.E.P., OSBORNE, B.B. and PAUSTIAN, K. 2017. Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications* 27: 662-668.
- CROMSIGT, J.P.G.M. and OLFF, H. 2008. Dynamics of grazing lawn formation: an experimental test of the role of scale-dependent processes. *Oikos* 117: 1444-1452.
- DERNER, J.D., SMART, A.J., TOOMBS, T.P., LARSEN, D., McCULLEY, R.L., GOODWIN, J., SIMS, S. and ROCHE, L.M. 2018. Soil health as a transformational change agent for US grazing lands management. *Rangeland Ecology & Management* 71: 403-408.
- DI RIENZO, J.A., CASANOVES, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L., TABLADA, M. y ROBLEDO, C.W. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- ESCOBAR, E.H., LIGIER, H.D., MELGAR, R., MATTEIO, H. y VALLEJOS, O. 1996. Mapa de Suelos de la Provincia de Corrientes 1:500.000. INTA, Corrientes.
- FASSBENDER, H.W. y BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica, IICA, nro. 81, 420 p.
- HEMPSON, G.P., ARCHIBALD, S., BOND, W.J., ELLIS, R.P., GRANT, C.C., KRUGER, F.J., KRUGER, L.M., MOXLEY, C., OWEN-SMITH, N., PEEL, M.J.S., SMIT, I.P.J. and VICKERS, K.J. 2015. Ecology of grazing lawns in Africa. *Biological Reviews* 90: 979-994.
- JACOBO, E.J., RODRÍGUEZ, A.M., BARTOLONI, N. and DEREGIBUS, V.A. 2006. Rotational grazing effects on rangeland vegetation at a farmscale. *Rangel. Ecol. Manag.* 59: 249-257.
- JIN, V.L., HANEY, R.L., FAY, P.A. and POLLEY, H.W. 2013. Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality. *Soil Biology and Biochemistry* 58: 172-180.
- KURTZ, D.B. 2016. Management of excess standing biomass in Argentinean grasslands to increase grass and livestock productivity. *Kommunikations-, Informations- und Medienzentrum der Universität Hohenheim, Hohenheim*. http://opus.unihohenheim.de/volltexte/2017/1309/pdf/Diss_KurtzD_ARG2016.pdf
- KURTZ, D.B., ASCH, F., GIESE, M., HÜSEBUSCH, C., GOLDFARB, M.C. and CASCO, J.F. 2016. High impact grazing as a management tool to optimize biomass growth in northern Argentinean grassland. *Ecological Indicators* 63: 100-109.
- KURTZ, D.B., GIESE, M., ASCH, F., WINDISCH, S.H. and GOLDFARB, M.C. 2018. Effects of high impact grazing on

- species diversity and plant functional groups in grasslands of Northern Argentina. *Sustainability* 10: 3153.
- Le BISSONNAIS, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European J. Soil Sci.* 47: 425-437.
- LIAO, J.D., BOUTTON, T.W. and JASTROW, J.D. 2006. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 3184-3196.
- McNAUGHTON, S.J. 1984. Grazing lawns: animals in herds, plant form, and coevolution. *Am. Nat.* 124: 863-886.
- MATUS, F. and MAIRE, C. 2000. Interaction between soil organic matter, soil texture and the mineralization rates of carbon and nitrogen. *Agricultura Técnica* 60: 112-126.
- MILNE, R.M. and HAYNES, R.J. 2004. Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures. *Biology and Fertility of Soils* 39: 172-178.
- NAVARRO de RAU, M.F. and KURTZ, D.B. 2019. Soils of Corrientes, The Soils of Argentina. Springer International Publishing, Cham, 175-183.
- PERI, P.L., LASAGNO, R.G., MARTÍNEZ PASTUR, G., ATKINSON, R., THOMAS, E. and LADD, B. 2019. Soil carbon is a useful surrogate for conservation planning in developing nations. *Scientific Reports* 9: 3905.
- PORTA, J., LOPEZ ACEVEDO, M. y POCH, R. M. 2013. Edafología. Uso y protección de suelos. Mundi-Prensa. 608 p.
- SAMPEDRO, D. 2013. Ajuste de la carga animal en rodeos de cría. Argentina. INTA, EEA Mercedes. Boletín Técnico Noticias y Comentarios, N°497, 4 p.
- SANDERSON, M.A., FELDMANN, C., SCHMIDT, J., HERRMANN, A. and TAUBE, F. 2010. Spatial distribution of livestock concentration areas and soil nutrients in pastures. *Journal of Soil and Water Conservation* 65: 180-189.
- SATO, C.F., STRONG, C.L., HOLLIDAY, P., FLORANCE, D., PIERSON, J. and LINDENMAYER, D.B. 2019. Environmental and grazing management drivers of soil condition. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 276: 1-7.
- SAVORY, A. 1983. The Savory grazing method or holistic resource management. *Rangelands* 5: 155-159.
- SAVORY, A. and BUTTERFIELD, J. 2016. Holistic management. A common sense revolution to restore our environment, 3rd ed. Island Press.
- SCHMIDT, M.W.I., TORN, M.S., ABIVEN, S., DITTMAR, T., GUGGENBERGER, G., JANSSENS, I.A., KLEBER, M., KÖGEL-KNABNER, I., LEHMANN, J., MANNING, D.A.C., NANNIPIERI, P., RASSE, D.P., WEINER, S. and TRUMBORE, S.E. 2011. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478: 49.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (SSSA). 1997. Glossary of Soil Science Terms 1996. Soil Science Society of America. Madison WI. 138 p.
- TESSEMA, B., SOMMER, R., PIIKKI, K., SÖDERSTRÖM, M., NAMIREMBE, S., NOTENBAERT, A., TAMENE, L., NYAWIRA, S. and PAUL, B. 2020. Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in East African countries: A review. *Grassl. Sci.* 66: 135-144.
- TEAGUE, W.R., APFELBAUM, S., LAL, R., KREUTER, U.P., ROWNTREE, J., DAVIES, C.A., CONSER, R., RASMUSSEN, M., HATFIELD, J., WANG, T., WANG, F. and BYCK, P. 2016. The role of ruminants in reducing agriculture's carbon footprint in North America. *Journal of Soil and Water Conservation* 71: 156-164.
- TEAGUE, W.R., DOWHOWER, S.L., BAKER, S.A., HAILE, N., DeLAUNE, P.B. and CONOVER, D.M. 2011. Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological properties in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141: 310-322.
- TOTHILL, J. C., HARGREAVES, J. N. G. and JONES, R. M. 1978. BOTANAL – A comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. 1. Field Sampling. Tropical Agronomy Technical Memorandum 8. CSIRO. Australia.
- XU, S., JAGADAMMA, S. and ROWNTREE, J. 2018. Response of grazing land soil health to management strategies: A summary review. *Sustainability* 10: 4769.

Material suplementario

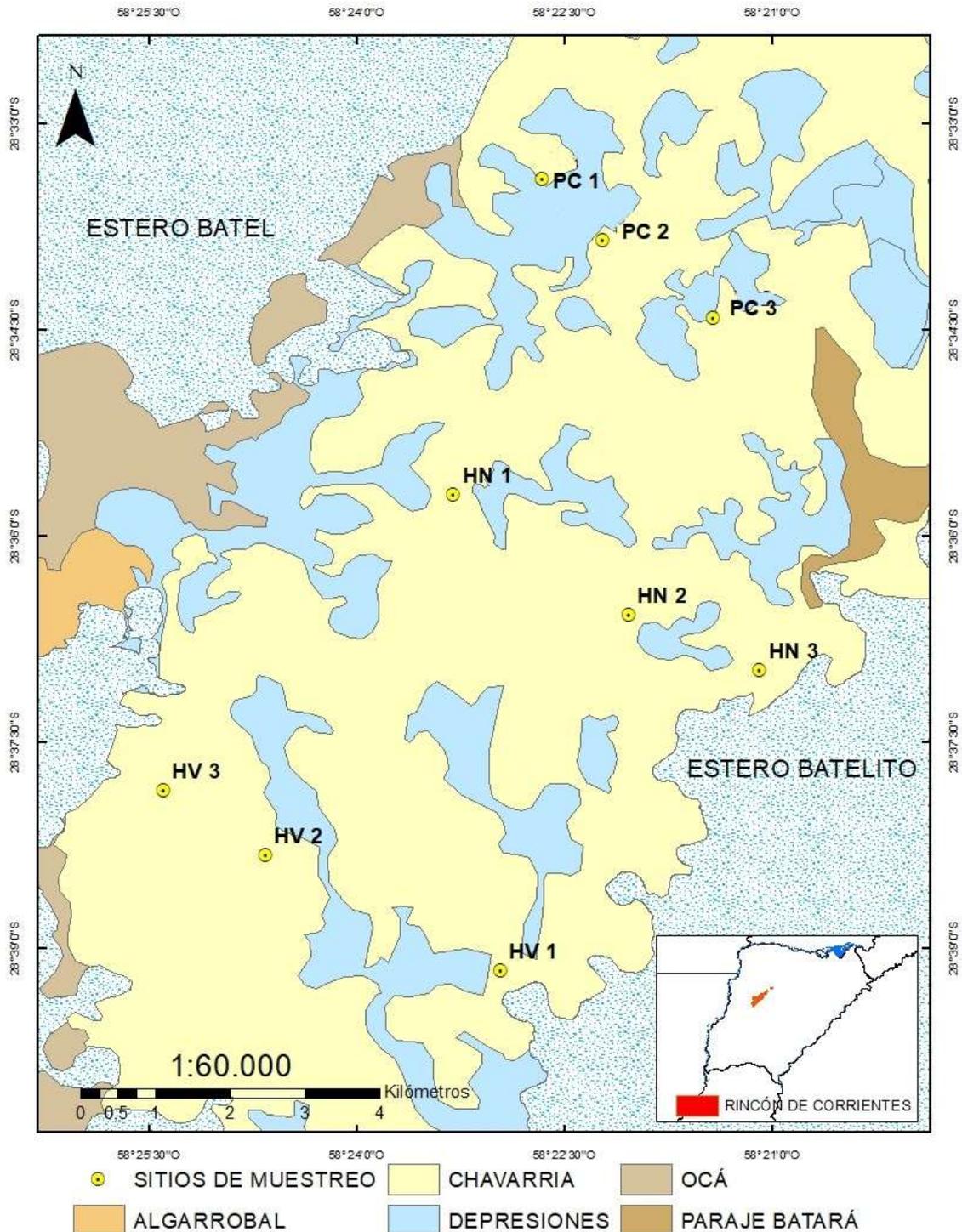


Figura suplementaria 1 (FS1). Localización de los sitios de muestreo correspondientes a los tratamientos de pastoreo continuo (PC), holístico nuevo (HN) y holístico viejo (HV). La simbología de puntos indica cada tratamiento y los números 1, 2 y 3 hacen referencia a la localización de las tres repeticiones correspondientes a cada tratamiento. Los distintos colores indican diferentes series de suelos (INTA 2014. Evaluación de tierras para el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Corrientes, disponible en: <https://drive.google.com/drive/folders/1SWRr8aKK63GcS1LCv3qrE8BSXcSP7Tq?usp=sharing>).

Supplementary figure 1 (FS1). Sampling sites, continuous grazing (PC), recent holistic management adoption (HN) and long holistic management adoption (HV). The symbols indicate different treatment and the numbers 1, 2 and 3 refers to the replicates. The different map colours indicate different soil series (INTA 2014. Evaluación de tierras para el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Corrientes, available at: <https://drive.google.com/drive/folders/1SWRr8aKK63GcS1LCv3qrE8BSXcSP7Tq?usp=sharing>).

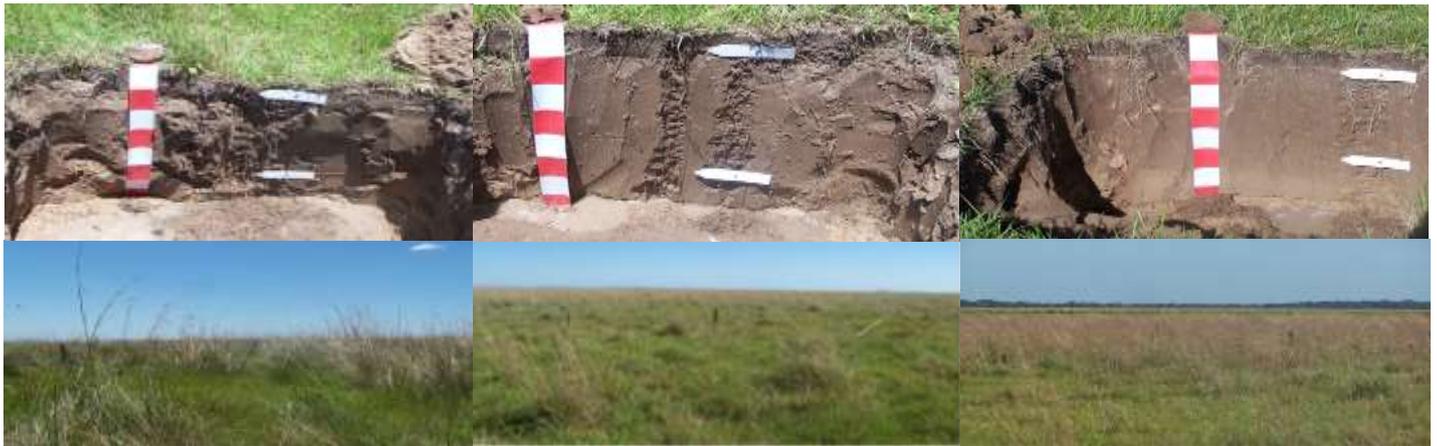


Figura suplementaria 2 (FS2). Perfiles del suelo (arriba) y paisajes (abajo) de los tratamientos evaluados en este trabajo: a la izquierda, pastoreo continuo (PC); en el centro, holístico nuevo (HN) y a la derecha, holístico viejo (HV).
Supplementary Figure 2 (FS2). Soil profiles (top) and landscapes (bottom) of the evaluated treatments, on the left continuous grazing (PC); in the centre recent holistic management adoption (HN) and on the right, long holistic management adoption (HV).

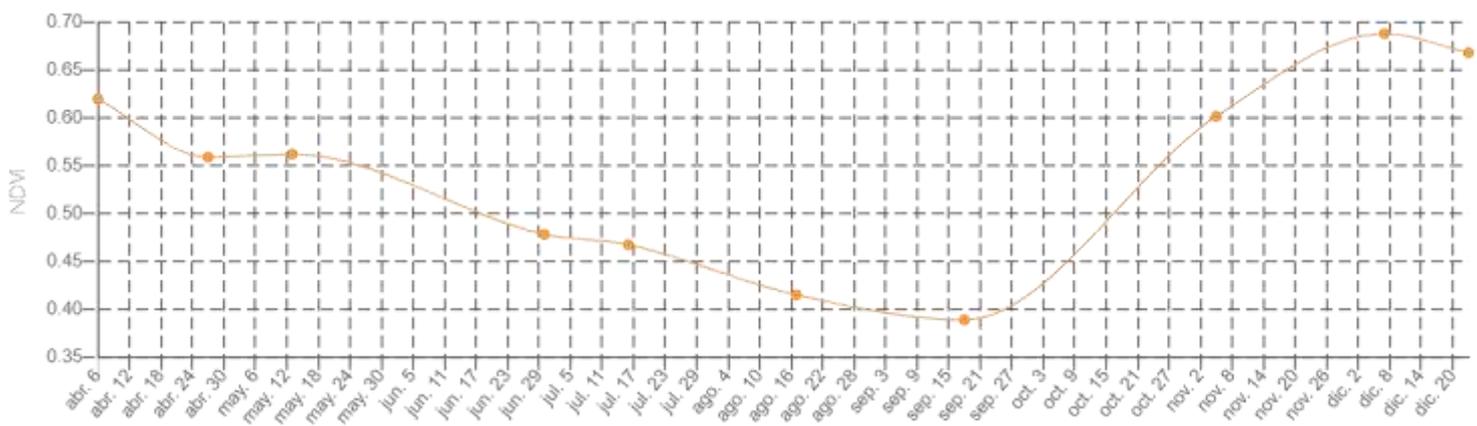


Figura suplementaria 3 (FS3). Evolución del índice verde en pastoreo continuo (PC), desde abril a diciembre de 2013.
Supplementary figure 3 (FS3). Normalized difference vegetation index in continuous grazing area (PC) from April to December 2013.

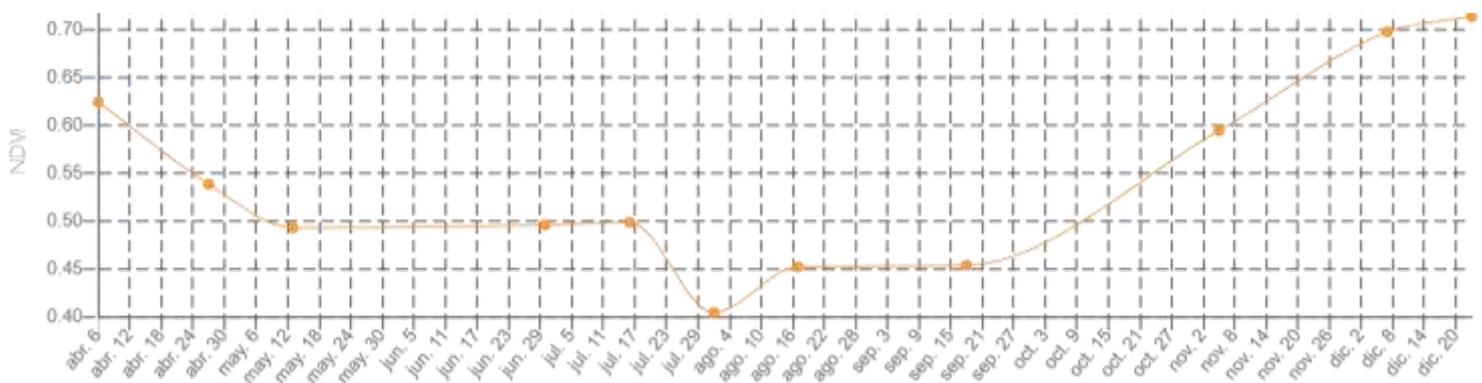


Figura suplementaria 4 (FS4). Evolución del índice verde en holístico nuevo (HN), desde abril a diciembre de 2013.
Supplementary figure 4 (FS4). Normalized difference vegetation index in the recent holistic management adoption area (HN) from April to December 2013.

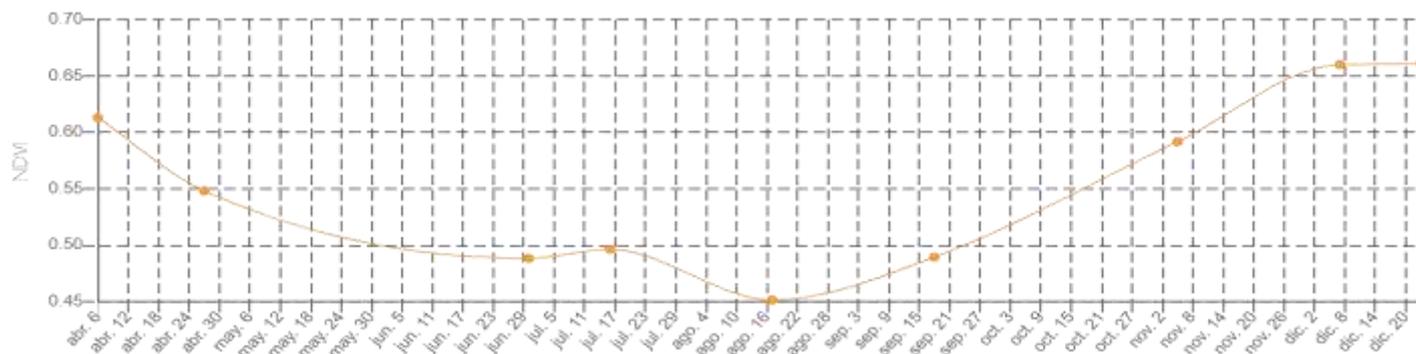


Figura suplementaria 5 (F55). Evolución del índice verde en holístico viejo (HV), desde abril a diciembre de 2013.

Supplementary figure 5 (F55). Normalized difference vegetation index in the long holistic management adoption area (HV) from April to December 2013.

Tabla suplementaria 1 (TS1). Rasgos de los suelos obtenidos mediante descripción de cada perfil, según los estándares de descripción de suelos (Schoeneberger, P.J.; Wysocki, D.A.; Benham, E.C. y Broderson, W.D. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE). El color se tomó en húmedo con tabla de Munsell. Textura, Ar Fr, Arenoso franco; Ar, Arenoso. Estructura, BS, bloques subangulares; f, finos, me, medios, 1, débiles; 2, moderados; G, estructura granular; M, estructura masiva. Reacción al α dipiridyl, P, positiva. Rasgos de agregados: rar, revestimientos de arena; a, abundantes; c, comunes; xx, marcados. Raíces, xxx, abundantes; xx, comunes; f, finas; mf, muy finas; m, tamaño medio; M, distribuidas en matas en el techo del horizonte y T, en toda el área. Poros, xx comunes; mf, muy finos; f, finos; T, tubulares; D, dendríticos.

Supplementary table 1 (TS1). Soil profile properties described according to the soil taxonomy standards (Schoeneberger, PJ; Wysocki, DA; Benham, EC and Broderson, WD 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Centre, Lincoln, NE). The soil wet colour was identified with a Munsell chart. Texture, Ar Fr, Sandy loam; Ar, Sandy. Structure, BS, subangular blocks; f, thin, me, mean, 1, weak; 2, moderate; G, granular structure; M, massive structure. Reaction to α dipiridyl, P, positive. Aggregate traits: rar, sand; a, abundant; c, common; xx, marked. Roots, xxx, abundant; xx, common; f, fine; mf, very fine; m, mean size; M, distributed in the upper part of the horizon and T, throughout the area. Pores, common xx; mf, very fine; f, fine; T, tubular; D, dendritic.

Tratamiento	Horizonte	Espesor (cm)	Color	Textura	Estructura	Reacción al α dipiridyl	Rasgos de agregados	Raíces	Poros
Pastoreo continuo	A	0 - 4	10 Y R 2/2	Ar Fr	Gr S	P	rar a xx	xxx, f, me, M-T	xx, f, TD
	AC	4 - 53	10 Y R 4/2	Ar	BS f, me, 1	P	rar a xx	xxx, f, me, T	xx, f, TD
	C	53 a +	10 Y R 6/3	Ar	M	P	-	xxx, f, me, T	-
Holístico nuevo	A	0 - 6	10 Y R 2/2	Ar Fr	Gr. BS f, me, 1	P	rar c xx	xxx, f, me, M-T	xx, mf, TD
	AC	6 - 54	10 Y R 3/3	Ar	BS f, me, 1	P	rar c xx	xx, f, me, T	xx, mf, TD
	C	54 a +	10 Y R 5/3	Ar	M	P	-	xx, me, T	-
Holístico viejo	A	0 - 7	10 Y R 2/2	Ar Fr	BS f, me, 1	P	rar c xx	xxx, mf, f, m, M-T	xx, mf, TD
	AC	7 - 46	10 Y R 3/3	Ar	BS f, me, 2	P	rar c xx	xx, f, me, T	xx, mf, TD
	C	46 a +	10 Y R 6/3	Ar	M	P	-	xx, f, T	-