

INTENSIFICACIÓN AGRÍCOLA SUSTENTABLE: SU INCIDENCIA SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS Y FÍSICOS DEL SUELO

Gustavo Cesar Magra¹
Andrés José Saperdi
Yanina Jimena Vigna
Pablo Sebastián Besson
Laura Alejandra Ferreras

gmagra@hotmail.com¹

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario, Argentina

RESUMEN: La intensificación agrícola sustentable (IAS) se basa en obtener la máxima eficiencia por unidad de recurso y/o insumo involucrado, permitiendo incrementar la producción con mínimo perjuicio. Los objetivos del presente trabajo fueron: i) evaluar el efecto de la IAS sobre indicadores de calidad del suelo; ii) realizar una valoración del aporte de Nitrógeno, Fósforo y Azufre en función de las alternativas de intensificación agrícola. Se evaluaron secuencias de cultivos con distinto índice de intensificación ($II = N^{\circ}$ cosechas/año en una determinada secuencia de cultivos) en establecimientos agrícolas pertenecientes a la provincia de Santa Fe-Argentina. Los tratamientos fueron: Trigo/Maíz-Maíz $II=1,5$ (T/M-M); Trigo/Soja-Maíz-Soja $II=1,33$ (T/S-M-S) y monocultivo de soja $II=1,0$ (S-S). Sobre muestras compuestas de suelo (0-10 y 10-20cm) extraídas en septiembre de 2018 se evaluó: el carbono orgánico total (COT), el carbono orgánico particulado (COP), la densidad aparente (DA) y el porcentaje de agregados estables al agua (EAg). Se calculó la masa de CO teniendo en cuenta el espesor de muestreo y la DA. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA), la separación de medias fue obtenida por el test LSD ($p<0,05$). Hubo mayor contenido de COT en superficie (0-10cm) en las secuencias más intensificadas ($p<0,05$). Los sitios con T/S-M-S presentaron en promedio una reducción del 16% de COT con respecto a T/M-M, mientras que para S-S fue del 22%. Se hallaron diferencias significativas en la masa de CO para la capa de 0-20cm con valores que fluctuaron entre 42-48; 39-45 y 39-41 Mgha-1 para T/M-M, T/S-M-S y S-S, respectivamente ($p<0,05$). La fracción de CO lábil (COP) presentó elevada sensibilidad en la capa de 0-10cm. Los sitios con la secuencia T/M-M duplicaron el contenido de COP ($p<0,05$) con respecto a T/S-M-S y S-S. Los valores promedio y desvíos estándar para DA fueron 1,33 Mg m⁻³ ($\pm 0,043$) y 1,41 Mg m⁻³ ($\pm 0,030$) para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente. El porcentaje de EAg mostró en superficie diferencias entre tratamientos ($p<0,05$) con los siguientes valores promedio: 29, 23 y 17% para T/M-M, T/S-M-S y S-S, respectivamente. No hubo diferencias en EAg a la profundidad de 10-20cm. Se estimó el aporte de nutrientes que se produjo a partir del incremento en el contenido de materia orgánica. La secuencia T/M-M presentó un incremento que osciló entre 292 a 467 kgha-1 de Nitrógeno, 38 a 61 kgha-1 de Fósforo y 38 a 61 kgha-1 de Azufre con respecto a T/S-M-S y S-S, respectivamente.

Palavras chaves: Sustentabilidad, carbono orgánico, estabilidad estructural, secuencias de cultivos, indicadores calidad de suelos, monocultivo de soja

INTENSIFICAÇÃO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEL: SEU IMPACTO NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

RESUMO: A intensificação agrícola sustentável (IAS) baseia-se em obter a máxima eficiência por unidade de recurso e/ou material envolvido, permitindo aumentar a produção com mínimo dano. Os objetivos do presente trabalho foram: i) avaliar o efeito da IAS sobre indicadores de qualidade do solo; ii) realizar uma valorização da contribuição de Nitrogênio, Fósforo e Enxofre em função das alternativas de intensificação agrícola. Se avaliaram sequências de colheitas com diferentes índices de intensificação ($II=N^{\circ}$ colheitas/ano em uma determinada rotação) em estabelecimentos agrícolas pertencentes ao Estado de Santa Fe – Argentina. Os tratamentos foram: Trigo/Milho-Milho $II=1,5$ (T/M-M); Trigo/Soja-Milho-Soja $II=1,33$ (T/S-M-S) e monocultura de soja $II=1,0$ (S-S). Sobre amostras compostas do solo (0-10 e 10-20cm) extraídas em setembro de 2018 se avaliou: carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), densidade do solo (DS), porcentagem de agregados estáveis à água (EAg). Se calculou a massa de CO tendo em conta a espessura da amostragem e a DS. Se realizou uma análise de variância (ANOVA), a separação de medidas foi obtida pelo teste LSD ($p>0,05$). Ocorreu maior conteúdo de COT em superfície (0-10cm) nas sequências mais intensificadas ($p>0,05$). Os sites com T/S-M-S apresentaram em média uma redução de 16% de COT em relação a T/M-M, enquanto que para S-S foi de 22%. Encontraram-se diferenças significativas na massa de CO para a camada de 0-20cm com valores que oscilaram entre 42-48; 39-45 e 39-41 $Mgha^{-1}$ para T/M-M, T/S-M-S e S-S, respectivamente ($p<0,05$). A fração de CO lábil (COP) apresentou elevada sensibilidade na camada de 0-10cm. Os sites com a sequência T/M-M duplicaram o conteúdo de COP ($p<0,05$) em relação a T/S-M-S e S-S. Os valores em média e desvios para DS foram 1,33 $Mg\ m^{-3}$ ($\pm 0,043$) e 1,41 $Mg\ m^{-3}$ ($\pm 0,030$) para as profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. A porcentagem de EAg mostrou em superfície diferenças entre tratamentos ($p<0,05$) com os seguintes valores promédio: 29, 23 e 17% para T/M-M, T/S-M-S e S-S, respectivamente. Não houve diferença em EAg na profundidade de 10-20cm. Estimou-se o fornecimento de nutrientes produzidos a partir do aumento de conteúdo da matéria orgânica. A sequência T/M-M apresentou um aumento que oscilou entre 292 a 467 $kgha^{-1}$ de Nitrogênio, 38 a 61 $kgha^{-1}$ de Fósforo e 38 a 61 $kgha^{-1}$ de Enxofre em relação a T/S-M-S e S-S, respectivamente.

Keywords: sustentabilidade, carbono orgânico, estabilidade estrutural, seqüências de culturas, indicadores de qualidade do solo, monocultura de soja.

INTRODUCCIÓN

Los recursos de tierras son limitados, frágiles y no renovables, representan aproximadamente una tercera parte de la superficie total de nuestro planeta. Entre ellos se incluye el suelo, que es la base para los sistemas de sustentación de la vida animal y vegetal, siendo primordial para las actividades agropecuarias, como así también un componente destacado del hábitat y el bienestar humano. Funciones tan importantes como la preservación de la biodiversidad, la regulación del ciclo del agua, el almacenamiento y reciclaje de carbono y nutrientes, transcurren en el sistema suelo (Azqueta Oyarzun, 2007; FAO & GTIS, 2015).

Uno de los grandes desafíos del siglo XXI consiste en optimizar el uso de estos recursos a los fines de responder a la demanda de granos, forrajes y fibras; por ello es fundamental generar conocimientos para el

desarrollo de tecnologías que mantengan la productividad de las tierras con el menor impacto negativo sobre el ambiente. La meta a alcanzar en los próximos años es lograr una producción agrícola sustentable, produciendo la cantidad de alimentos necesarios mediante el uso eficiente y seguro de los recursos naturales y de los insumos externos, asegurando servicios ecosistémicos para la sociedad (Alexandratos & Bruinsma, 2012; Andrade, 2017). Si bien una opción es incorporar nuevas tierras al proceso productivo, es fundamental evaluar cuanto puede ampliarse la frontera agrícola antes de que los riesgos de degradación o la pérdida de biodiversidad alcancen niveles inaceptables. Se estima que alrededor de una cuarta parte de las tierras cultivables del planeta presentan algún signo de erosión y/o degradación, identificando como causas principales al empleo de prácticas de manejo inadecuadas, la deforestación y el sobrepastoreo (Azqueta Oyarzun, 2007; FAO & GTIS, 2015). Estos procesos también se han observado en la Región Pampeana Argentina, una de las áreas de producción agrícola más importantes del mundo, con suelos clasificados como Molisoles que deberían ofrecer una excelente capacidad productiva. Aproximadamente el 90% del área cultivada en nuestro país se realiza bajo siembra directa (Aapresid, 2018), este sistema de manejo conjuntamente con los avances en maquinaria agrícola y en biotecnología han permitido un crecimiento importante en la producción. Sin embargo, diversos relevamientos muestran que existen zonas con disminución de la calidad del suelo, manifestada entre otros factores, a través de descensos de la materia orgánica (MO) que alcanzan hasta el 60% del nivel original (Ferrerías *et al.*, 2007; Sainz Rosas *et al.*, 2011; Wingeyer *et al.*, 2015; Serri *et al.*, 2018a). En la actualidad, la Región Pampeana concentra entre el 80 y 90% de los suelos sembrados con soja, maíz y trigo, demostrando ser el área de mayor importancia para la producción agrícola de la Argentina (BCR, 2019).

La expansión masiva del cultivo de soja en nuestro país respondió, más allá de su simplicidad productiva, a su elevada rentabilidad (costos de producción y precio del grano), además de su gran capacidad de adaptación frente a cambios en el ambiente. Está ampliamente documentado que la práctica del monocultivo ha profundizado los procesos de degradación/erosión, puesto que se produce elevada extracción de nutrientes con escasa o nula reposición, y además realiza un menor aporte de residuos que impacta negativamente en el balance de carbono (C) y la biodiversidad del suelo (Novelli *et al.*, 2011; Cazorla *et al.*, 2017; Serri *et al.*, 2018a). Este cambio en el modelo productivo produjo transformaciones en los agroecosistemas de la Región Pampeana, cuyas consecuencias fundamentales han tenido relación con la pérdida de fertilidad en las principales cuencas productivas de la región. Por otro lado, tal cual se menciona en párrafos anteriores, el cultivo de soja tiene gran versatilidad y puede desarrollarse en suelos de baja capacidad productiva, lo que podría enmascarar por varios años un proceso de degradación o posible déficit de nutrientes.

Un sistema de producción sustentable debe contemplar la reposición de nutrientes al suelo en la medida que son exportados a través de los productos de cosecha. Si esto no ocurre, los suelos se empobrecen con los sucesivos ciclos agrícolas impactando negativamente sobre los rendimientos de los cultivos. El logro de máximos rendimientos económicos de los cultivos agrícolas depende de las condiciones climáticas, edáficas y de manejo del cultivo y del suelo. Numerosos trabajos han demostrado que la nutrición de los cultivos es normalmente limitante para la obtención de estos máximos rendimientos económicos (García & Salvagiotti, 2009; García & González Sanjuan, 2010; Cabrini *et al.*, 2013; Collino *et al.*, 2015). El uso de fertilizantes en la Argentina se encuentra en desarrollo, en comparación con países como Brasil y Estados Unidos quienes aplican fertilizantes regularmente para reemplazar los nutrientes removidos por los cultivos. Si bien, en los últimos años, se observa una leve tendencia a reponer parte de los nutrientes extraídos a través de las cosechas, los valores promedio nacionales presentan un gran desajuste en la relación aplicación de nutrientes/extracción en grano. En términos generales, en el curso de los últimos años, en nuestro país se aplica el 40% del nitrógeno, el 52% del fósforo y el 40% del azufre consumidos por los cultivos, datos que indican que la reposición es insuficiente (Melgar, 2015; Cruzate & Casas, 2012, 2017).

Más allá de incrementar los rendimientos a través de programas de fertilización, resulta esencial diseñar estrategias adaptadas a cada ambiente para maximizar la captura de los recursos (radiación, agua y nutrientes), para lo cual es necesario conocer su disponibilidad y distribución temporal. Uno de los criterios que define la sustentabilidad de los agroecosistemas es el mantenimiento de las propiedades físicas, biológicas y el nivel de nutrientes del suelo. La incorporación de fertilizantes ha estado asociada más a la posibilidad de aumentar los rendimientos de los cultivos que a una conciencia sobre la necesidad de reposición de nutrientes del sistema para conservar el capital natural. La mayoría de los productores no consideran los costos ambientales en sus análisis económicos, es decir, las pérdidas de nutrientes y de materia orgánica que ocurre en los suelos como consecuencia del uso agrícola, generando externalidades y/o deterioro de los propios recursos productivos (Flores & Sarandón, 2002; Cabrini *et al.*, 2013).

Como contrapartida al deterioro y agotamiento de nutrientes de los suelos, la intensificación agrícola sustentable es una alternativa viable ya que permite incrementar la producción sin perjuicios para la

sociedad, puesto que se basa en obtener la máxima eficiencia en producción por unidad de recurso (Harvey & Pilgrim, 2011; Tilman *et al.*, 2011). En consecuencia, si se pretende llevar a cabo sistemas de producción sustentables optimizando el empleo de recursos/insumos involucrados, es fundamental realizar una valoración del consumo de nutrientes del suelo. De esta manera, a partir de la internalización de los costos ambientales se podría mitigar el deterioro del suelo, debido a que no se subestiman los egresos de cada actividad. Incluir en los análisis económicos los costos de consumo de nutrientes, puede contribuir a la toma de decisiones que promuevan actividades con respaldo y conceptos acordes al desarrollo sustentable. Una opción al monocultivo de soja, es realizar más de un cultivo al año con rotaciones y manejos apropiados para cada zona a través de una intensificación sostenible de los sistemas (Monzon *et al.*, 2014; Andrade & Satorre, 2015). Aumentar la eficiencia haciendo más cultivos por unidad de tiempo y superficie, implica una reducción del período de barbecho que podría mitigar los efectos negativos causados por el monocultivo de soja. Las secuencias que eliminan los períodos de barbecho mejoran el balance de C en el suelo puesto que se incrementan los aportes de residuos vegetales con un uso más eficiente del agua y de la radiación solar (Caviglia & Andrade, 2010; Novelli *et al.*, 2011; Studdert *et al.*, 2017). A mayor cantidad de días por año con cobertura viva sobre el suelo, mayor es la cantidad de biomasa producida y mayor es el aporte de materia orgánica al sistema y nutrientes potencialmente disponibles. El doble cultivo Trigo/Soja se ha extendido en la región en los últimos 25 años, siendo ampliamente adoptado por los productores agrícolas debido a que mejora el uso de los recursos y además los resultados globales pueden ser más estables en comparación con la siembra individual de cada uno de los cultivos. La incorporación del trigo en los esquemas de doble cultivo resulta fundamental debido a que absorbe entre 500 - 600 milímetros de agua haciendo un uso más eficiente de este recurso, con lo cual se observa un gradual descenso de las napas. El hecho de incorporar esta gramínea de invierno permitirá, además de incorporar carbono al suelo, consumir los excesos de agua, competir con malezas de difícil control y mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo (Caviglia *et al.*, 2004; Cabrini *et al.*, 2013; Monzon *et al.*, 2014; Serri *et al.*, 2018b). Aunque en un grado mucho menor que la soja, el maíz también está siendo considerado como una segunda cosecha para componer secuencias con dos cultivos al año: Trigo/Maíz (Andrade *et al.*, 2015). Afortunadamente el modelo productivo ha ido cambiando a lo largo del tiempo, durante el quinquenio 2010-2015 en la zona núcleo se sembraban cuatro hectáreas de soja por cada una de gramíneas (trigo o maíz); mientras que en la campaña 2018/19 esta relación disminuyó a la mitad con un cambio drástico en la fisonomía de la zona (BCR, 2019). Como aspecto altamente positivo, la incorporación de gramíneas podría convertirse en una alternativa importante en la recuperación de los suelos debido a que se incrementa el contenido de MO ya que aporta al sistema alto volumen de rastrojos (tanto por la cantidad como por la calidad de los residuos); y por permitir una mayor cobertura, lo que contribuye a mejorar el funcionamiento y a mantener la calidad de los suelos (Oelbermann & Echarte, 2011; Monzon *et al.*, 2014; Andrade *et al.*, 2015; Serri *et al.*, 2018b).

Para evaluar el impacto de estas prácticas, es necesaria la identificación de indicadores sensibles asociados a las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que permitan monitorear de manera eficaz los cambios que se puedan producir. Numerosos autores han estudiado los parámetros físicos, químicos y biológicos como sensores de calidad edáfica debido a que son propiedades vinculadas a las funciones de retención y provisión de agua y nutrientes (Trasar Cepeda *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2014; Ferreras *et al.*, 2015). Sin dudas la MO es uno de los indicadores de calidad de suelo por excelencia, debido a que impacta sobre el comportamiento integral del suelo. Por tal motivo, se siguen destinando esfuerzos para identificar entre los componentes de la MO, cual se comporta como un indicador sensible para detectar diferencias ambientales o de manejo (Manlay *et al.*, 2007; Lal, 2008, 2014; Vezzani & Mielniczuk, 2009). Un mayor aporte de carbono orgánico lábil; y la presencia de raíces vivas durante un período de tiempo más prolongado en comparación con el suelo bajo barbecho sin cultivo, provocaría un estímulo en la actividad microbiana. Los microorganismos son los encargados de liberar enzimas y diferentes sustancias que favorecen el funcionamiento y las interacciones entre los componentes del suelo. Además, una mayor cobertura en superficie protege al suelo, con lo cual previene procesos de erosión y se incrementa la infiltración. Por otro lado, se producen cambios en la estructura, mejorando el movimiento de fluidos y el aprovechamiento del agua. Asimismo, por mineralización de la MO acumulada, se aumenta la provisión de nutrientes para la planta con una mayor eficiencia en el uso de fertilizantes. Estos cambios debidos a una intensificación agrícola sustentable, impactan positivamente no solo sobre la calidad física, química y biológica del suelo, sino también en la dimensión económica, con un aporte significativo a la sustentabilidad de los sistemas agrícolas (Lehmann *et al.*, 2017; Batista *et al.*, 2018).

En función de los antecedentes expuestos, se plantearon los siguientes objetivos: i) evaluar el efecto de la intensificación agrícola (diferente proporción de gramíneas y años de implementación) sobre indicadores químicos y físicos de calidad del suelo; y ii) realizar una valoración del cambio en la dotación de Nitrógeno

(N), Fósforo (P) y Azufre (S) del suelo en función de las alternativas de intensificación agrícola, de manera tal que se puedan internalizar para los tres nutrientes los costos ambientales.

Materiales y Métodos

Las mediciones se llevaron a cabo en lotes de producción donde se implementa agricultura en forma continua bajo siembra directa pertenecientes a las localidades de Pujato, Coronel Arnold, Fuentes, Villa Mugueta, Sanford y Zavalla ubicados en el sur de la Provincia de Santa Fe, Argentina. Se seleccionaron sitios que presentan secuencias de cultivos con distinto índice de intensificación (II), definido como el número de cosechas por año en una determinada secuencia o rotación, como así también diferente antigüedad desde que comenzó a implementarse la intensificación. Los tratamientos evaluados fueron: Trigo/Maíz-Maíz (II=1,50); Trigo/Soja-Maíz-Soja (II=1,33), y monocultivo de soja (II=1,0). El suelo se clasifica como Argiudol vértico, series Roldán y Peyrano, con clases I y II de capacidad de uso (Mapa Suelos – GEOINTA). Ambas series de suelo manifiestan elevada uniformidad en los factores de pedogénesis, asimismo están sometidas a las mismas condiciones climáticas. La composición granulométrica en los primeros 20 cm del perfil (profundidad que se analizó en este estudio), se encuentra dentro del siguiente rango de valores: arcilla ($< 2\mu\text{m}$): 232,5 - 250 g kg^{-1} ; limo (2 - $50\mu\text{m}$): 652,5- 727 g kg^{-1} ; arena muy fina/fina (50- $250\mu\text{m}$): 23 - 109 g kg^{-1} . En cada uno de los sitios se extrajeron muestras al azar, disturbadas (compuestas por 15 submuestras) y no disturbadas, a las siguientes profundidades: 0-10 y 10-20 cm, en el mes de septiembre de 2018, evitando los bordes y las áreas de mayor tránsito (cabeceras). Se evaluaron los siguientes parámetros químicos y físicos del suelo:

- Carbono orgánico total (COT): Se determinó el COT por el método de Walkley-Black que consiste en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson & Sommers, 1996).
- Carbono orgánico particulado (COP): se utilizó la metodología propuesta por Cambardella & Elliott (1992). Se realizó un fraccionamiento físico por tamaño de partículas en dos fracciones: $>53 \mu\text{m}$ denominado carbono orgánico particulado; y la fracción $<53 \mu\text{m}$ (carbono orgánico asociado a los minerales). El COP fue determinado por el método de oxidación húmeda (Nelson & Sommers, 1996).
- Densidad aparente (DA) por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). Se extrajeron seis muestras sin disturbar utilizando un cilindro de 47,5 mm de altura y 60 mm de diámetro para cada profundidad de muestreo. Los resultados de COT fueron expresados como masa equivalente de C (Mg C ha^{-1}) respecto a la masa de suelo para cada profundidad muestreada.
- Estabilidad de agregados por el Método de Hénin (1972). Se calculó el porcentaje de agregados estables al agua en superficie (EAg), obtenidos por tamizado a través del aparato Feódoroff (1960).

Análisis estadístico: Se utilizó la metodología de “estudio de caso” que permite investigar un fenómeno contemporáneo dentro de un contexto real, usando múltiples fuentes de evidencia (Yin, 1994). Se utilizaron técnicas descriptivas (cálculo de valores medios y desvíos estándar). Las variables evaluadas fueron sometidas a un análisis de varianza (ANOVA) separadamente para cada profundidad. Cuando se hallaron diferencias entre sitios, las comparaciones entre medias se realizaron mediante el test de mínima diferencia significativa de Fischer (LSD), a un nivel de significancia del 5%. Además, se ajustaron modelos de regresión lineal simple, entre COT/EAg y COP/EAg como variables explicativas. Los datos fueron analizados mediante el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Para realizar la valoración de N, P y S se seleccionó el método basado en los Costos de Reposición. A través de este método se trata de cuantificar la cantidad de los nutrientes extraídos por la actividad agrícola, con la finalidad de estimar el valor del daño ambiental para retornar a un nivel de calidad anterior. El método estaría indicando el esfuerzo necesario para recuperar el valor integral de un bien que se había perdido, analizando el costo de las inversiones necesarias para neutralizar la pérdida del valor económico generado (Azqueta Oyarzun, 2007). Se calculó el equivalente de nutrientes en fertilizantes necesarios para realizar la restitución en cada secuencia. Los fertilizantes seleccionados fueron Urea para reponer el N perdido y Superfosfato Simple (SPS) para reponer el fósforo y azufre, teniendo en cuenta la amplia difusión y frecuencia de uso de ambos productos en la zona. El Superfosfato Simple es un fertilizante fosfatado en cuya composición química posee un 20% de P_2O_5 . La molécula de P_2O_5 (PM = 142) posee dos átomos de fósforo (PA = 31), por lo tanto, el 43,7% del P_2O_5 es fósforo. Teniendo en cuenta el grado del SPS (20% P_2O_5) se calculó que 100 kg de fertilizante presentan 8,74 kg de P. Asimismo, el SPS aporta azufre (12% de S), por lo tanto, también se empleó a este producto como fuente de S. Por último, la Urea es un fertilizante nitrogenado que en su composición química presenta 46% de Nitrógeno. Debido a la complejidad de

factores que influyen en la recuperación en la planta de los nutrientes agregados al suelo, se consideró un rango entre el 70 y 50% de eficiencia de aplicación para ambos fertilizantes (Stewart, 2007).

Resultados y Discusión

El contenido de COT del suelo en superficie (0-10 cm), presentó diferencias estadísticamente significativas con valores más elevados para la secuencia Trigo/Maíz-Maíz, con respecto a Trigo/Soja-Maíz-Soja y monocultivo de soja ($p < 0,05$). Únicamente el sitio Pujato, con tres años de antigüedad desde que comenzó la intensificación (Trigo/Maíz-Maíz), presentó valores que no mostraron diferencias estadísticamente significativas con respecto a dos de los sitios que llevan adelante la secuencia Trigo/Soja-Maíz-Soja. Asimismo, se detectó significancia estadística entre Pujato en comparación con los lotes bajo monocultivo de soja (Tabla 1).

Los sitios con la secuencia Trigo/Soja-Maíz-Soja presentaron en promedio un 16% menos de COT en superficie con respecto a Trigo/Maíz-Maíz, mientras que para el monocultivo de soja la reducción fue del 22% en comparación con la secuencia más intensificada. Para el estrato subsuperficial (10-20 cm), no se observó una diferenciación en COT tan marcada en función del índice de intensificación como lo fue para el estrato superficial (Tabla 1). La totalidad de los sitios fueron cultivados bajo el sistema siembra directa, con lo cual la mayor acumulación de residuos ocurre en superficie. La acumulación de carbono en el suelo está directamente relacionada con el manejo, ya sea en función del sistema de cultivo (siembra directa o laboreo), como así también depende del grado de intensificación mediante la cantidad y tipo de cultivos en el año (Novelli *et al.*, 2011; Mbuthia, *et al.*, 2015; Serri *et al.*, 2018a, 2018b). En sistemas bajo siembra directa se tiende a aumentar el contenido de carbono orgánico en la capa superficial del suelo, puesto que la menor intensidad de laboreo contribuye a conservar la MO protegida dentro de los agregados (Powlson *et al.*, 2014).

Tabla 1: Carbono orgánico total (COT), masa de carbono y porcentaje de agregados estables en cada uno de los sitios evaluados según secuencia de cultivos y antigüedad, para ambas profundidades de muestreo.

Sitios / Tratamientos	Antigüedad tratamiento (Años)	Profundidad de muestreo (cm)	COT (g kg ⁻¹)	Masa de C orgánico (Mg ha ⁻¹)	Agregados estables al agua (%)
Trigo/Maíz-Maíz					
Fuentes con Terrazas	26	0-10	20,6 ab	28,63 a	28 b
		10-20	13,0 BC	18,98 A	10
Sur Fuentes	22	0-10	20,6 ab	28,02 a	28 b
		10-20	13,0 BC	18,72 A	10
Villa Mugueta	22	0-10	22,6 a	28,25 a	30 ab
		10-20	13,0 BC	18,59 A	9
Sanford	15	0-10	20,6 ab	27,40 a	34 a
		10-20	12,6 BC	18,27 AB	7,5
Coronel Arnold	12	0-10	22,2 a	27,97 a	32 a
		10-20	11,8 C	17,35 B	7
Este Fuentes	12	0-10	19,9 b	25,67 b	26 b
		10-20	11,8 C	16,64 C	10
Pujato	3	0-10	18,7 c	24,12 b	22 c
		10-20	13,8 AB	19,32 A	6,8
Trigo/Soja-Maíz-Soja					
Fuentes	>10	0-10	18,3 c	24,89 b	28 b
		10-20	12,6 BC	18,02 AB	9
Sanford	>10	0-10	18,3 c	24,89 b	20 c
		10-20	14,1 AB	19,18 A	7,8
Zavalla	>10	0-10	15,9 d	21,94 c	20 c
		10-20	11,5 C	16,91 C	7
Monocultivo soja					
Fuentes	>15	0-10	16,8 d	22,01 c	20 c
		10-20	13,0 BC	18,20 AB	7
Coronel Arnold	>15	0-10	15,6 d	21,06 c	14 d
		10-20	13,0 BC	18,33 AB	7

Letras minúsculas y letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) para cada profundidad de muestreo.

El cálculo de masa de carbono/hectárea representa la acumulación de carbono en el suelo en función del volumen real, teniendo en cuenta el espacio poroso. La secuencia de cultivos implementada y la antigüedad desde que comenzó la intensificación, son determinantes en los valores obtenidos para esta variable. Para la capa de 0-20 cm se detectó una diferencia que superó las siete toneladas por hectárea ($p < 0,05$) entre el sistema de rotaciones intensificada de mayor antigüedad (secuencia de cultivos Trigo/Maíz-Maíz con más de 22 años: Fuentes con Terrazas, Sur Fuentes y Villa Mugueta), con respecto a los lotes destinados a monocultivo durante un período de tiempo superior a los 15 años (Figura 1). Asimismo, los sitios cuyo índice de intensificación fue intermedio (secuencia Trigo/Soja-Maíz-Soja II=1,33), manifestaron para el espesor de 0-20 cm una diferencia promedio de cinco toneladas de carbono/hectárea ($p < 0,05$), con respecto a la secuencia de cultivos Trigo/Maíz-Maíz con más de 22 años (Figura 1).

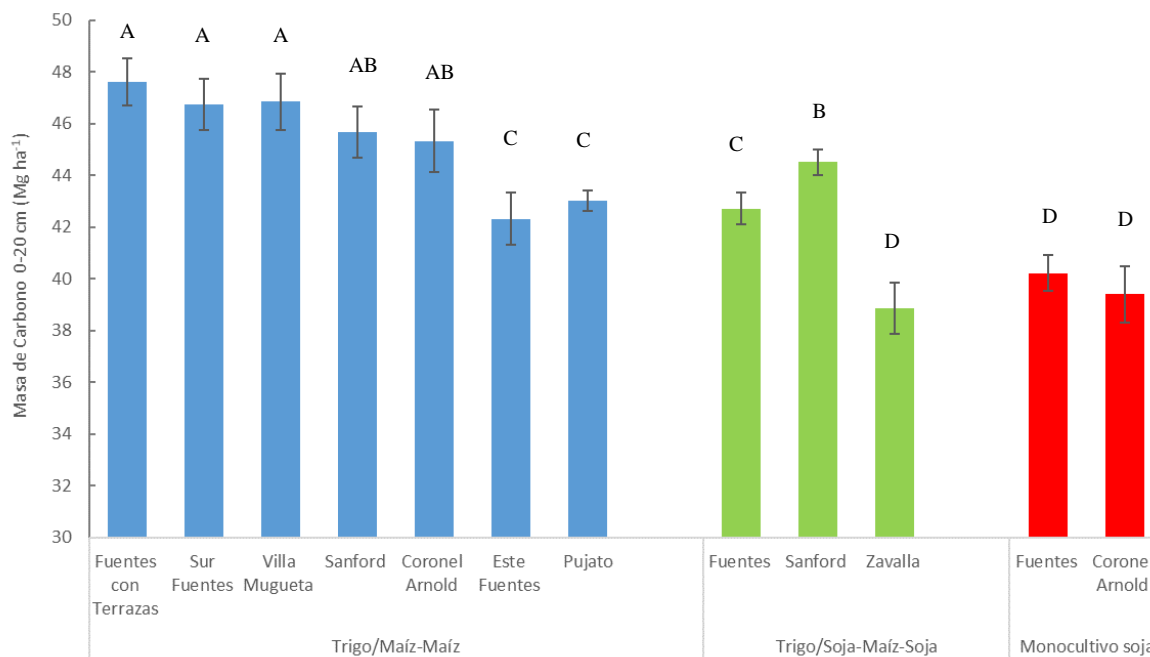


Figura 1: Masa total de carbono (0 -20 cm) en cada uno de los sitios evaluados según secuencia de cultivos y antigüedad. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Las barras verticales en cada punto indican el error estándar de la media.

En todos los casos, los resultados coinciden con otras experiencias que han reportado que la acumulación de carbono depende del manejo y del grado de intensificación (Novelli *et al.* 2011; Mbutia, *et al.*, 2015; Studdert *et al.*, 2017; Serri *et al.*, 2018a). La disminución de la MO del suelo es inversamente proporcional a la cantidad de material carbonado aportado y directamente proporcional a la agresividad del sistema de labranza. Es así que, la adopción de sistemas de cultivo que aumenten el retorno de residuos y reduzcan la intensidad del laboreo, podría permitir mejorar la calidad del suelo y la sostenibilidad agrícola (Lal, 2014). Cabrini *et al.* (2013) evaluaron diferentes actividades agrícolas (Maíz, Trigo/Soja y Soja) en la zona agrícola núcleo de la Región Pampeana Argentina, a los fines de cuantificar el impacto de la actividad productiva sobre los recursos naturales. Estos autores hallaron un balance anual de carbono negativo para todas las actividades estudiadas, siendo la merma más importante para el cultivo de soja. Las pérdidas anuales de carbono para Maíz y Trigo /Soja promediaron 0,2 toneladas/ha; mientras que para el cultivo de soja la pérdida promedio de carbono fue de una tonelada/hectárea.

El carbono orgánico total es el atributo que se utiliza con mayor frecuencia como indicador de la calidad del suelo y de la sustentabilidad agronómica (Manlay *et al.*, 2007; Lal, 2008; Vezzani & Mielniczuk, 2009). La fracción que compone el COP comprende materiales fácilmente degradables y residuos parcialmente descompuestos, con lo cual es la fracción que disminuye más rápidamente debido a que está expuesta a la mineralización puesto que constituye el sustrato inicial para la descomposición microbiana. La valoración del COP se constituye en el compartimento más dinámico de la MO, pudiendo dar indicios tempranos de los efectos de las prácticas de manejo (Lal, 2008, 2014). Por lo tanto, la fracción de carbono lábil resulta de mayor sensibilidad a los efectos del uso de la tierra en el corto-mediano plazo. Además, al ser la fracción más activa, se correlaciona con el ciclado y la disponibilidad de los nutrientes (Galantini & Suñer, 2008; Manlay *et al.*, 2007).

Esta variable es la que presentó mayores diferencias en el estrato superficial (0-10 cm) en función del índice de intensificación y de la antigüedad de implementación. Los sitios cuyo sistema de rotaciones fue el más intensificado por un prolongado período de tiempo (Trigo/Maíz-Maíz), duplicaron el contenido de COP con respecto a la rotación Trigo/Soja-Maíz-Soja y monocultivo de soja (Figura 2). El estrato de 10 – 20 cm profundidad, no presentó diferencias significativas en el contenido de esta fracción de la materia orgánica edáfica. La información obtenida coincide con otros autores que han evaluado el efecto de las secuencias de cultivos, la fertilización y diferentes sistemas de labranza sobre los compartimentos de la materia orgánica. Existe consenso en cuanto a que los mayores cambios de la fracción de carbono más lábil ocurren en los primeros centímetros de profundidad, expresando sensibilidad en cuanto a diferencias en el manejo (Cazorla *et al.*, 2017; Iglesias *et al.*, 2017; Studdert *et al.*, 2017).

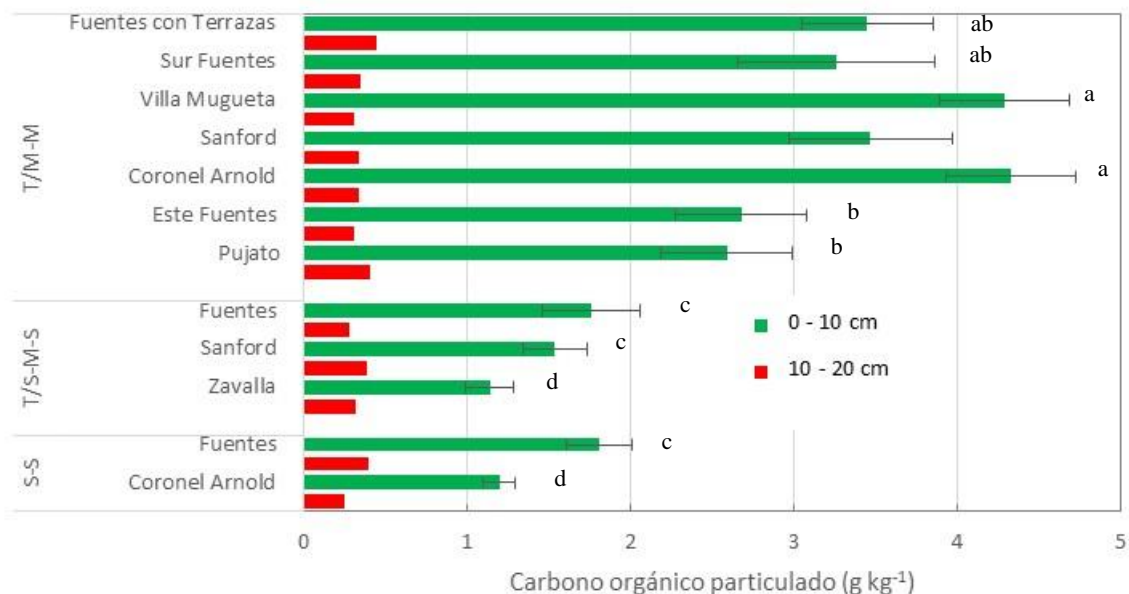


Figura 2: Carbono orgánico particulado para ambas profundidades de muestreo (0-10 y 10-20 cm) en cada uno de los sitios evaluados según secuencia de cultivos y antigüedad. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). Las barras verticales en cada punto indican el error estándar de la media.

En general, la inclusión de gramíneas en la rotación mejora el balance de C del suelo, principalmente por la calidad y cantidad de rastrojos que se producen y se devuelven al suelo, como así también por el aporte de las raíces, mientras que suele ser negativo para las rotaciones con mayor frecuencia de soja. Los impactos negativos en el contenido de MO cuando existe una mayor frecuencia de soja en las rotaciones respecto a la inclusión de gramíneas ya han sido destacados por varios autores en diversas regiones del mundo. La mayor velocidad de descomposición de los residuos de soja en comparación a los rastrojos de maíz y trigo, podría estimular también la mineralización del resto de la MO del suelo. Es así que la reducción o deterioro de la MO implica la posible degradación del suelo y la pérdida de su calidad, constituyendo una amenaza a la conservación de la biodiversidad y sostenibilidad de los agroecosistemas (Cabriní *et al.*, 2013; Pérez Brandan *et al.*, 2014; Iglesias *et al.*, 2017).

La MO es reserva de numerosos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, contiene aproximadamente un 58% de carbono (C) y presenta una relación C/N/P/S estimada en 120:10:1,3:1,3 (Manlay *et al.*, 2007). A partir de esta información, como consecuencia de cambios en el contenido de carbono del suelo, es factible estimar la cantidad de nutrientes que pueden modificarse en los primeros 20 cm de profundidad correspondiente al espesor de suelo evaluado. Teniendo en cuenta la secuencia más intensificada (100% gramíneas), se calculó un incremento promedio en la masa de carbono orgánico en el suelo que osciló entre 3500 y 5600 kg ha⁻¹, 292 a 467 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 38 a 61 kg ha⁻¹ de fósforo y 38 a 61 kg ha⁻¹ de azufre en Trigo/Maíz-Maíz con respecto a Trigo/Soja-Maíz-Soja y monocultivo de soja, respectivamente. La MO actúa como fuente y destino de los nutrientes en el sistema, con lo cual, esta diferencia en el aporte de residuos orgánicos que se generó con la implementación de la secuencia más intensificada implica un mayor aporte de nutrientes potencialmente disponibles para las plantas ((Domínguez *et al.*, 2016; Studdert *et al.*, 2017).

Tal cual se mencionó anteriormente, en los sistemas productivos de nuestro país no se llega a valores donde se logre reponer la totalidad de lo extraído por los cultivos, aunque se observa una tendencia al aumento de la reposición de N, P y S removidos. Debido al incremento de la MO hallado en Trigo/Maíz-Maíz, habría para esta secuencia de cultivos un mayor aporte de nutrientes potencialmente disponibles para las plantas en relación a la secuencia Trigo/Soja-Maíz-Soja y monocultivo de soja. A los fines de cuantificar y poner en valor el costo de reposición, se realizó la conversión del cambio de nutrientes a kilogramos de fertilizantes en la capa de 0-20 cm (Tabla 2). En base al grado de los fertilizantes seleccionados

(concentración de nutriente) y a la eficiencia considerada se estimó el aporte equivalente que generó la secuencia más intensificada (Trigo/Maíz-Maíz).

Tabla 2: Aporte de nutrientes (calculado en equivalente fertilizante) para la secuencia Trigo/Maíz-Maíz con respecto a Trigo/Soja-Maíz-Soja y monocultivo de soja, correspondiente al estrato de 0-20 cm

Secuencia	Equivalente en kg de fertilizante por hectárea		
	Urea (N)	Superfosfato Simple (P)	Superfosfato Simple (S)
Trigo/Soja-Maíz-Soja	825* - 952**	565 - 652	412 - 475
Monocultivo de soja	1320 - 1523	907- 1047	661 - 763

Cálculo de fertilizante considerando 70% (*) y 50% (**) de eficiencia de recuperación

En situaciones de balance de nutrientes negativos, cuando la exportación en productos de cosecha (granos y forrajes) es superior al aporte a través de producción de biomasa, abonos orgánicos y/o fertilizantes, los niveles de MO disminuyen aportando a través de su mineralización los nutrientes necesarios para los cultivos (Lehmann *et al.*, 2017; Batista *et al.*, 2018). El análisis de la información provista por la Tabla 2, pone de manifiesto el efecto de recuperación del suelo mediante la intensificación (secuencia Trigo/Maíz-Maíz). Se observa que el incremento en la MO en la capa superficial de 0-20 cm, a través del incremento de carbono en el suelo (Tabla 1), generó un aporte de nutrientes de considerable magnitud. En el caso de pretender igualar esa dotación deberían agregarse vía fertilizante importantes cantidades de producto, siendo los valores superiores para el monocultivo de soja (Tabla 2).

La extracción continua de nutrientes con baja o nula reposición requiere de una revisión en el manejo de los sistemas productivos. Es necesario una mejora en el uso de los recursos e insumos, en la cual los nutrientes desempeñan un papel esencial. El balance de los nutrientes debe compatibilizarse con los objetivos del productor que se definen como: productividad, rentabilidad, durabilidad del sistema de producción y ambiente saludable. A partir del cálculo en la disminución de nutrientes por las diferentes actividades se modifica en parte la visión de la empresa agropecuaria, puesto que ya no se prioriza la rentabilidad económica a expensas de la durabilidad del sistema de producción y el ambiente saludable. El hecho de no reponer la cantidad de nutrientes extraídos por la actividad agrícola sobreestima los beneficios, debido a que en el análisis económico no se incluye el costo de degradación del capital natural del suelo (Azqueta Oyarzun, 2007). Numerosos autores han señalado la necesidad de reponer la dotación de nutrientes para no comprometer la potencialidad productiva del recurso suelo debido a la disminución del nivel de fertilidad, que en algún momento se refleja o se reflejará en una disminución de los rendimientos de los cultivos (Flores & Sarandón, 2002; Veneciano & Frigerio, 2003; Cruzate & Casas, 2012, 2017; Melgar, 2015).

Un importante indicador de la salud física de los suelos es la compactación que puede ser evaluada a través de la densidad aparente. En nuestro estudio, los valores de DA, tanto en el estrato superficial (0-10 cm) como subsuperficial (10-20 cm) no manifestaron diferencias estadísticamente significativas entre sitios. Los valores promedio y desvíos estándar obtenidos fueron 1,33 Mg m⁻³ ($\pm 0,043$) y 1,41 Mg m⁻³ ($\pm 0,030$) para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm, respectivamente. Valores de DA >1,3 Mg m⁻³ en la capa superficial, se considera como límite superior para el óptimo crecimiento radicular (Wilson *et al.*, 2013; Duval *et al.*, 2015). La compactación depende de agentes externos (manejo, clima), como así también depende de los componentes sólidos del suelo (Reynolds *et al.*, 2009). La composición mineralógica de los suelos donde se llevaron a cabo las mediciones consiste en arcillas del tipo illítico y principalmente limo que puede contener hasta un 42% de fitolitos, componente que le confiere mayor susceptibilidad a la compactación (Cosentino & Pecorari, 2002). Factores como la pérdida de MO, la falta de cobertura superficial y el sistema radicular de los cultivos pueden agravar los problemas de compactación (Ferrerías *et al.*, 2007). En sectores del paisaje con suelo desnudo, es factible que disminuya la cantidad de agua ingresada al suelo, generando una reducción en la capacidad de almacenaje. Además, se potencia el escurrimiento superficial con las consiguientes pérdidas y arrastre de partículas. En los sitios en los cuales se incluye el cultivo de soja, ya sea en secuencias combinadas o como monocultivo con barbechos prolongados, el suelo permanece con menor cobertura y expuesto a los procesos erosivos. Estas características reducen la infiltración de gran parte del agua de lluvia que no puede ser consumida por parte de ese cultivo de soja. El desplazamiento en superficie del agua cobra mayores dimensiones en las áreas onduladas. Como consecuencia del escurrimiento superficial, se produce el arrastre de sedimentos ricos en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y otros nutrientes esenciales para la producción agrícola, pérdidas que podrían ser fácilmente evitadas con un manejo diferente (Duval *et al.*, 2015). La disminución del ingreso del agua al suelo y su posterior almacenamiento genera una mayor dependencia ambiental de los cultivos y una mayor variabilidad en los rendimientos. Caso contrario, un suelo con elevada capacidad de

almacenamiento/abastecimiento de agua determina cierta independencia climática por parte del cultivo. En el análisis de los datos obtenidos, se observa que dentro de los establecimientos con la secuencia más intensificada (Trigo/Maíz-Maíz) hay dos sitios con valores inferiores de COT y COP: Este de Fuente y Pujato (Tabla 1). En párrafos anteriores se hace mención al sitio Pujato, cuya antigüedad en la secuencia intensificada es solo de tres años, lo que podría explicar en parte los resultados obtenidos en relación a una menor acumulación de carbono orgánico. Para el caso de Este Fuentes, se trata de un lote con leve pendiente, con algunos riesgos de erosión que podría acrecentar limitantes desde el punto de vista de la infiltración del agua, actividad biológica y consecuente acumulación de residuos.

Los suelos con buena calidad física deben tener características de almacenaje y transmisión de fluidos que permitan proporciones adecuadas de agua, nutrientes disueltos y aire como para promover el máximo desarrollo de los cultivos y una mínima degradación ambiental. Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces es a través de la estabilidad de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tanto los aspectos relacionados con la compactación, como los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Dexter, 2004). Por otro lado, este parámetro se relaciona directamente con el carbono orgánico y con la actividad biológica, por lo cual se lo considera un indicador con la capacidad de integrar diferentes funciones en el suelo. Además, suele ser suficientemente sensible para reflejar cambios de disturbio, recuperación o manejo (Wingeyer *et al.*, 2015; Iglesias *et al.*, 2017; Rabot *et al.*, 2018). Los resultados obtenidos muestran en la capa superficial (0-10 cm), diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre la EAg de los sitios con la secuencia más intensificada (Trigo/Maíz-Maíz) en relación al monocultivo de soja, resultando claros indicadores de favorable condición física en los sitios con mayor índice de intensificación (Tabla 1). Sin embargo, el sitio Pujato cuya secuencia implementada es la más intensificada (aunque con poca antigüedad), repitió el comportamiento en cuanto a presentar valores inferiores similares a la secuencia a la Trigo/Soja-Maíz-Soja. La menor acumulación de materia orgánica en este sitio producto de pocos años de haberse implementado la intensificación, pudo haber sido un factor determinante en los valores bajos de EAg (Tabla 1). Los datos de agregados estables al agua hallados en el estrato de 10 – 20 cm profundidad no manifestaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0,05$), siguiendo el mismo compartamiento que el carbono orgánico del suelo cuya acumulación ocurre en superficie.

Es importante distinguir como influye la agregación que aporta la materia orgánica, como factor de unión de partículas primarias generando un equilibrio en la distribución del tamaño de los poros, además del contenido de arcilla. A través de la estabilidad de agregados al agua se evalúa por un lado la susceptibilidad de los agregados debida al hinchamiento y dispersión como consecuencia del humedecimiento, es decir, se mide la cohesión de los agregados aportada por el contenido de arcilla y materia orgánica. No obstante, este método permite medir fundamentalmente el efecto “estallido”, debido al ingreso brusco de agua. La circulación de gases y fluidos se produce a través de los macroporos, por lo tanto la carencia de una porosidad adecuada que permita la salida del aire atrapado produce la ruptura de los agregados (Pilatti & Orellana, 2000). Los suelos evaluados en este estudio presentan similares contenidos de arcilla en el horizonte superficial (promedio 241,25 g kg⁻¹), con lo cual las diferencias entre tratamientos se atribuyen a distintos contenidos de carbono del suelo.

La degradación física es la manifestación más claramente asociada a las características del manejo del suelo y su rotación, particularmente en lo que hace a la estabilidad de los agregados y la densificación de la capa arable. Esta densificación puede tener dos orígenes bien diferenciados; uno correspondiente al efecto de compactación de las herramientas y rodados sobre el suelo, y otro al fenómeno de inestabilidad de los elementos estructurales por pérdida de cohesión que conducen a la formación de una capa masiva, fundamentalmente en lotes de agricultura continuada sin rotación y con un balance de carbono negativo. Las propiedades físicas del suelo como agregación y porosidad, influyen sobre el crecimiento de las plantas a través de su efecto sobre la humedad, temperatura y aireación del suelo y sobre la impedancia mecánica al desarrollo radicular, incidiendo finalmente sobre el rendimiento del cultivo. Lograr buena formación de agregados y estabilidad ante las situaciones de estrés, es fundamental puesto que se asegura el almacenaje y transmisión de fluidos como para promover el máximo desarrollo de los cultivos y organismos del suelo. Una porosidad adecuada y un elevado contenido de MO y arcilla en el suelo, permiten mayor cohesión y estabilidad de los agregados (Carrizo, 2015; Iglesias *et al.*, 2017; Rabot *et al.*, 2018).

Lo expuesto anteriormente se puede observar con claridad en las Figuras 3 y 4, donde se muestra a través de un análisis de regresión lineal una correlación positiva y significativa entre el porcentaje de agregados estables al agua con el carbono orgánico total y con la fracción particulada del suelo. Rubio *et al.* (2019) evaluaron la estabilidad estructural en una importante cantidad de sitios en Uruguay con diferentes manejos (agricultura continua y pasturas) con suelos clasificados como Molisoles, cuya composición de arcilla y COT en superficie fluctuó entre 250-440g kg⁻¹ y 14,6-32g kg⁻¹, respectivamente. Estos autores hallaron una

mayor proporción de estallido de los agregados en los sitios que llevaban a cabo monocultivo de soja, siendo el COT una de las variables que tuvo mayor correlación con la estabilidad estructural. En coincidencia con los resultados en nuestra experiencia, determinaron que las prácticas de manejo tendientes a aumentar la cantidad de carbono en el suelo favorecerían la estabilidad de los agregados. Asimismo, estudios llevados a cabo por Pilatti & Orellana (2000) sobre Molisoles en nuestro país, determinaron una relación directa entre contenidos de $\text{CO} \geq 17 \text{ g kg}^{-1}$ y satisfactoria estabilidad de agregados en horizontes superficiales, cuya proporción de limo alcanza valores elevados (60 a 70 %) y se torna desfavorable para la agregación.

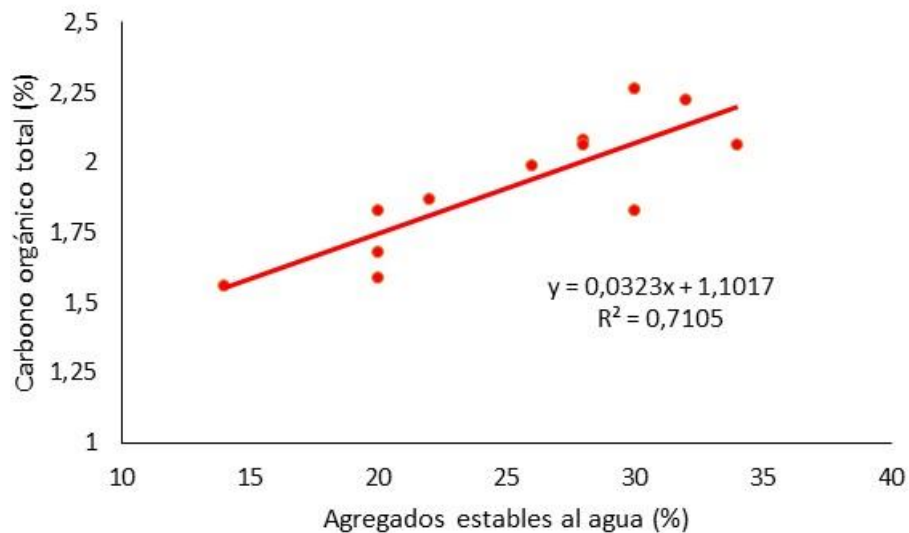


Figura 3: Relación entre el carbono orgánico total (COT) y el porcentaje de agregados estables al agua del suelo para los sitios evaluados, correspondiente al estrato 0-10cm.

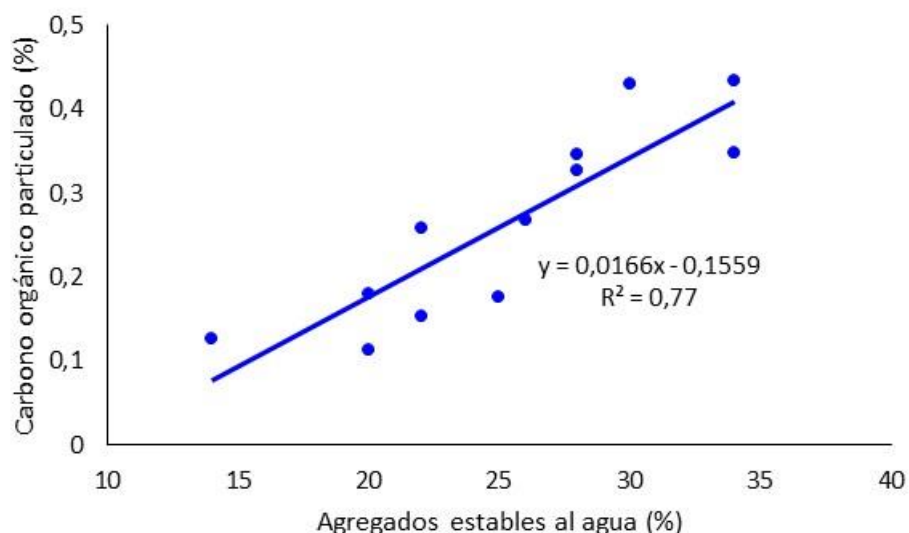


Figura 4: Relación entre el carbono orgánico particulado (COP) y el porcentaje de agregados estables al agua del suelo para los sitios evaluados, correspondiente al estrato 0-10cm.

La relación positiva entre COT y EAg, como así también COP y EAg confirma la importancia que tiene el hecho de incrementar la proporción de carbono en el suelo, tanto la fracción humificada como la fracción

fácilmente oxidable. Las partículas de suelo se unen a través de materiales orgánicos e inorgánicos mediante fuertes lazos para constituir microagregados que a su vez se unen para formar los macroagregados. Los microagregados se forman a partir de MO asociada a la fracción mineral arcilla y cationes polivalentes para formar partículas compuestas. Estas partículas se unen formando los macroagregados con la importante intervención de la materia orgánica particulada, considerada la fracción más dinámica de la MO del suelo (Tisdall, 1996). Es así que, tanto la fracción humificada como la particulada, participan de diferente forma en la formación y estabilización de los agregados, generando unión entre partículas sólidas fortaleciendo la estructura a través de enlaces coloidales y a la vez incrementando la macroporosidad como respuesta a una mejor unión entre sólidos, demostrando la acción de la materia orgánica (Pilatti & Orellana, 2000; Carrizo, 2015; Rabot *et al.*, 2018; Rubio *et al.*, 2019).

Un aporte extra de carbono orgánico a través de la incorporación de gramíneas en las rotaciones, como así también incrementar la ocupación del suelo que mantienen un activo crecimiento de raíces, además de incrementar la cantidad de carbono del suelo, ofrecerían un ambiente más propicio para el desarrollo de poblaciones microbianas debido a que contribuye a mejorar la actividad biológica del estrato superficial (Lehmann *et al.*, 2017; Batista *et al.*, 2018). Si asumimos que este aporte de C está representado en gran parte por la fracción más lábil, se estarían produciendo cambios inmediatos que impactarían sobre propiedades físicas como la estructura, sobre la actividad biológica, como así también sobre la provisión de nutrientes. Los resultados demuestran la importancia de incrementar la proporción de cultivos que aporten volúmenes importantes de rastrojos, la ventaja de mantener el suelo la mayor parte del año habitado por raíces vivas, situación que no ocurre en el monocultivo de soja, cuyos períodos de barbecho son prolongados. Se pone de manifiesto la influencia directa de la cantidad y calidad del residuo aportado en cada sistema. Realizar cultivos diferentes y a su vez incrementar la cantidad de cultivos/año son prácticas que contribuyen a mejorar la calidad del suelo, promoviendo la diversidad y actividad microbiana, como también la eficiencia en el ciclado de nutrientes.

Consideraciones finales

Los sistemas productivos de la región necesitan ser manejados con mayor diversidad de especies, para lograr un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles (agua, luz y nutrientes). Las rotaciones de cultivos y la incorporación de gramíneas presentan numerosas ventajas comparadas con los sistemas de monocultivo de soja, sin excluir a este cultivo del modelo productivo. Algunas de estas ventajas se relacionan con i) la posibilidad de acumular mayores cantidades de residuos de distinta calidad que representan significativos aportes de C para el suelo, como así también aporte de nutrientes, ii) la mayor intensidad de uso del suelo; y iii) la mayor eficiencia de uso del agua al haber más de un cultivo/año. Contrariamente, la soja provee un rastrojo que se descompone rápidamente, dejando al suelo con muy poca cobertura y expuesto a la acción erosiva. El carbono es el principal elemento que forma parte de la MO, es de vital importancia puesto que proporciona la energía y es el sustrato de los organismos vivos heterótrofos para sostener las diversas funciones, por lo tanto toda práctica de manejo de suelo que contribuya a incrementar este componente redundará en un aumento de la calidad del suelo. Las gramíneas tienen la capacidad de explorar el suelo con su profuso sistema radicular, produciendo la ruptura de capas compactadas y mejorando su condición. Además, dejan un volumen de rastrojo aéreo y raíces abundante que es de lenta descomposición, por lo que el suelo permanece cubierto durante más tiempo y genera mejores condiciones en la dinámica de agua del suelo.

Un modelo productivo de estas características, que contribuya a aumentar el contenido de materia orgánica del suelo, además del impacto positivo en su condición física, química y biológica, también contribuye a la sustentabilidad ambiental ya que se reduce la emisión de CO₂ a la atmósfera través del secuestro de carbono en el suelo. Por último, al haber un mayor aporte de nutrientes como consecuencia del incremento en la materia orgánica, se produce una optimización en el uso de recursos e insumos.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue realizado en el marco de Convenios de Servicios No Estandarizados establecidos entre la Cátedra de Edafología – Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario) y la empresa Alfagro S.A., iniciado en el año 2011. Los autores agradecen a la empresa tanto el apoyo financiero, como el suministro de los sitios de muestreo.

Referencias

AAPRESID. (2018). Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. Evolución de la Siembra Directa en Argentina. Campaña 2016/17. Pp 1-8.

- ALEXANDRATOS N. & J. BRUINSMA. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO.
- ANDRADE, F.H. (2017). Los desafíos de la agricultura argentina. CABA. Ediciones INTA. 120 pp.
- ANDRADE J.F., S.L. POGGIO, M. ERMÁCORA & E.H. SATORRE. (2015). Productivity and resource use in intensified cropping systems in the Rolling Pampa, Argentina. *European Journal of Agronomy* 67: 37-51.
- ANDRADE J.F. & E.H. SATORRE. (2015). Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research* 177: 137-147.
- AZQUETA OYARZUN D. (2007). Introducción a la Economía Ambiental. 2da Edición. Mc Graw Hill – Interamericana de España S.A.U.
- BATISTA E.R., C.S. ZANCHI, D. FERREIRA, F. AGUIAR SANTIAGO, F. ARAÚJO PINTO, J.V. DOS SANTOS, E. BARBOSA PAULINO & M.A. CARBONE CARNEIRO. (2018). Atributos biológicos do solo em sistema integrado de produção agropecuária. In: Souza E.D. et al. ed. *Sistemas Integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: Copiart v. 1, p. 71-90.
- BCR. (2019). Cada vez más lejos de la soja, el nuevo ciclo marcará un nuevo récord de rotaciones. Guía Estratégica para el Agro. Bolsa de Comercio de Rosario. [http://www.bcr.com.ar/Pages/GEA/\(01/08/2019\)](http://www.bcr.com.ar/Pages/GEA/(01/08/2019)).
- BLAKE G.R. & K.H. HARTGE. (1986). Bulk Density: In: Klute, A. (ed). *Methods of Soil Analysis*. Part 1 (2nd ed.). Pp. 363-375. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- CABRINI S.M., C.P. CALCATERRA & D. LEMA. (2013). Costos Ambientales y Eficiencia Productiva en la Producción Agraria del Partido de Pergamino. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. Vol. 20: 27-43.
- CAMBARDELLA C.A. & E.T. ELLIOTT. (1992). Particulate organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777-783.
- CARRIZO, M.E. (2015). Regeneración de la estructura en Argiudoles de la provincia de Santa Fe (Argentina). Tesis Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Escuela para Graduados.
- CAVIGLIA O.P., V.O. SADRAS & F.H. ANDRADE. (2004). Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas: I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat – soybean. *Field Crops Research* 87: 117–129.
- CAVIGLIA O. & F.H. ANDRADE. (2010). Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3: 1-8.
- CAZORLA C.R., J.M. CISNEROS, I.S. MORENO & C.M. GALARZA. (2017). Mejora en el carbono del suelo y estabilidad de agregados por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del Suelo* 35: 301-313.
- COLLINO D.J., F. SALVAGIOTTI, A. PERTICARI, C. PICCINETTI, G. OVANDO, S. URQUIAGA & R.W. RACCA. (2015). Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: Relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant and Soil* 392: 239–252.
- COSENTINO D. & C. PECORARI. (2002). Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*; 20: 9-16.
- COSTA J.L., V.C. APARICIO & A. CERDA. (2014). Soil physical quality changes under different management systems after 10 years in Argentinian Humid Pampa. *Solid Earth Discuss*; 6: 2615–2644.
- CRUZATE G.A & R. CASAS. (2012). Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6: 7-14
- CRUZATE G.A & R. CASAS. (2017). Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 28: 14-23.
- DEXTER A.R. (2004). Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- DI RIENZO J.A., F. CASANOVES, M.G. BALZARINI, L. GONZALEZ, M. TABLADA & C.W. ROBLEDO. (2015). InfoStat versión 2015. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- DOMÍNGUEZ, G.F., G.V. GARCÍA, G.A. STUDDERT, M.A. AGOSTINI, S.N. TOURN & M.N. DOMINGO. (2016). Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as soil health indicator? *Spanish J. Soil Sci.* 6: 82-97.

- DUVAL M.E., J.A. GALANTINI, J.M. MARTÍNEZ, F.M. LÓPEZ & L.G. WALL. (2015). Evaluación de la calidad física de los suelos de la región pampeana: efecto de las prácticas de manejo. *Ciencias Agronómicas - Revista XXV*: 033 – 043.
- FAO & GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, www.fao.org/3/a-i5126s.pdf.
- FEÓDOROFF, A. (1960). Nouvelles normes pour l'appareil à tamiser. *Ann. Agron.* 11: 651-655.
- FERRERAS L.A., G.C. MAGRA, P. BESSON, E. KOVALEVSKI & F.O. GARCÍA. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25: 159-172.
- FERRERAS L.A., S. TORESANI, C. GALARZA & V. FAGGIOLI. (2015). Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Spanish Journal of Soil Science*, 5:227-242.
- FLORES, C.C. & S.J. SARANDÓN. (2002). ¿Racionalidad económica versus sustentabilidad ecológica? El ejemplo del costo oculto de la pérdida de fertilidad del suelo durante el proceso de Agricultura en la Región Pampeana Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía-La Plata* 105: 52 – 67.
- GALANTINI, J.A. & L. SUÑER. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de Argentina. *Agriscientia* 1: 41-55.
- GARCÍA, F.O. & M.F. GONZÁLEZ SANJUAN. (2010). Balance de nutrientes en Argentina. ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos?. *Informaciones Agronómicas* N° 48: 1-5.
- GARCÍA, F.O. & F. SALVAGIOTTI. (2009). Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del Cono Sur de Latinoamérica. Simposio de Eficiencia de Uso de Nutrientes IPNI. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo - San José, Costa Rica.
- GEOINTA: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2014/05/22/mapa-de-suelos-de-la-provincia-de-santa-fe>.
Última visita: 11/05/19
- HARVEY, M. & S. PILGRIM. (2011). The new competition for land: food, energy, and climate change. *Food Policy* 36: S40–S51.
- HÉNIN S., R. GRAS & G. MONNIER. (1972). El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. *Mundi Prens.* pp 342.
- IGLESIAS, J.O, J.A. GALANTINI & A. VALLEJOS. (2017). Estabilidad de agregados de un Argiustol del SO bonaerense con diferentes sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*, 35: 189-203.
- LAL, R. (2008). Soils and sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev*; 28: 57-64.
- LAL, R. (2014). Societal value of soil carbon, *J. Soil Water Conserv.* 69:186A-192A.
- LEHMANN A., W. ZHENG & M.C. RILLIG. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature Ecology & Evolution* v1: 1828–1835.
- MANLAY, R., C. FELLER & M.J. SWIFT. (2007). Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 217–233.
- MBUTHIA, L.W., V. ACOSTA-MARTÍNEZ, J. DEBRUYN, S. SCHAEFFER, D. TYLER, E. ODOI, M. MPHESHEA, F. WALKER & N. EASH. (2015). Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biol. Biochem.* 89: 24-34.
- MELGAR, R. (2015). ¿Por qué en la Argentina no se reponen los nutrientes extraídos con las cosechas?. *Fertilizar*, 32: 24 -29.
- MONZON J., J. MERCAU, J. ANDRADE, O. CAVIGLIA, A. CERRUDO, A. CIRILO, C. VEGA, F.H. ANDRADE & P. CALVIÑO. (2014). Maize – soybean intensification alternatives for the Pampas. *Field Crops Research* 162: 48–59.
- NELSON, D. & L. SOMMERS. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. Pp. 961-1010. In: Sparks, D et al. (ed). *Methods of soil analysis. Part 3. SSSA. Book Series 5. SSSA & ASA, Madison, WI.*
- NOVELLI, L.E., O.P. CAVIGLIA & R.J.M. MELCHIORI. (2011). Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma*: 167-168: 254-260.
- OELBERMANN M. & L. ECHARTE. 2011. Evaluating soil carbon and nitrogen dynamics in recently established maize-soybean inter-cropping systems. *European Journal of Soil Science* 62:35–41.
- PÉREZ-BRANDAN C., J.L. ARZENO, J. HUIDOBRO, C. CONFORTO, B. GRUMBERG, S. HILTON, G.D. BENDING, J. MERILES & S. VARGAS-GIL. (2014). The effect of crop sequences on soil

- microbial, chemical and physical indicators and its relationship with soybean sudden death syndrome (complex of *Fusarium* species). *Span. J. Agric. Res.* 12: 252-264.
- PILATTI, M.A. & J.A. ORELLANA. (2000). The ideal soil: II. Critical values of an “ideal soil,” for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustain. Agr.* 17: 89-111.
- POWLSON, D.S., C.M. STIRLING, M.L. JAT, B.G. GERARD, C.A. PALM, P.A. SANCHEZ & K.G. CASSMAN. (2014). Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Ch.* 4: 678-683.
- RABOT E., M. WIESMEIER, S. SCHLÜTER & H.J. VOGEL. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, 314: 122-137.
- REYNOLDS W.C., C.F. DRURY, C.S. TAN, C.S. FOX & X.M. YANG. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263.
- RUBIO, V., M. PÉREZ BIDEGAIN, A. BERETTA, E. BAROLIN & A. QUINCKE. (2019). Impacto de propiedades físico-químicas en la estabilidad estructural de Molisoles. *Ciencia del Suelo*, 37: 367-371.
- SAINZ ROZAS H.R., H.E. ECHEVERRIA & H.P. ANGELINI. (2011). Niveles de Materia Orgánica y pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y Extrapampeana. *Ciencia del Suelo* 29: 29-37.
- SERRI, D.L., M. BOCCOLINI, R. OBERTO, D. CHAVARRÍA, N. BUSTOS, C. VETTORELLO, H. APEZTEGUÍA, J. MIRANDA, C. ALVAREZ, C. GALARZA, S. CHIÓFALO, M. MANRIQUE, R. SUELDO, M.C. FERNANDEZ BELMONTE, L. MATTALIA, C. CHOLAKY & S. VARGAS-GIL. (2018a). Efecto de la agriculturización sobre la calidad biológica del suelo. *Ciencia del Suelo* 36: 92-104.
- SERRI D.L., J. MERILES, C. CONFORTO, C. PÉREZ BRANDAN, S. PASTOR, B. GRÜMBERG, C. LUNA, C. LORENZON, J. ARCE, H. MARELLI & S. VARGAS-GIL. (2018b). Incorporación de trigo en la rotación agrícola: una herramienta para potenciar el funcionamiento del agroecosistema. *Ciencia del Suelo*, 36: 74-87.
- STEWART, W.M. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas* 67: 1-7.
- STUDDERT, G.A., M.N. DOMINGO, G.V. GARCÍA, M.G. MONTERUBBIANESI & G.F. DOMÍNGUEZ. (2017). Carbono orgánico del suelo bajo sistemas de cultivo contrastantes y su relación con la capacidad de proveer nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 35: 285-299.
- TILMAN, D., C. BALZER, J. HILL & B.L. BEFORT. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences PNAS*: 50; 20261-20264. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1116437108.
- TISDAL, J.M. (1996). Formation of soil aggregates and accumulation of soil organic matter, In: Carter, MR & BA Stewart (eds). *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 57-96 pp.
- TRASAR-CEPEDA C., M.C. LEIROS, S. SEOANE & F. GIL-SOTRES. (2008). Biochemical properties of soils under crop rotation. *Appl Soil Ecol*; 39: 133-143.
- VENECIANO, J.H & K.C. FRIGERIO. (2003). Exportación de macronutrientes en sistemas extensivos de San Luis. *Informaciones Agronómicas* 17: 17-22.
- VEZZANI, F.M. & J. MIELNICZUK. (2009). Uma visão sobre qualidade do solo. *Rev Bras Cien Solo*; 33:743-755.
- WILSON, M.G., M.C. SASAL & O.P. CAVIGLIA. (2013). Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192: 354–361.
- WINGEYER, A.B., T.J.C. AMADO, M. PÉREZ-BIDEGAIN, G.A. STUDDERT, C.H. PERDOMO VARELA, F.O. GARCÍA & D.L. KARLEN. (2015). Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. *Sustainability*, 7:2213-2242.
- YIN, R.K. (1994). *Case Study Research – Design and Methods*, Applied Social Research Methods (Vol. 5, 2nd ed.), Newbury Park, CA, Sage.

Received on 04, 2020.

Accepted on 09, 2020.