

EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO EN SISTEMAS DE AGRICULTURA FORRAJERA (2006 – 2012)

G. Cantou^{1/}, J. Terra^{1/}

INTRODUCCIÓN

Los suelos ubicados sobre lomadas de la cuenca de la laguna Merín (ej: Unidades Alférez y J.P. Varela) ocupan un área aprox. de 900000 ha y tienen menor capacidad de uso y manejo que los suelos agrícolas tradicionales. Entre sus limitantes destacan su menor capacidad de almacenamiento de agua, mayor diferenciación textural con alto contenido de limo en superficie, menor contenido de materia orgánica y estructura más pobre. Por tanto, se trata de suelos frágiles, con alto riesgo de erosión y degradación, alto riesgo de sequía en periodos estivales y limitantes de drenaje durante el invierno. Sobre estos suelos deben utilizarse prácticas de manejo conservacionistas que maximicen los rastrojos sobre superficie, la preservación del agua en el perfil y la rotación de cultivos con pasturas. Existe creciente interés acerca de los efectos de la intensificación de los sistemas productivos sobre la calidad y capacidad productiva de estos suelos en el largo plazo.

El contenido de C orgánico del suelo y sus fracciones, el contenido de N, el potencial de mineralización de N del mismo (PMN) y el balance de algunos nutrientes han sido utilizados como indicadores de calidad de suelos en otros experimentos de largo plazo y relevamientos de sistemas productivos en el país, tanto agrícolas como agrícolas forrajeros (Morón y Sawchik, 2002, Terra *et al.*, 2006; Morón *et al.*, 2011, Díaz y Durán, 2011). Un relevamiento realizado por Morón *et al.* (2011) en suelos de la cuenca lechera mostró un importante grado de degradación (C orgánico, N total, PMN y nutrientes) de los mismos respecto a su condición indisturbada. Por otro lado, un trabajo realizado por Díaz y Durán (2011) mostró que en el tambo experimental de la Estanzuela la adopción de la siembra directa como sistema integral en la cadena forrajera permitió revertir el proceso de degradación de suelos que había ocurrido históricamente y los suelos empezaron a secuestrar C.

Desde el año 1995 se desarrolla en la Unidad Experimental Palo a Pique (UEPP) de INIA Treinta y Tres un experimento de rotaciones de larga duración cuyos objetivos originales fueron: a) identificar alternativas de intensificación de uso del suelo, mediante rotaciones de pasturas y cultivos con utilización de la tecnología de siembra directa, que constituyeran opciones para los sistemas ganaderos extensivos y resultaron sustentables en términos físicos y económicos y b) contar con una plataforma analítica para resolver problemas puntuales de adaptación de la tecnología en la región.

La situación de partida fueron suelos muy poco degradados, con un tapiz regenerado con algo de gramilla resultado de una breve etapa agrícola con laboreo convencional en la década de los 80 seguidos por una pradera convencional de más de 10 años.

Una de las principales fortalezas del trabajo de larga duración es que incluye el pastoreo directo de los animales en todos los componentes de las rotaciones. En función de la diversificación de los sistemas de producción, es muy difícil que en la práctica y a nivel comercial actualmente se mantenga un sistema de rotaciones libre del pastoreo animal. Dicha acción de pastoreo determina una serie de procesos que de manera directa y/o indirecta afectan tanto la fase de praderas como de cultivos de las rotaciones (selectividad animal, reciclaje de nutrientes, pisoteo, impacto ambiental, etc.).

El objetivo del presente artículo es presentar impactos de las rotaciones contrastadas en el experimento sobre algunos indicadores de calidad de suelo (C orgánico, N total, potencial de mineralización de N, pH y nutrientes principales), luego de 17 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento de rotaciones de larga duración fue instalado en la unidad experimental Palo a Pique en INIA Treinta y Tres en 1995 y evalúa en 72 ha, cuatro intensidades de uso del suelo con siembra directa que se diferencian en la duración y

^{1/} Programa Sustentabilidad Ambiental, INIA Treinta y Tres

proporción de las pasturas en la rotación. Los tratamientos iniciales consistieron en:

1. Pastura Mejorada Permanente (MP, 6 ha): mejoramiento (cobertura o con siembra directa) sobre campo regenerado con raigrás (*Lolium multiflorum* Lam.), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y lotus (*Lotus corniculatus* L.), que es renovado cada cuatro años.

2. Cultivo Continuo (CC, 6 ha): doble cultivo de raigrás o avena (*Avena* sp.) para pastoreo en el invierno y sorgo (*Sorghum bicolor*) o moha (*Setaria itálica*) para reservas forrajeras en el verano (heno o silo).

3. Rotación Corta (RC, 24 ha): dos años de cultivos forrajeros (invierno y verano) seguidos de una pastura bianual de raigrás y trébol rojo (*Trifolium pretense* L.). A partir del 2010 se comenzó a sembrar trigo en el invierno como reserva forrajera (silo de grano húmedo), consociado con trébol blanco o lotus.

4. Rotación Larga (RL, 36 ha): dos años de cultivos forrajeros (invierno y verano) y cuatro de pasturas, con siembra de la pradera consociada de trébol blanco, lotus y una gramínea perenne (*Festuca arundinacea* o *Dactylis glomerata* L.). También con trigo coasociado desde 2010 como en RC.

El experimento no cuenta con repeticiones sincrónicas, pero todas las fases de las rotaciones están presentes al mismo tiempo. Los suelos dominantes en el área experimental pertenecen a la unidad Alférez y consisten en Argisoles subéutricos melánicos abrupticos y Planosoles subéutricos melánicos/ócrios clasificados como de clase III por su capacidad de uso y manejo.

En los primeros 10 años, el experimento tuvo una orientación agrícola forrajera destinada a la producción de carne (Terra y García-Préchac, 2001). Posteriormente, con la expansión de la agricultura de grano a nuevas regiones que antes eran consideradas marginales, se vio la necesidad de replantar el mismo e incluir cultivos graníferos. De esta manera, en 2005 se subdividieron las unidades experimentales de 6 ha, de forma de mantener por un lado las rotaciones con cultivos forrajeros y por otro instalar una

secuencia de cultivos graníferos, manteniendo en ambas alternativas las mismas pasturas.

Entre 2006-2012 los cultivos forrajeros consistieron en: raigrás o eventualmente avena en invierno con sorgo para silo de planta entera o para grano húmedo y enfardado de rastrojo en uno de los veranos y sudangras de pastoreo en el segundo verano.

Desde 2006 a 2012, se realizaron muestreos de suelo en las 12 unidades experimentales del experimento para determinar la evolución de algunos indicadores. Además se realizó muestreos en un campo natural (CN) y en un campo regenerado (CR) linderos al experimento de larga duración que sirven como testigos del experimento. Cada unidad experimental (3 ha) estuvo ubicada sobre tres posiciones topográficas: ladera alta (A), media (M) y baja (C). En cada una de estas posiciones se georeferenciaron cuatro puntos de muestreo mediante sus coordenadas geográficas con el fin de mantener su ubicación en próximos muestreos. En otoño de cada año se tomaron 16 muestras por topografía de los primeros 15 cm del suelo, para determinar el contenido de carbono (C) orgánico y nitrógeno total (N), P disponible (ácido cítrico), potasio intercambiable, pH (suelo:agua) y textura. Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Suelos de INIA La Estanzuela.

Los indicadores de suelo fueron evaluados mediante un análisis conjunto de los 7 años (2006-2012), utilizando modelos mixtos (Littell *et al.*, 1996). En el modelo estadístico, los efectos del tratamiento y la topografía, así como sus interacciones, fueron considerados como efectos fijos y el año (considerado como la repetición) como efecto aleatorio. Para determinar la significancia estadística de los tratamientos y sus interacciones se utilizó un test F con un $p \leq 0,05$, según el test de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de Carbono Orgánico

El promedio de los últimos 7 años muestra en ambas profundidades un menor contenido de C orgánico para el tratamiento CC, valores intermedios para los tratamientos con rotaciones cultivo-pasturas (RL y RC) y mayores contenidos para las situaciones testigo de CR y CN (Fig. 1).

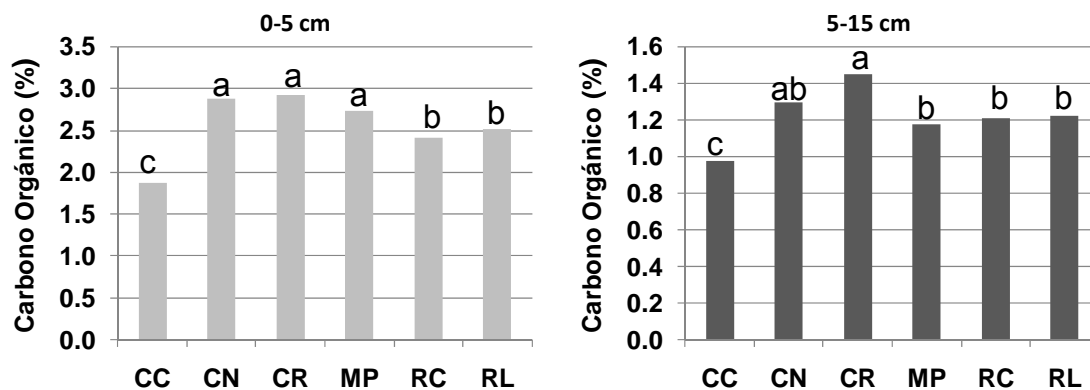


Figura 1. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre el contenido de C orgánico del suelo (0-5 cm y 5-15 cm). CC: Cultivo Continuo, CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

El CC presentó en promedio una reducción de 31% del C total del suelo respecto a los testigos (CN y CR), asociado a la ausencia de una fase de pasturas que reintegre o recupere las propiedades del suelo luego de la fase de cultivos. Al observar la evolución en el tiempo, Terra y García Préchac (2001) hallaron un valor de C orgánico en CC cercano a 1,5% en el trienio 1998-2000, en tanto que en el año 2003 el valor obtenido fue de 1,34% (Terra *et al.*, 2003). En 2012 se encontraron contenidos de 1.07, 0.91 y 1.05% para la ladera alta, media y baja, respectivamente. RC, RL y MP obtuvieron 13, 12 y 11% menos de C orgánico respecto a los testigos. La información muestra que aún en condiciones de siembra directa, en los sistemas de utilización por pastoreo directo, resulta imprescindible la inclusión de pasturas en la rotación, ya que los valores de C orgánico mejoran, aunque esto no es suficiente para mantener los niveles originales. Esto también fue constatado por Carbone *et al.* (2006) a los 11 años de iniciado el experimento, donde observo que el C orgánico del suelo de las rotaciones cultivo-pastura, en los primeros 15 cm, fue 10% menor respecto al C orgánico del suelo del campo de referencia, aunque en esa

oportunidad, MP no difirió significativamente del campo testigo.

En todos los casos, excepto en MP, los mayores efectos de las intensidades de uso del suelo ocurrieron en los primeros 5 cm del perfil. En MP, el C orgánico disminuyó un 6% en la capa superficial mientras que esta reducción fue de 14% en la capa profunda (5-15 cm), posiblemente por el aporte de la materia seca radicular de las leguminosas que se concentran a nivel superficial, que fue reportado en otro trabajo similar (Salvo *et al.*, 2008).

Nitrógeno Total

El contenido de N de los primeros 5 cm tuvo la misma tendencia que la observada para el C orgánico (Fig. 2), siendo 22% menor en CC respecto al promedio del resto de los tratamientos (que no difirieron significativamente entre si). En la capa profunda estas diferencias no fueron significativos de forma que la relación C:N en los 15 cm del perfil disminuyó en las rotaciones más intensivas que incluyeron una mayor proporción de cultivos anuales.

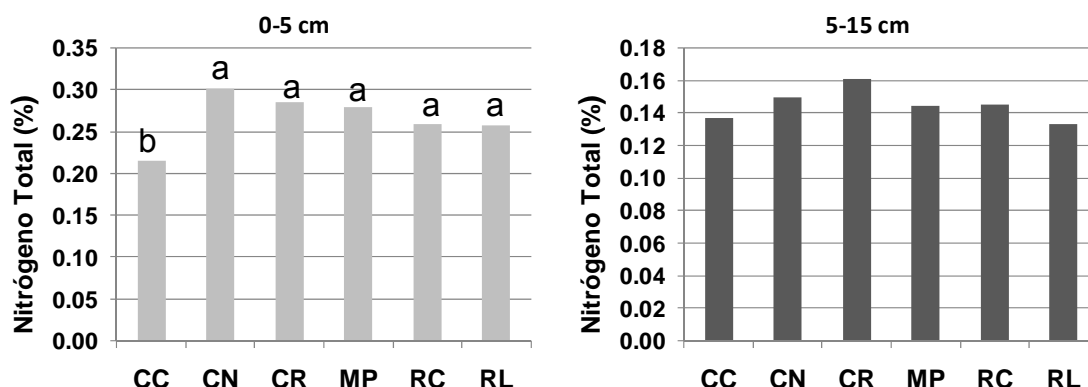


Figura 2. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre el contenido de N total del suelo (0-5 cm y 5-15 cm). CC: Cultivo Continuo, CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

Potencial de Mineralización de Nitrógeno (PMN)

El suelo del MP en 2012 tuvo un PMN 48% mayor al promedio de las situaciones de referencia de campo natural y regenerado (Fig. 3). Por otro lado, el promedio de RL y RC tuvieron un PMN 31% inferior que las situaciones de referencia; mientras tanto el PMN en CC fue 53% menor al observado en las situaciones de referencia. El PMN es un indicador de calidad de suelos de alta sensibilidad en las condiciones productivas del Uruguay (Morón y Sawchik, 2002). La información muestra que sólo la pastura mejorada fue capaz de mejorar el PMN respecto a la situación de referencia y

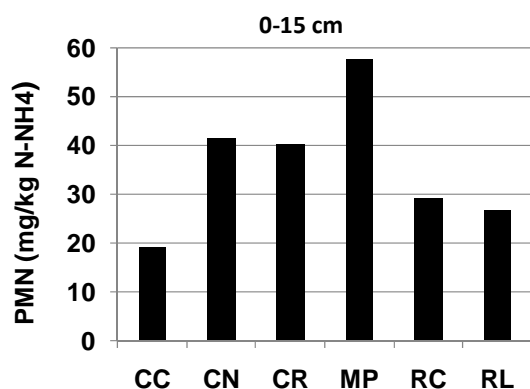


Figura 3. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre el potencial de mineralización de N (0-15 cm). CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

que aquellas situaciones que incluyen cultivos, aún con pasturas no fueron capaces de mantener el PMN del suelo. Estos resultados son similares a tendencias observadas en trabajos previos en el mismo experimento realizados por Morón *et al.* (S/p) y Zerbino *com.pers.*

Acidez (pH)

La acidez del suelo, medida en términos de pH, es un importante parámetro que está relacionado con diversos aspectos químicos y biológicos de la fertilidad del suelo. Los principales factores que afectan el pH del suelo son genéticos, de origen ambiental, tales como la temperatura, las precipitaciones y el material geológico en que se formó el suelo. Sin embargo, algunas medidas de manejo, como las cantidades y tipos de fertilizantes, la intensidad de laboreo o el riego, pueden afectar el pH del suelo.

En el análisis estadístico realizado se encontró interacción entre las intensidades de uso del suelo y la topografía, dado por el comportamiento observado en CC. De este modo se procedió a analizar este tratamiento por separado.

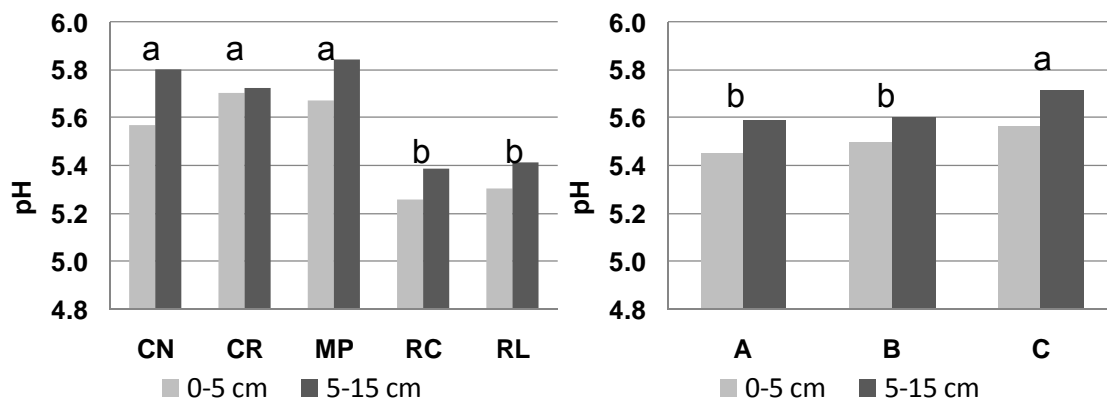


Figura 4. Impacto de la intensidad de uso del suelo y efecto de la topografía sobre el pH del suelo (0-5 cm y 5-15 cm). CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. A: Ladera alta, B: Ladera Media, C: Zona Baja. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

Se encontró diferencias significativas entre intensidades de uso del suelo y entre la topografía. Los tratamientos que incluyeron rotación con cultivos presentaron valores más bajos de pH respecto al campo natural y regenerado (Figura 3). También se observó que estos efectos se presentan en forma más marcada en los primeros 5 cm del perfil del suelo. Estos resultados pueden estar explicados por la acumulación de restos orgánicos en superficie, su descomposición y subsecuente lavado de los ácidos orgánicos resultantes, junto con la nitrificación de fertilizantes amoniacales aplicados en la fase de cultivos en los tratamientos RC y RL, factores que pueden producir una capa ácida en la superficie de los suelos minerales luego de varios años bajo siembra directa.

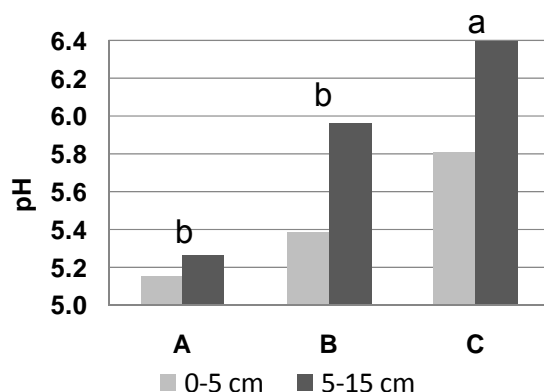


Figura 5. Efecto de la topografía sobre el pH del suelo en el tratamiento de Cultivo Continuo (0-5 cm y 5-15 cm). A: Ladera alta, B: Ladera Media, C: Ladera Baja. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

En todas las intensidades de uso del suelo se hallaron mayores valores de pH en la zona baja, posiblemente por el lavado de iones provenientes de la ladera media que alcalinizaron el suelo (Fig. 4).

El tratamiento CC presentó un valor de pH de 5.5 y 5.9 en el perfil de 0-5 cm y 5-15 cm, respectivamente. La presencia de un blanqueal ubicado en la zona baja enmascara el efecto acidificante de las altas dosis nitrogenadas aplicadas en los cultivos. Esto se observa claramente cuando lo analizamos por topografía, como se detalla en la figura 5.

Fósforo Disponible

Los valores de P (ác.cítrico) en el suelo se han incrementado notoriamente respecto a los valores de referencia del campo natural y regenerado luego de 17 años y ya no representan una limitante para el crecimiento de los cultivos (Fig. 6). En los últimos 7 años, el contenido de P en el suelo (0-15 cm) fue mayor en CC que en el promedio de los otras intensidades de uso del suelo que no difirieron entre si y que a su vez fue mayor que en las situaciones de referencia. Se puede observar un claro efecto de la intensidad de uso del suelo, mediada como la proporción de cultivos anuales en la rotación, sobre el contenido del nutriente en el largo plazo que refleja un balance positivo del mismo en los sistemas. Los niveles promedio de P agregado anualmente como fertilizantes y la extracción de los cultivos reflejan en gran parte las diferencias encontradas. Durante el período estudiado se aplicaron anualmente un

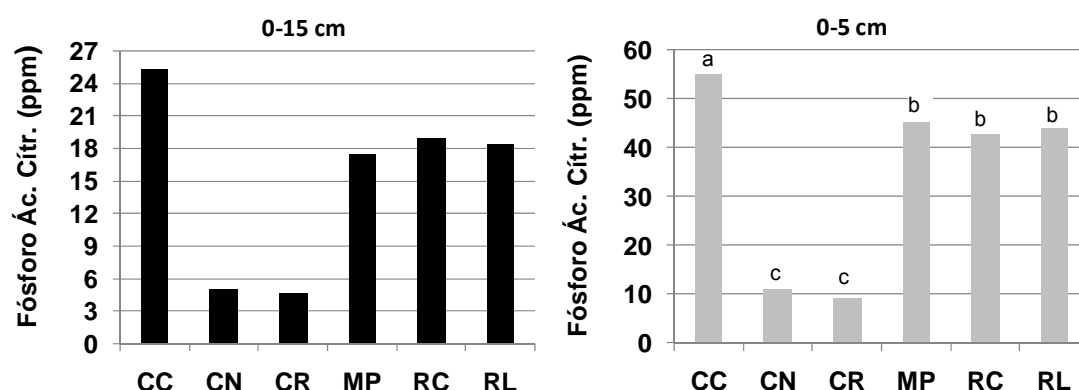


Figura 6. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre el P Ác. Cítr. del suelo (0-15 y 0-5 cm). CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

promedio de 40, 55, 62 y 75 kg P_2O_5 /ha/año en MP, RL, RC y CC, respectivamente.

La distribución de P en profundidad muestra que la mayor parte de las diferencias encontradas entre las rotaciones están explicadas por las diferencias de P en los primeros 5 cm del perfil, debido a la fertilización localizada en esa profundidad, a la ausencia de laboreo que implica el mezclado y a la acumulación de materia orgánica en la superficie. La acumulación de C orgánico en superficie debido a los residuos, que interactúan con el P sin que ello signifique retrogradación a formas menos disponibles como ocurre cuando el P es adsorbido y retenido por la fracción mineral del suelo.

Por otro lado, en la mayoría de las rotaciones se observó una tendencia clara a mayores niveles de P en la ladera alta y la ladera baja que en la ladera media. Probablemente estas diferencias estén asociadas a los niveles de productividad de los cultivos, y por tanto extracción, en cada una de esas posiciones topográficas, así como a los niveles de erosión en las mismas.

Potasio Intercambiable

Se observa una reducción promedio de más del 46% de los niveles de K int (0-15 cm) en todas las rotaciones respecto a los niveles de referencia de campo natural y regenerado (Fig. 7). Sin embargo, no se encontraron

diferencias significativas entre las distintas intensidades del suelo contrastadas en el experimento en el contenido de K_{int} a esa profundidad.

A pesar de la fertilización con K en las rotaciones que incluyen cultivos anuales desde 2005, el nivel promedio del nutriente se encontraría por debajo de los niveles críticos de aprox. 0.25 meq/100g para estos suelos de acuerdo a los últimos trabajos en el país (Barbazán *et al.*, 2011). Durante el período estudiado se aplicaron anualmente un promedio de 14, 21 y 37 kg K_2O /ha/año en RL, RC y CC, respectivamente; mientras que no se aplicaron fertilizantes potásicos en MP. Las mismas tendencias observadas de 0-15 cm fueron corroboradas de 0-5 cm donde se concentra la mayor parte del nutriente. A los niveles de fertilizantes potásicos aplicados, el contenido del nutriente tampoco fue diferente entre las rotaciones que incluyeron cultivos anuales respecto a MP, donde no se aplicó K.

Los valores de K_{int} en el perfil, no son muy diferentes a los reportados luego de los primeros años del experimento (Terra y García-Préchac, 2001) donde ya se evidenciaba la reducción de los niveles del nutriente como resultado de la extracción de biomasa en algunas situaciones (enfardado y ensilaje de praderas y algunos cultivos anuales).

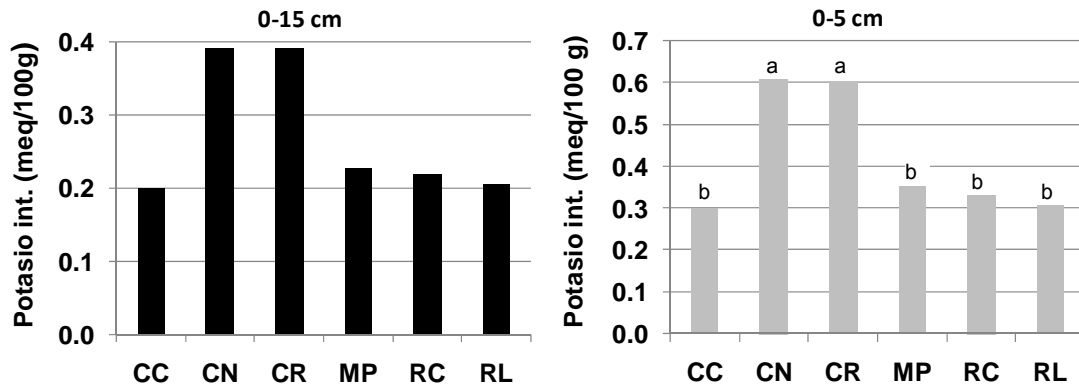


Figura 7. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre el Kint. del suelo (0-15 y 0-5 cm). CN: Campo natural, CR: Campo regenerado, MP: Mejoramiento Permanente, RC: Rotación Corta, RL: Rotación Larga. Letras diferentes entre columnas difieren significativamente para $p < 0,05$, según Tukey.

CONSIDERACIONES FINALES

A casi dos décadas de instalado el experimento de rotaciones de larga duración se ha generado valiosa información que sugiere que es posible intensificar el uso sustentable de estos suelos mediante la tecnología de siembra directa en sistemas de agricultura forrajera con destino a la producción animal.

La alta extracción de biomasa en estos sistemas, implica que la rotación con pasturas, al menos de corta duración parece ineludible para mantener la capacidad productiva de estos suelos y mitigar las pérdidas de C orgánico y mantener la capacidad de suministro de N de los mismos.

A pesar del uso de la siembra directa, del aumento de la producción de biomasa y del agregado de fertilizantes, es muy difícil mantener los niveles de C orgánico del suelo de las situaciones de referencia de campo natural cuando se incorporan cultivos forrajeros anuales de alta productividad aun a rotaciones que mantengan una proporción de pasturas perennes en las secuencias. La constante disminución del contenido de K de los suelos en respuesta a los niveles de extracción también constituye una limitante que debe ser mitigada mediante la aplicación de K en las situaciones con mayor proporción de cultivos forrajeros anuales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carbone, A.M., J.A. Terra; L. Salvo. 2010. Contenido y fracciones de materia orgánica en diferentes intensidades de uso del suelo bajo siembra directa. In: Taller Internacional Sociedad Uruguaya Ciencia Suelo - Uruguay ISTRO Branch, 2010 Colonia, Uruguay Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos.

Díaz-Rosello, R. y H. Duran. 2011. Los sistemas lecheros y su impacto en el recurso suelo. In: Seminario Sustentabilidad Ambiental de los Sistemas Lecheros en un contexto económico de cambios. INIA. Serie Actividades Difusión 663.

Morón, A., Sawchik, J., 2002. Soil quality indicators in a long-term crop pasture rotation experiment in Uruguay. In: 17th World Congress of Soil Science, 14-21 Aug. 2002. Thailand.

Morón, A., Molfino, J., Ibáñez, W., Sawchik, J., Califra, A., Lazbal, E., La Manna, A., y Malcuori, E. 2011. La calidad de los suelos bajo producción lechera en los principales departamentos de la Cuenca: C y N. In: Seminario Sustentabilidad Ambiental de los Sistemas Lecheros en un contexto económico de cambios. INIA. Serie Actividades Difusión 663.

Salvo L., J.A. Terra, W. Ayala, R. Bermúdez, J. Correa, P. Ávila, and J. Hernández. 2008. Long-term phosphorus fertilization and perennial legumes addition impacts on temperate natural grassland: II. Total and

particulate soil organic C. *In*: International Grassland Congress and the International Rangeland Congress. June 29-July 5, 2008. Hohhot, China.

Terra, J., y F. García-Préchac. 2001. Siembra directa y rotaciones forrajeras en las lomadas del Este: Síntesis 1995-2000. INIA, Serie Técnica 125.

Terra J.A., F. García-Préchac, L. Salvo, and J. Hernández. 2006. Soil use intensity impacts on total and particulate soil organic matter in no-till crop-pasture rotations under direct grazing. *In*: Soil Management for Sustainability. – (Horn R., H. Fleige, S., Peth, and X. Peng (editors). *Advances in GeoEcology* 38: 233-241.