

Ensayos de Larga Duración en Argentina:

Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas Sustentables

Fernando Salvagiotti, Hugo Krüger, Guillermo Studdert



Ensayos de larga duración en Argentina : un aporte al logro de sistemas agrícolas sustentables / Hugo Krüger ... [et al.] ; compilado por Fernando Salvagiotti ; Hugo Krüger ; Guillermo Studdert. - 1a ed. - Entre Ríos : Ediciones INTA, 2017. Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-521-886-4

1. Sustentabilidad. 2. Producción. 3. Suelos. I. Krüger, Hugo II. Salvagiotti, Fernando, comp. III. Krüger, Hugo, comp. IV. Studdert, Guillermo, comp.
CDD 633.1

Un especial agradecimiento a Rosa Ana Milocco del Grupo de Comunicaciones de INTA EEA Paraná por sus valiosísima ayuda e infinita paciencia para el diseño de esta publicación.

Fotografías de Tapa:

Foto central ELD INTA BALCARCE (Gent. Guillermo Studdert)
Izquierda abajo ELD CORRAL DE BUSTOS (Gent. Hugo Ghio)
Derecha abajo ELD INTA BARROW (Gent. Horacio Forjan)
Derecha arriba ELD INTA GRAL VILLEGAS (Gent. Mirian Barraco)

Ensayos de Larga Duración en Argentina:

Un aporte al logro de Sistemas
Agrícolas Sustentables

Editores:

Fernando Salvagiotti

Hugo Krüger

Guillermo Studdert



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación

Prólogos

Esta obra comparte los resultados de los experimentos agrícolas de larga duración que el INTA lleva adelante en los últimos años a través del Programa Nacional de Cereales y Oleaginosas. Su localización comprende gran parte de la región productora de cereales y oleaginosas de nuestro país, y en algunos casos fueron iniciados hace 40 años. En todo este tiempo, innumerable cantidad de especialistas de INTA, asesores, asociaciones de productores, y productores en general, han tenido oportunidad de participar o visitar esos sitios experimentales. Su permanencia y vigencia en el tiempo, pese a no pocas dificultades, les da un valor inapreciable para determinar los efectos a mediano y largo plazo de las diferentes prácticas culturales y constituyen, además, un insumo raramente disponible, pero necesario, para una correcta modelización y validación de diferentes alternativas productivas. Es justo reconocer los aportes de financiamiento parcial que diversos Centros Regionales y sus Estaciones Experimentales prestaron a la continuidad de los experimentos, conscientes de su importancia para el desarrollo de sistemas de producción de granos cada vez más sustentables.

Este trabajo que ponemos a disposición de productores, asesores, y funcionarios de gobierno, demandó un enorme esfuerzo de compilación y sistematización de la información, así como de análisis apropiado y de interpretación de resultados. Convierte en evidentes ciertos efectos importantes a mediano y largo plazo, con frecuencia indetectables en un simple experimento en una campaña determinada.

Es oportuno, también, reconocer a todos quienes formaron parte de los equipos técnicos de conducción en la etapa inicial de estos experimentos de larga duración, y por supuesto a quienes los sucedieron con similar entusiasmo y rigor profesional.

Ing. Agr. Guillermo Hugo Eyhéabide, M.Sc. Ph.D.
Coordinador Programa Nacional Cereales y Oleaginosas

Los ensayos de larga duración otorgan la posibilidad de comprender las complejas interacciones que ocurren entre el suelo, las comunidades vegetales y el clima. Permiten responder preguntas relacionadas con el desfase entre la causa y su efecto, encontrar umbrales críticos, determinar tendencias cíclicas y conocer qué eventos son raros y/o extremos. En general, las estimaciones mejoran a medida que aumenta el tiempo desde su implementación, cuando la frecuencia de medición de variables se realiza en forma continua y es lo suficientemente fina como para poder captar efectos dinámicos. Además, representan la fuente de información más valiosa para la utilización exitosa de modelos de simulación y la realización de prospectiva.

El INTA ha realizado y continúa haciendo grandes esfuerzos para mantenerlos en funcionamiento. Tras el logro de la síntesis de resultados recopilados para conocer el impacto de los cambios tecnológicos sobre la productividad de los sistemas y el ambiente, se busca adaptarlos, incorporando

nuevas tecnologías para controlar los problemas encontrados, comprender los nuevos procesos que se desarrollan y su dinámica, y proponer, posteriormente, el rediseño de los sistemas de producción de manera que resulten con menores externalidades negativas. Hacia el final de la primera década del presente siglo ha mejorado considerablemente el trabajo en red, la unificación de metodologías de trabajo y su compilación para hacer crecer las bases de datos provenientes de los ensayos de nuestro país. El lector encontrará en esta contribución algunos de los importantes avances logrados en relación con el análisis y el diseño de los ensayos de largo plazo y los resultados que se alcanzaron debido a su implementación en las diferentes regiones de Argentina.

*Ing. Agr. Adrián Enrique Andriulo , M.Sc. Dr.
Coordinador Programa Nacional Suelos*

AUTORES

Hugo Krüger, INTA EEA BORDENAVE

Fernando Salvagiotti, INTA EEA OLIVEROS

Guillermo Studdert, UIA BALCARCE

Mónica Balzarini, FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS, UNIVERSIDAD NAC. CORDOBA

Mariano Córdoba, FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS, UNIVERSIDAD NAC. CORDOBA

Cecilia Bruno, FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS, UNIVERSIDAD NAC. CORDOBA

Juana Lopez, INTA EEA ESTE SGO DEL ESTERO

Jorgelina Huidobro, INTA EEA SALTA

Amanda Vizgarra, INTA EEA ESTE SGO DEL ESTERO

María Cristina Sánchez, INTA EEA SGO DEL ESTERO

Julieta Rojas, INTA EEA SAENZ PEÑA

Graciela Guevara, INTA EEA SAENZ PEÑA

Maria Florencia Roldán, INTA EEA SAENZ PEÑA

Luciano Mieres, INTA EEA RECONQUISTA

Carolina Alvarez, INTA EEA MANFREDI

Juan Pablo Giubergia, INTA EEA MANFREDI

Maria Basanta, INTA EEA RAFAELA

Vicente Gudelj, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Hugo Ghío, AAPRESID

Olga Gudelj, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Claudio Lorenzon, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Belen Conde, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Juan Pablo Ioele, INTA AER CORRAL DE BUSTOS

Carlos Galarza, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Pedro Vallone, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Pablo Tamburrini, AGROSERVICIOS PAMPEANOS

Fernando García, INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE

Cristian Cazorla, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Valeria Faggioli, INTA EEA MARCOS JUAREZ

Juan Jose De Battista, INTA EEA CONCEPCION DEL URUGUAY

Marta Benintende, FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS –UNER

Silvia Benintende, FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS –UNER

Marcelo Wilson, INTA EEA PARANA

Norma Arias, INTA EEA CONCEPCION DEL URUGUAY

Hector Rodríguez, INTA AER SAN SALVADOR

Jorge Cerana, ACTIVIDAD PRIVADA

H Muller, ACTIVIDAD PRIVADA

Alicia Irizar, INTA EEA PERGAMINO

Adrián Andriulo, INTA EEA PERGAMINO

Andrea Lardone, INTA EEA GRAL. VILLEGAS

Mirian Barraco, INTA EEA GRAL. VILLEGAS

Paula Girón, INTA EEA GRAL. VILLEGAS

Martín Díaz-Zorita, Desarrollo de tecnologías en Monsanto

Jorge Zanettini, INTA AER 25 de Mayo

Horacio Forjan, INTA EEA BARROW

Lucrecia Manso, INTA EEA BARROW

Josefina Zilio, INTA EEA BORDENAVE

Franco Frolla, INTA EEA BORDENAVE

Alberto Quiroga, INTA EEA ANGUIL

Romina Fernández, INTA EEA ANGUIL

Ileana Frasier, INTA EEA ANGUIL

Elke Noellemeyer, INTA EEA ANGUIL

Oscar Ormeño, INTA EEA ANGUIL

INDICE GENERAL

	Pág.
1 - Los experimentos de larga duración en la Investigación Agrícola. <i>Hugo Krüger, Fernando Salvagiotti y Guillermo Studdert</i>	7
EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS ELDs	19
2 - Diseño y Análisis de Ensayos para Comparar Rotaciones de Cultivo. <i>Mónica Balzarini, Mariano Córdoba & Cecilia Bruno</i>	21
3 - Base de datos para monitoreo de la sustentabilidad en sistemas productivo. Uso de indicadores de calidad de suelos <i>Juana Lopez, Jorgelina Huidobro, Amanda Vizgarra & María Cristina Sánchez ...</i>	41
ELDs EN DISTINTAS REGIONES DEL PAIS	59
4 - Rotaciones en siembra directa con énfasis en la producción de algodón en el domo agrícola de la provincia del Chaco <i>Julieta Rojas, Graciela Guevara & Maria Florencia Roldán</i>	61
5 - Agricultura intensificada en siembra directa y convencional en el Norte de Santa Fe <i>Luciano Mieres</i>	83
6 - Labranzas y secuencias de cultivos en la Región Central de Córdoba: efecto sobre el rendimiento y propiedades físicas suelo <i>Carolina Alvarez, Juan Pablo Giubergia & Maria Basanta</i>	95
7 - Evaluación de reposición de nutrientes en experimentos de larga duración del Sudeste de Córdoba <i>Vicente Gudelj, Hugo Ghío, Olga Gudelj, Claudio Lorenzon, Belen Conde, Juan Pablo Ioele, Carlos Galarza, Pedro Vallone, P. Tamburrini & Fernando García</i>	115
8 - Ensayos de larga duración en el Sudeste de Córdoba: rotaciones, labranzas, fertilización y cultivos de cobertura <i>Carlos M Galarza, Tomas Baigorria, Monica F Boccolini, Cristian R Cazorla & Valeria S Faggioli</i>	145
9 - Rotaciones con arroz y parámetros de calidad de suelo en el Centro de Entre Ríos <i>Juan Jose De Battista, Marta Benintende, Silvia Benintende, Marcelo Wilson, Norma Arias, Hector Rodríguez, J. Cerana & H Muller</i>	167

10 - Reservas de materia orgánica en la Pampa Ondulada: efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza en el largo plazo <i>Alicia Irizar & Adrián Andriulo</i>	181
11 - Secuencias agrícolas en suelos representativos del Noroeste Bonaerense <i>Mirian Barraco, Andrea Lardone, Paula Girón & Martín Díaz-Zorita</i>	199
12 - Diez años de siembra directa en un Hapludol de la Pampa Arenosa con diferentes condiciones iniciales de uso <i>Jorge Zanettini, Mirian Barraco & Martín Díaz-Zorita</i>	219
13 - Sistemas de cultivo en el sudeste bonaerense: su aporte al manejo de la fracción orgánica de los suelos <i>Guillermo Studdert</i>	235
14 - Rotaciones en la región centro-sur de Buenos Aires <i>Horacio Forjan & Lucrecia Manso</i>	267
15 - Secuencias de cultivos con trigo en el Sud Oeste Bonaerense <i>Hugo R. Krüger, Josefina P. Zilio & Franco D. Frolla</i>	339
16 - Efecto de la labranza y la ganadería sobre propiedades edáficas y eficiencia en el uso del agua en un Haplustol de la región semiárida pampeana <i>Alberto Quiroga, Romina Fernández, Ileana Frasier, Elke Noellemeyer & Oscar Ormeño</i>	361

E

Los experimentos de larga duración en la Investigación Agrícola

Hugo Krüger¹, Fernando Salvagiotti² y Guillermo Studdert³

¹INTA EEA Bordenave; ²INTA EEA Oliveros; ³Unidad Integrada UNMdP-INTA Balcarce

En las últimas décadas, la agricultura se ha transformado en una participante destacada de muchos de los problemas ambientales actuales, no sólo en lo que respecta a la degradación de las tierras y la disminución de la fertilidad de los suelos, sino también en la emisión de gases con efecto invernadero o la contaminación de napas entre otros (Lal & Pierce, 1991). El motivo más importante de ello es que la agricultura se ha desarrollado con un limitado conocimiento del funcionamiento de los sistemas en cada situación ambiental, del efecto real de las prácticas empleadas sobre los procesos en los sistemas y, por último, de la medida en que los sistemas pueden ser alterados para no afectar sus propiedades y funcionalidad. En diversos foros, se ha puesto mucho énfasis en la necesidad de desarrollar sistemas agropecuarios sustentables: sistemas suficientemente productivos, económicamente viables, ecológicamente adecuados (que conserven la base de recursos naturales y preserven la integridad del ambiente), cultural y socialmente aceptables, y técnicamente posibles (Sarandón, 2002). El desarrollo de tales sistemas debe basarse en un profundo conocimiento del ambiente natural y biológico, y de las complejas interacciones entre éstos y las prácticas de manejo empleadas (Francis & Clegg, 1990). El cambio desde una agricultura tradicional, basada casi exclusivamente en insumos, hacia una agricultura sustentable, supone el cambio hacia una tecnología de procesos basada en el manejo de las interacciones entre los componentes del sistema (Luna & House, 1990) que permita utilizar los servicios del agroecosistema y hacer un uso más racional y seguro de los insumos necesarios. El desarrollo de estas tecnologías de procesos se basa en la generación de nuevos conocimientos que integren diversos aspectos de los agroecosistemas, y que, además, desarrollen indicadores productivos, ecológicos, ambientales, económicos y sociales que demuestren el grado de deterioro de los sistemas de producción en relación a opciones de manejo más sustentables.

La generación de estos conocimientos puede ser abordada a través de distintas aproximaciones, como, por ejemplo, grandes relevamientos a nivel de lote que, si bien brinda información sobre los sistemas reales de producción, es muchas veces una foto de lo que se hace hasta ese momento. Otra forma de abordar el problema es con el establecimiento de experimentos que incluyan tratamientos

cuyos efectos quieren evaluarse en el largo plazo, y la expectativa de mantenerlos en marcha por un tiempo relativamente prolongado para ver efectos imposibles de detectar en el corto plazo. Por esto se los conoce genéricamente como Experimentos de Larga Duración (ELD). Estos ensayos han sido concebidos a lo largo y a lo ancho del mundo inicialmente buscando responder una pregunta fundamental: ¿es posible sostener en el tiempo la productividad del sistema al convertir un sistema natural en un sistema de producción? (Mitchell *et al.*, 1991). Sin embargo, donde se trabaja sobre sistemas degradados, como en la actualidad, surgen nuevas preguntas acerca de la sustentabilidad. Entre ellas, ¿qué capacidad hay de recuperar la productividad de un sistema sin provocar un impacto negativo en el ambiente?

Los ELD contribuyen a generar conocimientos de los efectos de largo plazo de las prácticas agrícolas y de los desarrollos tecnológicos, aportando a la comprensión de los cambios generalmente lentos que ocurren en el sistema, particularmente en el suelo, por el uso continuo de determinadas combinaciones de prácticas de manejo (Frye & Thomas, 1991). La posibilidad de hacer el seguimiento de esos cambios bajo condiciones controladas de manejo es lo que proporciona ventajas a los ELD respecto a la evaluación de sitios con distintas historias de uso (Sandor & Eash, 1991). Esto se traduce en que los ELD se constituyan en registros “vivos” de la aplicación de prácticas de manejo, en origen de investigaciones complementarias y en la formulación de principios y conceptos de manejo de suelos y cultivos de aceptación universal (Mitchell *et al.*; 1991).

La ciencia es una búsqueda a largo plazo y, si bien la investigación a menudo busca resultados en períodos cortos y de alto impacto, existen ciertas investigaciones cuyos resultados no pueden precipitarse y su logro requiere de períodos de estudio relativamente largos (Owens, 2013). Como regla general, los ELD son esenciales cuando se pretende estudiar variables caracterizadas por cambios lentos o, por otra parte, cuando se quieren estudiar cambios en variables en tratamientos que consistentemente han tenido un manejo durante un periodo largo de tiempo. Así, en sistemas complejos, los ELD permiten describir cuáles son los mecanismos involucrados en la dinámica temporal de los factores y en la variación de las respuestas en el tiempo (Berti *et al.*, 2016). Son muchos los impactos relacionados con los cambios en el manejo del suelo y de los cultivos que son aún desconocidos. Sus efectos sólo pueden ser cuantificados con ELD adecuadamente diseñados (Peterson *et al.*, 2012).

¿Cuánto tiempo debe mantenerse un estudio para que pueda ser considerado “de larga duración”? Strayer *et al.* (1986), consideran dos enfoques diferentes a esta cuestión: a) el tiempo necesario en

función de la dinámica de los sistemas y procesos estudiados (*e.g.*, el desarrollo de una secuencia completa de cultivos, o la expresión de los procesos que resultan de la aplicación de dicha secuencia); b) una duración mayor que la registrada en estudios habituales de su tipo.

En el primer caso la duración del experimento se relaciona con la velocidad de ocurrencia de los procesos naturales involucrados. La variabilidad climática, característica de algunas regiones como las semiáridas, determina drásticas variaciones en el rendimiento de los cultivos. Se requieren, entonces, numerosos años de información para determinar rangos y tendencias. Por otra parte, la expresión de los efectos del uso y manejo de la tierra también demanda un período de tiempo que depende del tipo y la duración de la secuencia de cultivos, las características de los tratamientos, la propiedad del suelo o cultivo estudiado, la técnica de evaluación, y las particularidades de clima y suelo de cada sitio. Kay y VandenBygaart (2002), revisando resultados de numerosos ELD bajo diferentes períodos de tiempo y condiciones ambientales, concluyeron que aquéllos son más consistentes a partir de los quince años de aplicados los tratamientos. Sin embargo, esto puede ser relativo dependiendo de los tratamientos a evaluar y la intensidad con que se repiten los mismos (por ejemplo en un ensayo de secuencias, cada cuántos años se cierra un ciclo).

En el segundo caso se considera la duración en relación con estudios “convencionales”, dando lugar a la intervención de otros factores, posiblemente más ligados a las características de la investigación disciplinaria específica e, indirectamente, a su financiamiento. Dado el carácter de estas experiencias, su duración excede los plazos habituales de la mayoría de los proyectos de investigación, que en el área agronómica no sobrepasan los cinco o seis años. De este modo el umbral para enmarcar la definición de “larga duración” varía entre cinco (Bationo *et al.*, 2012) y 20 años (Rasmussen *et al.*, 1998). Estos últimos definen como experimentos “clásicos” a aquéllos que superan los 50 años. No obstante, sea cual sea su duración, un verdadero ELD debería responder desde su inicio a un diseño que permita un estudio de largo plazo teniendo claramente definidas cuáles son las preguntas a responder y cómo se prevé su sustento biológico y financiero (Berti *et al.*, 2016).

La posibilidad de que se cumpla con las metas establecidas para los ELD, depende de un gran número de factores. De todos ellos, quizás los más importantes tengan que ver con la formulación de la investigación en lo que se refiere a la definición de las hipótesis a demostrar, de los objetivos perseguidos y de los tratamientos a implementar. Por otro lado, es de suma importancia la representatividad o grado de posible extrapolación de los resultados según la escala de la problemática que se pretende solucionar y el tiempo durante el cual se mantengan funcionando los

tratamientos definidos. La gran dificultad que significa representar y/o evaluar todas las situaciones de manejo posibles para una determinada condición agroecológica, hace que el esfuerzo en la definición de los tratamientos que conduzcan a conocer cómo funcionan y reaccionan los procesos ante las prácticas de manejo, sea la diferencia entre el éxito y el fracaso de un ELD para cumplir con los objetivos planteados. Asimismo, si bien la flexibilidad es necesaria para ir adaptando los ELD a los cambios tecnológicos, los tratamientos establecidos para la prueba de las hipótesis formuladas (o al menos aquéllos que más contribuyan), deben ser mantenidos de manera continua durante el tiempo previsto.

Si los tratamientos y los objetivos son cambiados con frecuencia, lo que se tiene es una serie de experimentos de corta duración conducidos en el mismo sitio por períodos prolongados (Frye & Thomas, 1991). No obstante, las situaciones creadas por el mantenimiento de tratamientos o bien por los sucesivos cambios (siempre y cuando estén debidamente registrados y documentados), no dejan de ser de utilidad para reformulaciones o inicio de nuevos experimentos. Asimismo, no puede soslayarse la necesidad de adecuados diseños experimentales para garantizar correctas interpretaciones e inferencias (Frye & Thomas, 1991), sin desconocer los aportes al conocimiento que pueden hacer o haber hecho parcelas experimentales establecidas sin diseño experimental (Mitchell *et al.*, 1991). En cualquier situación se puede rescatar información, pero en la medida que no haya un buen diseño de tratamientos y del experimento, las conclusiones que se pueden sacar del mismo, si bien valiosas, van a ser limitadas.

En todo caso el término “larga duración” continúa siendo una cuestión subjetiva, dando lugar a la existencia de experimentos con distintas edades. El ELD más antiguo del mundo, las parcelas Broadbalk en la Estación Experimental de Rothamsted (Inglaterra), se inició en 1843. Experimentos similares en el continente americano comenzaron en 1876 (parcelas Morrow en Illinois, EUA), y 1888 (Sanborn Field en Missouri, EUA). Entre los ELD más antiguos de Argentina se cuentan los existentes en Las Breñas (Chaco), iniciado en 1967, Marcos Juárez (Córdoba) y Bordenave (Buenos Aires) en 1975 y Balcarce (Buenos Aires), en 1976. Los primeros ELD en Argentina fueron planteados para buscar respuestas en el largo plazo acerca de las secuencias de cultivos más adaptadas en cada región y el impacto de distintos planteos de labranza. Tanto en la década del 90 como a partir del año 2000 se estableció, en distintos puntos del país, un número importante de experimentos de este tipo, muchos de ellos para encontrar respuestas a nuevos problemas que surgieron especialmente

con la introducción de la soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en los sistemas de producción y la siembra directa.

Características

En general, los ELD incluyen diferentes secuencias de cultivos y/o sistemas de labranza y siembra, con o sin agregado de fertilizantes y /o enmiendas (i.e. tratamientos en los que se espera que produzcan cambios en el largo plazo) como factores a estudiar. Por otra parte, los ELD han sido planeados en forma independiente, con criterios que atendieron tanto a demandas o necesidades de información específica, como a la prueba de nuevos cultivos o tecnologías. Esta independencia es una característica a nivel mundial, aunque la diversidad de enfoques y metodologías resultantes dificulta el análisis e integración de la información producida.

Los ELD representan cultivos y manejos propios de cada región. Es frecuente que los tratamientos comparen alguna práctica común (manejo “tradicional”) con diferentes prácticas “mejoradoras” de algún aspecto del agroecosistema. Como alternativa algunos experimentos aplican grados crecientes de intensidad (de cultivos anuales o labranzas), a partir de un tratamiento testigo o de referencia. En algunos casos los tratamientos se han ido actualizando con el correr del tiempo y la aparición de nuevos desarrollos tecnológicos, mientras que en otros han permanecido invariables. La información mínima que tienen estos ELD incluye la información climática y de rendimientos, aunque generalmente cuentan también con información de otras variables de cultivos y suelos. Aunque no resulta frecuente, algunos experimentos han almacenado muestras colectadas en diferentes oportunidades a lo largo de su historia.

Aunque algunos experimentos clásicos no lo tienen, el diseño estadístico es habitual, especialmente los más modernos. Una característica particular es que han sido conducidos por personal con genuino interés en su funcionamiento y permanencia. En este sentido Strayer *et al.* (1986), en su análisis de estudios ecológicos de largo plazo, destacan que la continuidad de los mismos se debe a la existencia de uno o varios científicos que dedicaron su tiempo y esfuerzo al experimento, enfrentando problemas diversos de financiamiento, personal, recolección y procesamiento de datos, con métodos y estrategias que resultan únicas para cada experimento. Muchos de los experimentos discontinuados han sido el resultado del retiro o muerte de su responsable, hecho que plantea la importancia de resolver, desde un principio, la continuidad del proyecto por más de una generación

de profesionales. Los ELD se localizan principalmente en campos experimentales de instituciones gubernamentales. Esto facilita su manejo y monitoreo, así como la realización de las determinaciones planificadas. Hasta cierto punto se acepta que esta localización les otorga una mayor garantía de permanencia, en relación con experiencias ubicadas en terrenos privados. No obstante, la protección de la continuidad de los ELD no es sólo responsabilidad de los científicos, sino también de los administradores. Es obvio que, si no hay decisiones políticas acordes, las fuentes de financiación de la investigación que generalmente ofrecen fondos para no más de 3 ó 4 años, nunca proveerán fondos que garanticen el mantenimiento continuo y durable de los ELD (Peterson *et al.*, 2012).

Un aspecto importante, en cuanto a la extrapolación de la información generada, es su representatividad. Desde el punto de vista estrictamente edafológico suele ser restringida, aunque atendiendo a la combinación de aspectos edáficos, climáticos y agronómicos, y puede aceptarse que el área de extrapolación se amplíe considerablemente. Aun así, debe notarse que este tipo de información mantiene un marcado carácter sitio-específico.

Aportes al conocimiento

La contribución de los ELD al conocimiento científico y técnico es importante y ha sido destacada en numerosas publicaciones (Strayer *et al.*, 1986; Mitchell *et al.*, 1991; Poulton, 1995; Studdert, 2006; Krüger, 2015).

Posiblemente, su principal aporte puede resumirse en la posibilidad de detectar y caracterizar efectos de largo plazo sobre el sistema bajo estudio. Este conocimiento resulta fundamental para entender los procesos desencadenados al intervenir un agro-ecosistema y actuar en consecuencia para prevenir y/o corregir efectos negativos sobre el mismo. Los resultados parciales obtenidos en los ELD generalmente dan origen a nuevas hipótesis e investigaciones complementarias. En muchos casos sirven para la formulación de principios y conceptos que hacen al manejo de manejo de suelos y cultivos en su área de influencia.

Entre los efectos de largo plazo detectados se cuentan procesos naturalmente lentos (*e.g.*, cambios en el contenido de materia orgánica del suelo), fenómenos esporádicos con tiempo de retorno mayor a los cinco-seis años de los experimentos normales (*e.g.*, impacto de condiciones climáticas excepcionales sobre el sistema), y tendencias en procesos que revisten alta variabilidad (*e.g.*, rendimientos en sistemas agrícolas dependientes de la distribución de las precipitaciones). La Figura

1 ilustra algunas situaciones en las cuales los ELD pueden ser útiles. Por otra parte, un alto número de años/ciclos proporciona suficiente cantidad de datos (grados de libertad), como para detectar factores involucrados en fenómenos complejos a través del análisis multivariado y de otros recursos estadísticos (*e.g.*, variables meteorológicas relacionadas con el rendimiento de un cultivo).

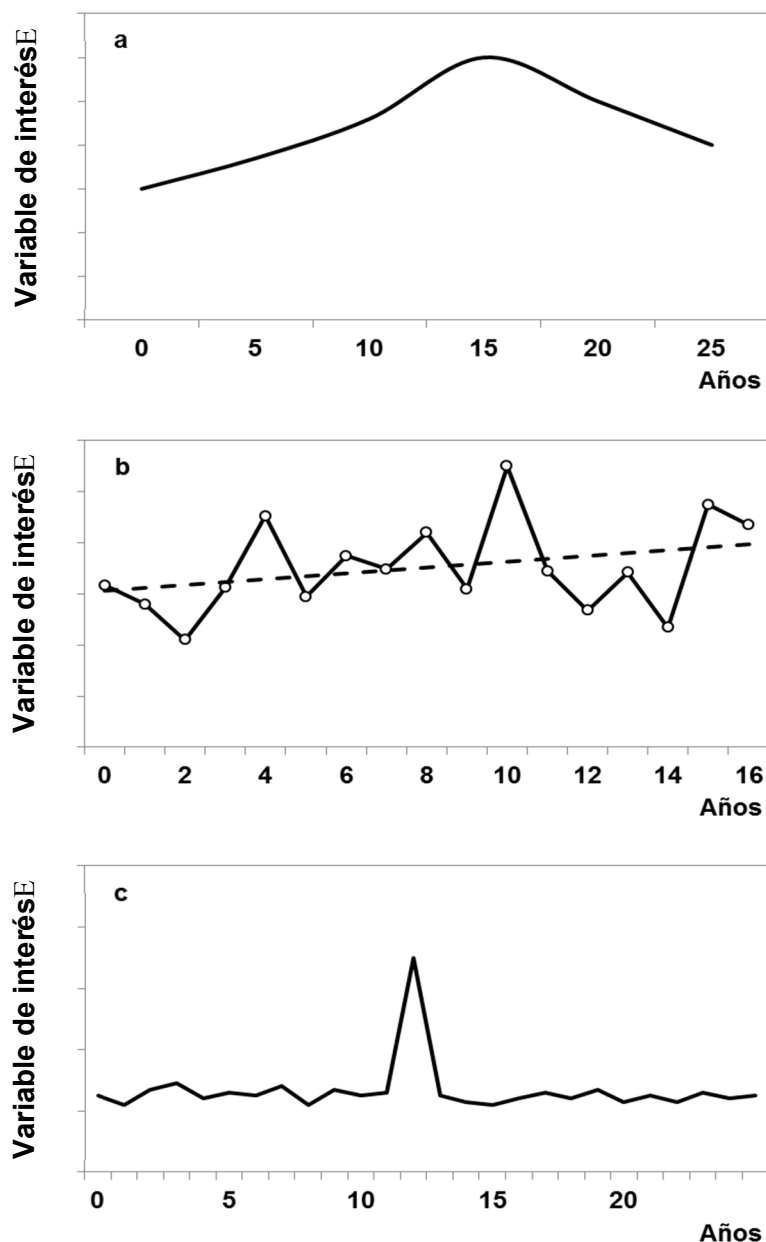


Figura 1 – Diferentes tipos de procesos que pueden ser detectados por los experimentos de larga duración (ELD): a) procesos lentos, b) cambios sutiles o tendencias, y c) eventos esporádicos. Modificado a partir de Strayer *et al.* (1986).

Otro aporte derivado de estas experiencias tiene que ver con la producción de registros de largo plazo, acerca del comportamiento de cultivos y propiedades del suelo, bajo condiciones definidas de clima, suelo y manejo. Asumiendo que los tratamientos representen el manejo regional, estos registros revisten gran valor agronómico cuando las estadísticas disponibles son escasas. También resultan útiles no sólo para la calibración y validación de modelos de simulación existentes, sino para la generación de nuevos modelos conceptuales. Tanto la existencia de las parcelas, como de bancos de muestras provenientes de las mismas, configuran una reserva para estudios cuya necesidad hoy puede no ser evidente, pero sí puede ser de importancia en el futuro. Strayer *et al.* (1986), comentan un ejemplo interesante de este “valor de reserva”: en el experimento de Rothamsted (Inglaterra), muestras tomadas antes del descubrimiento de la radioactividad y mantenidas en contenedores sellados, pudieron ser utilizadas para estimar los niveles de radioactividad en la era pre-atómica. De la misma manera se han utilizado otros experimentos para analizar niveles de contaminación ambiental en distintas épocas.

Los ELD proporcionan condiciones ideales para la formación y entrenamiento de recursos humanos y representan un claro ejemplo de la necesidad y ventajas del relacionamiento inter-disciplinario e inter-institucional. La participación de estudiantes de postgrado multiplica y mejora la calidad de la información producida. La frecuente asociación entre investigadores para el estudio de los experimentos incrementa su masa crítica, el equipamiento disponible y la capacidad de análisis, al tiempo que amplía la financiación al utilizar fondos de otras fuentes.

La realización de visitas guiadas, con participación de productores, profesionales, estudiantes y público en general y la difusión de los principales resultados obtenidos, representan un servicio educativo, ya que permiten mostrar parte de los aportes de la investigación a la sociedad y crear conciencia acerca de la importancia de los impactos antrópicos y la conservación de los recursos productivos.

Nuevos enfoques y posibilidades

La información provista individualmente por los ELD resulta, como se ha visto en secciones anteriores, de valor local en distintas aplicaciones y disciplinas. Sin embargo, estos experimentos también están concitando atención sobre relaciones causa:efecto universalmente válidas y sorprendentemente actuales (Debreczeni & Körschens, 2003). Pueden ayudar a reconciliar intereses

ecológicos y económicos, y a clarificar, entre otros temas de actualidad, discusiones relativas a la reposición de nutrientes en forma ambientalmente amigable y a la implementación de una ganadería sustentable.

Este renovado interés en los ELD existentes a nivel mundial, está promoviendo enfoques novedosos en cuanto al manejo de datos, gráficos y modelos experimentales. El desafío es lograr bases de datos resumidas que incluyan medias, errores estándar y otros estimadores estadísticos accesibles a usuarios con distintos intereses (Cady, 1991).

Para permitir un uso más intensivo de los experimentos y sus datos, interesa comparar especialmente aquéllos en diferentes tipos de suelos y bajo distintas condiciones climáticas. De este modo la información resultará de valor para productores, asesores, legisladores y científicos tanto localmente como a nivel de la comunidad global (Poulton, 1995).

Los ELD en Argentina

En el país existen cerca de 54 ELD que, en el contexto actual, configuran una red potencialmente valiosa si se logra rescatar y sistematizar adecuadamente la información generada. Los esfuerzos por consolidar esta red datan del año 2000 y se iniciaron con un relevamiento de los experimentos existentes. Sin embargo, recién en 2007 se logró su agrupación bajo el Proyecto Nacional Cereales y Oleaginosas, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) articulando las actividades con otros programas nacionales (Suelos o Recursos Naturales) que contribuyeron con parte del financiamiento para mantenerlos, como así también para realizar reuniones y jornadas de actualización en las que participaron los responsables de las experiencias.

En estas jornadas surgió la inquietud de establecer las bases de una metodología común de muestreo y análisis. Esto se concretó con la publicación: Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes (Santos *et al.*, 2012), elaborada en forma conjunta por numerosos participantes del Proyecto. La misma reúne los protocolos más utilizados y sirve de referencia para el diseño de nuevos proyectos.

Desde los primeros encuentros se discutió la posibilidad de recopilar información generada en los ELD, dispersa en las sedes de los experimentos, y ponerla a disposición de la comunidad agropecuaria. La tarea de análisis y síntesis de información tiene, en esta publicación, su primer resultado concreto.

Cada capítulo detalla uno o varios ELD relacionados. Se proporciona una breve descripción de la región y sus sistemas productivos, los problemas o inquietudes que dieron lugar al experimento, sus principales características y objetivos, y se discuten los resultados más relevantes.

Bibliografía

- Bationo, A; B Waswa; A Abdou; BV Bado; M Bonzi; E Iwuafor & J Mugwe. 2012. Overview of long term experiments in Africa. In: A Bationo; B Waswa; J Kihara; I Adolwa; B Vanlauwe; K Saudou (Eds) Lessons learned from long-term soil fertility management experiments in Africa. Pp. 1-26. Springer Netherlands.
- Berti, A; A Dalla Marta; M Mazzoncini & F Tei. 2016. An overview on long-term agro-ecosystem experiments: Present situation and future potential. *Eur. J. Agron.* 77:236-241.
- Cady, FB. 1991. Experimental design and data management of rotation experiments. *Agron. J.* 83:50-56.
- Debreczeni, K & M Körschens. 2003. Long-term field experiments of the world. *Archives Agron. Soil Sci.* 49:465-483.
- Francis, CA & MD Clegg. 1990. Crop rotations in sustainable production systems. P. 107-122. In: CA Edwards; R Lal; P Madden; RH Miller & G House (eds.) Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, EUA.
- Frye, WW & GW Thomas. 1991. Management of long-term field experiments. *Agron. J.*, 83:38-44.
- Kay, BD & AJ VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 66:107-118.
- Krüger, H. 2015. Secuencias de cultivos con trigo para el ambiente semiárido bonaerense: rendimientos y efectos sobre el suelo. Ediciones INTA, Colección Investigación, desarrollo e innovación. Bordenave, Argentina.
- Lal, R & FJ Pierce. 1991. The vanishing resource. In: R Lal & FJ Pierce (Eds.) Soil Management for Sustainability. Pp. 1-5. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, EUA.
- Luna, JM & GJ House. 1990. Pest management in sustainable agricultural systems. In: CA Edwards; R Lal; P Madden; RH Miller & G House. (Eds.) Sustainable agricultural systems. Pp. 157-173. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, EUA.
- Mitchell, CC; RL Westerman; JR Brown & TR Peck. 1991. Overview on long-term agronomic research. *Agron. J.* 83:24-29.
- Owens, B. 2013. Long-term research: slow science. *Nature* 495(7441):300-303
- Peterson, GA; DJ Lyon & CR Fenster. 2012. Valuing long-term field experiments: Quantifying the scientific contribution of a long-term tillage experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 76:757-765.
- Poulton, PR. 1995. The importance of long-term trials in understanding sustainable farming systems: the Rothamsted experience. *Animal Prod. Sci.* 35:825-834.

-
- Rasmussen, PE; KW Goulding; JR Brown; PR Grace; HH Janzen & M Körschens. 1998. Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and global change. *Science* 282(5390):893-896.
- Sandor, JA & NS Eash. 1991. Significance of ancient agricultural soils for long term agronomic studies and sustainable agriculture research. *Agron. J.* 83:29-37.
- Santos, DJ; MG Wilson & M Ostinelli (Eds.). 2012. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes. Ediciones INTA. Paraná, Argentina.
- Sarandón, S. 2002. La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la agricultura intensiva de la Revolución Verde. En: S Sarandón (Ed.). *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable*. Pp. 23-47. Ediciones Científicas Americanas. La Plata, Argentina (557pp).
- Strayer, D; JS Glitzenstein; CG Jones; J Kolasa; GE Likens; MJ McDonnell; GG Parker & ST Pickett. 1986. Long-term ecological studies: an illustrated account of their design, operation, and importance to ecology. Occasional Publication N° 2. Institute of Ecosystem Studies. New York, EUA.
- Studdert, GA. 2006. Ensayos de larga duración de rotaciones y labranzas: la experiencia de la Unidad Integrada Balcarce. Taller "Sustentabilidad Agrícola: el rol de los Ensayos de Larga Duración", 21-22 de noviembre de 2006, Unidad Integrada Balcarce, Balcarce, Argentina. En CD.



EL ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN DE LOS ELDs

Diseño y Análisis de Ensayos para Comparar Rotaciones de Cultivo

Mónica Balzarini, Mariano Córdoba & Cecilia Bruno

Estadística y Biometría. CONICET - Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Introducción

Los experimentos de larga duración (ELD) son conducidos para investigar efectos a largo plazo de distintos tratamientos. En ensayos agrícolas donde se evalúan rendimientos, las mediciones de la o las variables respuestas son registradas usualmente con frecuencia anual, aunque pueden existir mediciones con menor o mayor frecuencia temporal. En general, los ELDs son implementados bajo diseños experimentales clásicos, como el diseño en bloques completo al azar o en parcelas divididas y las mediciones se registran sobre cada unidad experimental en varios momentos de tiempo. Los ELD juegan un importante rol para el análisis de rendimiento bajo distintos sistemas de cultivos y el análisis de la evolución temporal de variables asociadas a la fertilidad de los suelos y otras propiedades edáficas relacionadas con la sustentabilidad de los agro-ecosistemas.

Dado que el ELD en agricultura permanece en terreno por largo periodo de tiempo, las mediciones están sujetas al impacto de variables ambientales (no controladas), las cuales podrían interactuar con los tratamientos, i.e. impactar más a un tratamiento que a otro. Las variaciones aleatorias que se producen año a año, así como la interacción año $\times$ tratamiento, deben ser contempladas tanto en la etapa del diseño del ELD como durante el análisis de los datos recolectados. El porcentaje de variabilidad debida al efecto año suele indicar que éste constituye la fuente de variación más importante del rendimiento (Martin *et al.*, 1998). Por ello, es común encontrar que experiencias destinadas a medir el efecto de algún tratamiento agrícola, se repitan varios años a los fines de considerar la variación de los efectos de tratamiento debidas a las variaciones en las condiciones ambientales. Los ensayos a campo que son sensibles a interacciones ambientales y en los cuales el cultivo no es controlado o monitoreado de manera sistemática, generalmente son repetidos ya sea en tiempo o en espacio para demostrar si resultados similares podrían, o no, ser obtenidos bajo diferentes condiciones ambientales.

Diseño de experimentos de rotación de cultivos

Los experimentos de rotación de cultivos son del tipo de los ELD. Constituyen una valiosa herramienta para estimar el potencial, en el tiempo, de distintas secuencias y rotaciones de cultivo (Patterson, 1953). Sobre cada unidad experimental (parcela) se repite en el tiempo una misma secuencia de cultivos que actúa como tratamiento. Los experimentos donde se comparan tratamientos (por ejemplo fertilizantes) que son asignados a parcelas sobre las que se realiza una rotación de cultivos, son conocidos como "experimentos de rotación fija" (Yates, 1954), más que como ensayos de rotación de cultivos. En esas experiencias la rotación de cultivos es usada como material experimental y no como tratamiento (Baldock y Musgrave, 1980). El término ensayos de rotación de cultivos se refiere a experiencias donde el objetivo es probar el efecto directo, residual y acumulado de distintas secuencias de cultivos. Se suele llamar ensayos de secuencia de cultivos cuando se repiten secuencias de cultivos anuales y ensayos de rotación de cultivos cuando se usan pasturas en combinación con cultivos anuales.

El largo período de tiempo destinado a un ensayo de rotación cíclica demanda un importante número de consideraciones técnicas sobre su diseño y análisis estadístico para no malograr la calidad de la información obtenida del ELD. En los experimentos de rotación, los distintos cultivos que forman los tratamientos son la base de la evaluación de éstos. Por este motivo, en la etapa de diseño los cultivos de cada rotación deben arreglarse espacial y temporalmente para garantizar grupos de parcelas que lleven el mismo cultivo en un número suficiente de años para poder realizar las comparaciones de interés. Los experimentos de rotación se clasifican en dos tipos según la repetición temporal del mismo: (1) experimentos a corto plazo y (2) experimentos de rotación cíclicos.

En los primeros, sobre distintos grupos de parcelas, se conducen diversas secuencias de cultivos por un período de tiempo generalmente corto (3 o 4 años). Luego de esta etapa continúa el ensayo por uno o más años con la implantación de un cultivo o una secuencia común a todas las parcelas para evaluar los efectos de las secuencias del primer periodo; el ciclo de cultivos no es repetido sobre las parcelas. El objetivo de este tipo de experiencias es contrastar los principales efectos de las distintas secuencias de cultivos sobre uno o más cultivos de interés. En la Tabla 1 se presenta un esquema del diseño para ensayos de este tipo. Los cultivos que crecen en los dos primeros años del experimento son llamados cultivos-tratamiento. El cultivo que crece *a posteriori* de la secuencia de interés se denomina cultivo-prueba y es utilizado para evaluar el efecto de las secuencias de cultivos-tratamiento.

Tabla 1. Diseño de un experimento de secuencias de cultivos a corto plazo.

Año	Repetición I				Repetición II			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
1	C ₁	C ₂	C ₁	C ₃	C ₁	C ₂	C ₁	C ₃
2	C ₂	C ₁	C ₁	C ₄	C ₂	C ₁	C ₁	C ₄
3	C _p	C _p	C _p	C _p	C _p	C _p	C _p	C _p

Nota: P_i, $i=1, 2, 3, 4$ representan las parcelas que llevan los tratamientos (secuencias) 1, 2, 3 y 4, respectivamente. En el campo las parcelas se ubican al azar dentro de los bloques o bajo un diseño completamente aleatorizado si no existen otras fuentes de variación distintas a los tratamientos. C₁, C₂, C₃ y C₄ representan los cultivos que definen los cuatro tratamientos y C_p es el cultivo testigo o cultivo prueba usado para evaluar el efecto de los tratamientos.

El cultivo prueba debería ser sensible al efecto del tratamiento a evaluar en suelo. Por ejemplo si se evalúa la fertilidad química del suelo (con N) un trigo maíz sería más conveniente, si se evalúa algún efecto sobre variables físicas del suelo podría utilizarse un cultivo como soja. Los ensayos quedan definidos así por dos etapas: la primera necesaria para aplicar los tratamientos (secuencias) a comparar y la final destinada a evaluar el efecto de los tratamientos. Cuando sea posible, y de interés, sería importante planificar secuencias de manera tal que algunos cultivos-tratamiento actúen por sí mismos como cultivos-prueba-parciales. En el ejemplo de la Tabla 1, la comparación entre los rendimientos de C₁ en el año dos estiman el efecto de los distintos cultivos que crecen en el año uno. Usualmente se recomiendan estas experiencias cuando se quiere investigar acerca de principios fundamentales sobre los que operan las rotaciones con el objetivo de seleccionar, desde un conjunto mayor de secuencias posibles, aquellas más importantes para ser estudiadas en un ELD.

Por otro lado, se tienen los experimentos de rotación cíclicos cuya característica es que cada secuencia de cultivos (tratamiento) se repite consecutivamente en ciclos definidos de c años sobre la misma unidad experimental. La duración o longitud del ciclo (c) puede ser variable de rotación a rotación en función del número de cultivos de cada rotación. Las rotaciones están definidas por diferentes cultivos por lo que las comparaciones entre las rotaciones pueden ser realizadas en cualquier año en el cual llevan un mismo cultivo. En este tipo de experiencia suele llamarse cultivo-prueba al cultivo que interviene en varias rotaciones. Pueden incluirse varios cultivos-prueba con la finalidad de evaluar diferentes tipos de efectos. Los cultivos-prueba no necesitan ser comunes a todas las rotaciones de un experimento. Por ejemplo, en la Tabla 2 se muestra un diseño para comparar dos cultivos en monocultivo o en rotación de dos años. Las rotaciones I y III no tienen cultivo en común por lo que no pueden ser comparadas directamente. Sin embargo, ellas pueden ser

comparadas con la rotación II. El cultivo de maíz (Mz) es el cultivo-prueba para comparar las rotaciones I y II, y el cultivo de soja (S) es el cultivo-prueba para comparar las rotaciones II y III.

Tabla 2. Diseño experimental para comparar dos cultivos en monocultivo de maíz (Mz) y soja (S) y en rotación bienal Maíz -Soja.

	Rotaciones			
	I	II	III	
	1	2	3	4
Año 1	Mz	Mz	S	S
Año 2	Mz	S	Mz	S
Año 3	Mz	Mz	S	S
Año 4	Mz	S	Mz	S
Año 5	Mz	Mz	S	S

En los experimentos de rotación cíclicos los cultivos intervinientes se repitan en diferentes años. Esta forma de repetición por sí misma no es adecuada ya que el efecto cultivo queda confundido con el efecto año. Si el ciclo es de c años y se repite dos veces, el primer cultivo de la secuencia que se está rotando se presentará en el año 1 y en el año $c+1$; cada componente particular (cultivo) de la rotación ocurrirá cada c años.

Es importante notar que, para cada rotación hay c posibles secuencias distintas con el mismo orden cíclico de los cultivos intervinientes, cada una de estas secuencias se diferencia porque en un año particular cada una de ella se encuentra en un punto diferente del ciclo de rotación. A estos puntos diferentes o componentes particulares de una misma rotación se los denomina *fase* (Yates, 1954). Siguiendo el ejemplo de la Tabla 2, en el mismo año en que se encuentra la rotación Maíz-Soja, estará implantado el Maíz y la Soja. Así, los monocultivos de Soja y Maíz son entendidos como secuencias de una sola fase y las rotaciones bienales (Maíz-Soja y Soja-Maíz) como la recurrencia temporal sobre la misma parcela de secuencias de dos fases. Si se comienza el experimento en un determinado año con todas las componentes particulares de la secuencia, los diferentes cultivos estarán expuestos a una muestra más amplia de condiciones ambientales que conferirán mayor confianza a los resultados y se ganará tiempo en obtener las repeticiones previamente definidas para el ensayo. Bajo este fundamento, Yates (1954) delinea una importante norma para los experimentos

de rotación: de ser posible, el ensayo debe incluir todas las fases de la rotación cada año. Dentro de cada año, las comparaciones se realizarán entre parcelas con rotaciones comparables.

En el diseño presentado en la Tabla 2, en cada año se tienen todas las fases de cada tratamiento, por ello la rotación II está representada por dos secuencias, Mz/S y S/Mz. Si la comparación de las rotaciones se realizara a través de la variable rendimiento, las dos secuencias de la rotación II no son comparables en ningún año en particular ya que en todos los años llevan diferentes cultivos. Al incluir las dos secuencias de la rotación II se conforma un grupo de secuencias comparables en el sentido de que cada secuencia es contrastable con el monocultivo al menos en una oportunidad durante el ELD. El término *serie* denota al conjunto de parcelas con secuencias de cultivos comparables (*i.e.* secuencias de cultivos que, en al menos un año, presentan un mismo cultivo). En el ejemplo de Tabla 2, las parcelas 1 y 3 conformarían una serie y las parcelas 3 y 4 otra serie.

Las series pueden ser ubicadas en el terreno de dos formas diferentes: 1) podrían mantenerse separadas y 2) podrían ubicarse aleatoriamente en el mismo bloque. En el caso que las series se mantengan separadas, en la superficie del ensayo se podrían distinguir *s* áreas, cada una con un conjunto de secuencias comparables en un año particular. Esta visión topográfica se produce cuando cada una de las secuencias comparables son ubicadas sobre una serie de parcelas formadas por uno o más bloques o repeticiones, las diferentes secuencias son dispuestas al azar dentro de cada bloque. Se procede de la misma forma con cada uno de los *s* grupos de secuencias comparables. Los bloques de una misma serie no necesitan ser adyacentes, los bloques en diferentes series deben ser distinguidos de los bloques o repeticiones dentro de una misma serie.

Supongamos, por ejemplo, que se quieren comparar las siguientes rotaciones: A, cuyas fases son maní y girasol (secuencias M/G₁ y G₁/M); B compuesta por sorgo y girasol (secuencias Sg/G₂ y G₂/Sg) y la rotación C con soja y girasol (secuencias S/G₃ y G₃/S). . Para evaluar el efecto de la secuencia es necesario esperar que se cierre un ciclo de la misma. Por ejemplo, para la rotación A, se requieren esperar dos años para evaluar el efecto de la secuencia de interés. El girasol es el cultivo-prueba que permite comparar las tres rotaciones. Las secuencias comparables conforman: un primer grupo, integrado por las secuencias M/G₁, Sg/G₂, S/G₃ y otro grupo con las secuencias G₁/M, G₂/Sg y G₃/S. Cada uno de estos grupos será asignado a una serie de parcelas diferentes. Si la experiencia tiene *r*=3 repeticiones por año, cada serie tendrá 9 parcelas correspondientes al producto entre el número de secuencias comparables y el número de repeticiones. En el año 1 las comparaciones se harán con las parcelas de la serie 2 y en el año 2 con las parcelas de la serie 1. Las repeticiones podrían numerarse

de 1 a 6 ya que la repetición 1 de la serie 1 nada tiene que ver con la repetición 1 de la serie 2. El esquema del diseño experimental, para los cuatro primeros años, podría ser el de la Tabla 3. En este diseño de parcelas, cada serie es ubicada en r bloques; las diferencias entre bloques se confunden con las diferencias entre series. Si no interesa probar la diferencia entre series, sino que las series son mantenidas en la experiencia como una forma de obtener más repeticiones, ese confundimiento puede carecer de importancia. Este diseño se conoce con el nombre de diseño reducido.

Tabla 3. Diseño reducido para comparar tres rotaciones bienales. Series en bloques separados

Serie	1	1	1	2	2	2
Bloque	1	2	3	4	5	6
Rotación	A B C	C B A	A C B	C B A	A C B	A B C
Año 1	M Sg S	S Sg M	M S Sg	G ₃ G ₂ G ₁	G ₁ G ₃ G ₂	G ₁ G ₂ G ₃
Año 2	G ₁ G ₂ G ₃	G ₃ G ₂ G ₁	G ₁ G ₃ G ₂	S Sg M	M S Sg	M Sg S
Año 3	M Sg S	S Sg M	M S Sg	G ₃ G ₂ G ₁	G ₁ G ₃ G ₂	G ₁ G ₂ G ₃
Año 4	G ₁ G ₂ G ₃	G ₃ G ₂ G ₁	G ₁ G ₃ G ₂	S Sg M	M S Sg	M Sg S

M: maní, S: soja, Sg: sorgo y G_{*i*}: girasol $i=1, 2, 3$ indexa la rotación.

Cuando las series se ubican en el mismo bloque, cada bloque podría tener tantas parcelas como el número total de secuencias de la experiencia. Las diferencias entre series no se confunden con las diferencias entre bloques, es necesario disponer de bloques de mayor tamaño que para el diseño reducido presentado anteriormente. El número de parcelas por bloque es seis en este caso mientras que antes era tres. Este tipo de diseño donde todas las fases de cada rotación se cultivan cada año en el mismo bloque se denomina diseño básico. El esquema del diseño para los 4 primeros años de la experiencia del ejemplo anterior, se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Diseño básico para comparar tres rotaciones bienales. Series en el mismo bloque

Bloque	1						2						3					
Serie	1	2	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
Rotación	A	B	C	A	C	B	A	C	C	B	B	A	C	B	A	A	B	C
Año 1	M	G ₂	S	G ₁	G ₃	Sg	M	S	G ₃	G ₂	Sg	G ₁	G ₃	Sg	G ₁	M	G ₂	S
Año 2	G ₁	Sg	G ₃	M	S	G ₂	G ₁	G ₃	S	Sg	G ₂	M	S	G ₂	M	G ₁	Sg	G ₃
Año 3	M	G ₂	S	G ₁	G ₃	Sg	M	S	G ₃	G ₂	Sg	G ₁	G ₃	Sg	G ₁	M	G ₂	S
Año 4	G ₁	Sg	G ₃	M	S	G ₂	G ₁	G ₃	S	Sg	G ₂	M	S	G ₂	M	G ₁	Sg	G ₃

M: maní; S: soja; Sg: sorgo y G_i: girasol $i=1,2,3$ indexa la rotación.

Cuando uno de los cultivos es repetido en alguna de las secuencias en rotación, deben considerarse aspectos adicionales para la selección del tipo de diseño. En la Tabla 5 se muestra una situación para comparar tres rotaciones donde dos de ellas tienen un mismo cultivo ocupando dos fases de la rotación. Los tratamientos a comparar son: Rotación I: A, E, E, Rotación II: B, C, E y Rotación III: D, E, E.

Tabla 5. Experiencia de rotación involucrando diferencias entre fases

Parcela	Rotación I			Rotación II			Rotación III		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Año 1	A	B	D	E ₁	C	E ₄	E ₂	E ₃	E ₅
Año 2	E ₁	C	E ₄	E ₂	E ₃	E ₅	A	B	D
Año 3	E ₂	E ₃	E ₅	A	B	D	E ₁	C	E ₄
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

El cultivo E es el cultivo-prueba. Los cultivos E que pueden ser comparados en esta experiencia son distinguidos por sufijos. Este arreglo proporciona comparaciones entre los rendimientos (E₁+E₂), E₃ y (E₄+E₅) cada año y además en las rotaciones I y III se pueden realizar las comparaciones entre E₁ y E₂ y entre E₄ y E₅, respectivamente. Estas comparaciones entre diferentes fases de una misma rotación son conocidas como diferencias entre fases. Tales comparaciones pueden usarse para analizar el efecto de una fase sobre otra dentro de una rotación. Para este tipo de comparaciones, el diseño de la experiencia de la Tabla 5 requiere que 9 parcelas conformen un mismo bloque de un diseño en

bloques completos aleatorizados bajo un esquema de diseño básico ya que, si las series son mantenidas en áreas separadas (diseño reducido) las diferencias entre las fases serian confundidas con las áreas en cada año. Aún si las diferencias constantes entre áreas no fuesen grandes, las diferencias entre fases permanecerían confundidas debido a que los efectos de áreas varían de año a año.

En la Tabla 6 se presenta el esquema de este diseño en series para una repetición o bloque. Si las 9 parcelas pertenecen a un mismo bloque se pueden estimar las diferencias entre las rotaciones y las diferencias entre diferentes fases de una misma rotación. Sin embargo, si el diseño es arreglado en tres series de tres parcelas por repetición, se podrán realizar las comparaciones E_1 vs. E_4 y E_2 vs. E_3 vs. E_5 pero diferencias entre fases de la misma rotación y diferencias entre diferentes fases de diferentes rotaciones quedan confundidas con las diferencias entre series. Los diseños donde la disposición de las series lleva a un confundimiento de diferencias entre fases del cultivo-prueba se denominan diseños de fase-confundida.

Tabla 6. Experiencia de la Tabla 5 agrupado en series para una repetición o bloque.

	Serie 1			Serie 2			Serie 3		
	Rotación			Rotación			Rotación		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Año 1	A	B	D	E_1	C	E_4	E_2	E_3	E_5
Año 2	E_1	C	E_4	E_2	E_3	E_5	A	B	D
Año 3	E_2	E_3	E_5	A	B	D	E_1	C	E_4
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Así, series de parcelas asociadas a los grupos de secuencias comparables, permiten aumentar la cantidad de información disponible en el lapso de tiempo que permanece el experimento. Lo expuesto anteriormente, se puede resumir diciendo que la conformación y disposición de las series define por lo menos tres tipos de diseños para los experimentos de rotación cíclicos: (1) Diseño Básico, (2) Diseño Reducido y (3) Diseño de Fase-Confundida.

Diseño Básico

Con este término se identifican a los diseños que incluyen todas las secuencias de cada una de las rotaciones en el mismo bloque (no existe confundimiento de efectos). Todos los años pueden realizarse comparaciones entre las rotaciones. El número de parcelas por bloque es igual al producto

entre el número de rotaciones y el número de fases. Por ejemplo, para las rotaciones Maíz-Soja y sus monocultivos, el número de bloques sería $3 \times 3 = 9$ bloques. Las series pueden comenzarse al menos de dos formas diferentes: (1) inicio simultáneo de todas las series o (2) inicio por etapas donde las distintas series comienzan en diferentes momentos. Si las rotaciones son de igual longitud, el número de series es igual a c (duración del ciclo de cada rotación) y las c secuencias de cada rotación son asignadas a las parcelas aleatoriamente dentro de cada bloque. No se producen cambios, a nivel de este tipo de diseño, cuando las rotaciones son de longitudes diferentes. Yates (1954) provee un ejemplo de un diseño para comparar rotaciones de distinta longitud; éstas son: Rotación I: 1 año de arroz, 2 años de pastura; Rotación II: 2 años de arroz, 2 años de pastura y Rotación III: 1 año de arroz, 3 años de pastura (Tabla 7).

Tabla 7. Esquema para una repetición de un ensayo con tres rotaciones de arroz y pastura

Años	Rotación I Parcelas			Rotación II Parcelas				Rotación III Parcelas			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1, 13	A ₁	P	P	A ₂	P	P	A ₃	A ₄	P	P	P
2, 14	P	A ₁	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P	P
3, 15	P	P	A ₁	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P
4, 16	A ₁	P	P	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄
5, 17	P	A ₁	P	A ₂	P	P	A ₃	A ₄	P	P	P
6, 18	P	P	A ₁	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P	P
7, 19	A ₁	P	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P
8, 20	P	A ₁	P	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄
9, 21	P	P	A ₁	A ₂	P	P	A ₃	A ₄	P	P	P
10, 22	A ₁	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P	P
11, 23	P	A ₁	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄	P
12, 24	P	P	A ₁	P	P	A ₃	A ₂	P	P	P	A ₄

A: arroz, P: pastura. Fuente: Yates, 1954

Las tres rotaciones definen un conjunto de 11 secuencias, por lo cual cada bloque del experimento involucra 11 parcelas. El experimento completo se desarrolla en un período de 12 años (mínimo común múltiplo de los períodos de rotaciones individuales), los primeros tres años son considerados como años preliminares. Si consideramos al arroz como el cultivo-prueba, las producciones de arroz que pueden ser comparadas son las indicadas por sufijos en la Tabla 7. Hay cuatro rendimientos prueba para arroz. Todas las comparaciones (A₁ vs. A₂ vs. A₃ vs. A₄) pueden realizarse cada año posterior al cuarto. En la Tabla 7 se indican, para los rendimientos del cultivo-prueba en los años 5 y 17 (en recuadro simple) cuáles son las secuencias que se pueden comparar (en recuadro doble). Las diferencias entre fases A₂ y A₃ proveen información sobre las producciones de arroz en la rotación II,

permitiendo comparar el efecto de cultivar arroz uno o dos años después de la pastura. Las producciones de la pastura pueden también ser comparadas si es necesario.

La desventaja principal del diseño básico es el tamaño de bloque. En experiencias que involucran varias rotaciones, aun cuando las longitudes de los ciclos no son muy grandes, la inclusión de todas las secuencias de cada rotación dentro de un bloque, podría implicar un tamaño excesivo del mismo. Si el incremento del tamaño del bloque implica pérdida de precisión para las comparaciones de interés, es posible considerar una experiencia de menor tamaño (menor cantidad de parcelas por eliminar un tratamiento o no incluir todas las secuencias de una rotación) a costa de perder información acerca de contrastes de menor interés.

Diseño reducido

Con este nombre se identifica a los diseños contruidos de forma tal que se separan dos o más grupos de secuencias. Se utilizan cuando, por razones físicas o económicas, no es posible plantear un diseño básico. Las secuencias se dividen en grupos sobre la base de su comparabilidad. Dos secuencias para la misma o diferente rotación son comparables con respecto a un determinado cultivo-prueba, si al menos en un año del ensayo el cultivo-prueba se presenta en ambas secuencias. Por ejemplo, bajo esta definición la secuencia 4 es comparable con las secuencias 5, 7, 8 y 9 pero no con las secuencias 6, 10 y 11 de la Tabla 7. El procedimiento propuesto por Patterson (1964) para construir estos diseños es:

- (1) seleccionar uno o más cultivo-prueba cuyos contrastes no deben quedar confundidos;
- (2) dividir el conjunto de secuencias en tantos grupos como sea posible tal que dos secuencias cualesquiera, en grupos diferentes, no sean comparables respecto al cultivo-prueba seleccionado previamente, y
- (3) ubicar cada grupo de secuencias en diferentes series de parcelas formadas por una o más repeticiones.

De esta manera, algunos, todos o ninguno de los contrastes entre cultivos-pruebas, no seleccionados en la etapa 1, pueden estar confundidos dependiendo de su posición en las rotaciones respecto a las posiciones del cultivo-prueba seleccionado. Las secuencias ubicadas sobre una serie representan una fracción $1/s$ de las secuencias de cada rotación. El número máximo de grupos de secuencias que se

pueden formar de esta manera, para un solo cultivo-prueba, está dado por el máximo común divisor h del conjunto de números d_i , donde d_i es el número de años entre dos momentos consecutivos de la producción del cultivo prueba. Por ejemplo, los números d_i para el cultivo-prueba arroz del diseño dado en la Tabla 7 son, 3 para la rotación I, 1 y 3 para la rotación II y 4 para la rotación III. El valor de h es 1, por lo que se deduce que no existe la posibilidad de construir un diseño reducido en ese caso.

Cuando las rotaciones no incluyen al cultivo-prueba en más de una oportunidad dentro del ciclo de la rotación, los números d_i son simplemente iguales a las longitudes de los ciclos de cada rotación. Si las rotaciones son de igual duración entonces $d_i = c = h$, es decir que siempre es posible conseguir un diseño reducido. Como ejemplo tómese la experiencia de la Tabla 3. El máximo número de grupos que pueden ser formados cuando hay dos o más cultivos-prueba, depende de la posición relativa de éstos en las diferentes rotaciones. Si existen dos rotaciones con igual par de cultivos-prueba en cada una y la posición relativa de los cultivos del par es la misma en ambas rotaciones, el número de grupos queda dado por h' . Este valor corresponde al máximo común divisor del conjunto h para todos los cultivos-prueba. Estas restricciones simplifican, la construcción de diseños que involucran rotaciones de desigual longitud. Por ejemplo, si P_1 y P_2 son dos cultivos-prueba en una rotación de longitud 4 (Rotación 1: P_1, C, C, P_2), con C representando a otro cultivo cualquiera dentro de la rotación, y se piensa incluir una rotación de ciclo de 6 años de longitud en el mismo ensayo con los mismos cultivos-prueba, para cumplir las restricciones antes dichas, la rotación de mayor longitud debería adoptar una de las dos siguientes formas: (1) Rotación 2a: P_1, C, C, C, C, P_2 ; (2) Rotación 2b: P_1, C, C, P_2, C, C . En las rotaciones 1 y 2a, P_2 precede inmediatamente a P_1 y en las rotaciones 1 y 2b, P_2 aparece 3 años después que P_1 . Si esta condición no ocurre, el número de grupos es sólo una fracción de h' .

Diseños fase-confundida

En situaciones donde con un diseño reducido el tamaño del bloque sigue siendo grande, puede recurrirse a un diseño fase-confundida. Este se realiza dividiendo el total de secuencias en grupos según la comparabilidad de las rotaciones, con respecto a sólo una fase de un cultivo testigo seleccionado, *i.e.* se excluyen o confunden las diferencias entre fases. Diseños de esta clase son aprovechables para cualquier conjunto de rotaciones con uno o más cultivos-prueba común a todas las rotaciones. Se construyen de la siguiente manera:

- (1)F Se selecciona un cultivo-prueba para el cual todas las comparaciones excepto las diferencias entre fases serán determinadas con la máxima confiabilidad posible,
- (2)F Se selecciona una secuencia para cada rotación, de manera que todas las comparaciones para el cultivo-prueba seleccionado, puedan ser realizadas en el mismo año al menos una vez dentro de un periodo de k años, donde k es el mínimo común múltiplo de los ciclos de las rotaciones. Estas secuencias seleccionadas constituyen una serie.
- (3)F Las series remanentes son obtenidas por sustitución cíclica del número de años, el número total de series requeridas es k .

De esta forma todas las diferencias entre fases quedan confundidas, pero las comparaciones entre rotaciones pueden realizarse. Si todas las secuencias seleccionadas se disponen sobre el mismo bloque, no habrá comparaciones confundidas entre rotaciones, situación que no se mantiene si las secuencias seleccionadas por este procedimiento se separan en dos o más grupos. En la Tabla 8 se muestra el esquema de cultivos para un ciclo de 12 años de un experimento fase-confundida, donde algodón (A) es el cultivo-prueba. El esquema es repetido idénticamente en ciclo de 12 años.

Tabla 8. Esquema de ensayo cuyo diseño alternativo podría ser el diseño fase-confundida.

Series					Rotaciones									
I	II	III	...	XII	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Años														
1	2	3	...	12	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
2	3	4	...	1	A ₁	B	T	B	T	B	B	T	B	B
3	4	5	...	2	A ₁	A ₂	A ₃	B	B	T	B	B	T	B
4	5	6	...	3	A ₁	B	T	A ₄	A ₅	A ₆	B	B	B	T
5	6	7	...	4	A ₁	A ₂	A ₃	B	T	B	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
6	7	8	...	5	A ₁	B	T	B	B	T	B	T	B	B
.	.	.	...	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	...	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12	1	2	...	11	A ₁	B	T	B	B	T	B	B	B	T

A: algodón, T: trigo duro son cultivos prueba

Las comparaciones entre algodón en las rotaciones de igual longitud no están confundidas; aquellas entre producciones de algodón en rotaciones de diferente longitud quedan parcialmente

confundidas (e.g. rotación 2 vs. 4). Para trigo duro, el otro cultivo-prueba, todas las comparaciones son parcialmente confundidas incluyendo aquellas entre rotaciones de igual longitud (e.g. rotación 2 vs. 3).

Patterson (1964) comparó el diseño fase-confundida con el diseño básico (realmente usado en aquella experiencia). El número de parcelas por bloque para el diseño básico del esquema de cultivos de la Tabla 8 es 30 mientras que el mismo esquema en un diseño fase-confundida necesita bloques de 10 parcelas. Las fracciones de información confundida en un contraste entre medias calculada sobre los 12 años para rotaciones de diferente longitud dependen de las correlaciones entre los valores de producción obtenidos repetidamente sobre la misma parcela.

Análisis estadístico de experimentos de rotación de cultivos

El análisis de los experimentos de rotación de cultivos suele realizarse sobre propiedades edáficas y otros atributos medidos de igual manera sobre las parcelas de distintas rotaciones y también sobre variables respuesta que, como el rendimiento, difieren de cultivo a cultivo. En este último caso el análisis se realiza para cada cultivo-prueba, los resultados pueden luego ser integrados en un análisis económico de la rotación. Los experimentos de rotación de cultivos con rotaciones de igual longitud y con cultivos-prueba en el mismo momento del ciclo se analizan de manera más simples que aquellos que involucran rotaciones de diferente longitud o no coinciden en tiempo del cultivo prueba. La comparabilidad de medias de tratamiento es el tema principal que debe ser considerado al analizar un experimento de rotación de cultivos.

Como otros ELD, comparten algunas características de experimentos con medidas repetidas en el tiempo sobre cada unidad experimental. Distintas estrategias de análisis han sido publicadas para datos de este tipo, conocidos en la literatura estadística como datos longitudinales (Diggle, 1988). Entre las aproximaciones más usuales se destacan (i) el tratamiento de una o más variable que resuma el perfil longitudinal dada por el seguimiento (medición) de cada unidad experimental en el tiempo, (ii) ANAVA multivariado (Johnson y Wichern, 1988), y (iii) la modelación de la estructura de correlación temporal en los datos ya sea de manera explícita, a través de estructuras de varianza y covarianza para los términos de error del modelo, tanto como de manera implícita o inducida a través de la incorporación de términos aleatorios en el contexto de un modelo lineal mixto (West *et al.*, 2014). Esta última es una de las más usadas.

La primera aproximación se basa en reducir múltiples mediciones sobre cada parcela en una medida resumen relacionada a algún fenómeno de interés. Por ejemplo, si la variable dependiente es rendimiento, la media general tomada a través de todos los tiempos (días, meses, años) en los que cada parcela es medida (observada) podría ser usada para comparar la producción total de las parcelas bajo distintos tratamientos. La varianza de estos rendimientos, así como el rango entre ellos pueden ser usadas para comparar la estabilidad de los distintos tratamientos. La pendiente de la relación rendimiento-tiempo, es una métrica que permite evaluar si las tendencias de los tratamientos con el tiempo son similares. Para cada una de estas variables derivadas del perfil de mediciones repetidas sobre una misma parcela, se procederá luego a ajustar un modelo de ANAVA según el diseño del experimento (Balzarini *et al.*, 2015) con la finalidad de comparar las medias de estas métricas entre rotaciones. Cuando se comparan múltiples parámetros del perfil longitudinal con ANAVA para cada uno de ellos, resulta recomendable aplicar la corrección de Bonferroni u otras correcciones por multiplicidad para evitar la inflación del Error Tipo I (Ott y Longnecker, 2001). Esta aproximación puede proveer buena información para la comparación de las rotaciones. Sin embargo, no considera las diferencias entre ellas respecto a la evolución o dinámica temporal con que se registran las observaciones en los distintos tiempos en los que se realiza la medición.

Por el contrario, el análisis de los perfiles temporales basado en el análisis de varianza multivariado (MANOVA) permite comparar las rotaciones con respecto a la dinámica temporal de la variable respuesta. Estas comparaciones se realizan generalmente entre secuencias que comienzan en un mismo año y son de la misma longitud. El uso del MANOVA no es usual para el análisis de experimentos de rotación de cultivos ya que si bien provee contrastes válidos entre tratamientos, demanda alta cantidad de repeticiones para contrastar valores de la variable respuesta entre tiempos de observación y para evaluar la interacción tiempo $\times$ tratamiento. En la mayoría de los experimentos de rotación no hay o hay pocas repeticiones dentro del año.

La tercera aproximación basada en la modelación de las correlaciones seriales puede, actualmente, implementarse eficientemente a través de la estimación REML (Patterson y Thompson, 1971) en el contexto de los Modelos Lineales Mixtos (West *et al.*, 2014). Las correlaciones provenientes de la recurrencia de las producciones sobre las mismas parcelas, en un experimento con diseño básico, pueden ser modeladas asumiendo un modelo lineal mixto que involucre, además de los efectos fijos de los tratamientos, tiempo de observación o año e interacción año $\times$ tratamiento, y los efectos del diseño (bloques y series), dos componentes aleatorias (independientes entre sí); una, representando

el efecto de la parcela, supuestamente constante sobre los años, con varianza parcela a parcela y otra, el efecto de la interacción parcela $\times$ año con varianza igual a la varianza residual (Balzarini, 1996).

Patterson (1964) propone analizar los rendimientos anuales promedios de bloques para cada tratamiento también con dos componentes aleatorias. La alternativa de modelar los rendimientos parcelarios *i.e* de cada unidad experimental, conduce a la obtención de los mismos resultados que aquella dada por Patterson (1964) cuando se trabaja con diseños básicos con rotaciones de igual longitud. Sin embargo, cuando se modelan los rendimientos parcelarios hay mayor información para estimaciones y pruebas de hipótesis sobre las componentes de varianza asociadas a la interacción serie $\times$ bloque y serie $\times$ bloque $\times$ año. Si alguna o ambas componentes son significativas, la modelación de los rendimientos promedios sobre los bloques no sería correcta. El análisis de datos parcelarios con modelos lineales mixtos permite, además, calcular varianzas residuales diferentes para los distintos años del experimento, *i.e.* trabajar con modelos heterocedásticos (Gilmour *et al.*, 1995). Modelando las respuestas individuales en lugar de los promedios de tratamiento a través de los bloques, también existe la posibilidad de incorporar covariables de parcela; éstas pueden resultar útiles para controlar fuentes de variación relacionadas a factores externos que no absorbe la estructura de bloques del experimento. La posibilidad de un análisis de covarianza sobre variables de parcelas podría reducir considerablemente la magnitud y heterogeneidad de los errores, situación con alta probabilidad de ocurrencia en los ensayos a largo plazo. Si existen términos aleatorios adicionales, por ejemplo parcelas principales en un diseño de parcela dividida, sus componentes de varianza también pueden diferir de un año a otro y por tanto más términos aleatorios deben ser incluidos en el modelo lineal mixto usado para comparar las rotaciones.

Actualmente, las capacidades computacionales permiten modelar la correlación serial entre datos provenientes de medidas repetidas con numerosos programas estadísticos. Guerin y Stroup (2000), recomiendan evaluar varios tipos de estructura de correlación temporal sobre los datos y seleccionar aquella con la que se obtiene el menor valor del criterio de información de Akaike (AIC). Esta aproximación de análisis tiene varias ventajas dado que proporciona pruebas formales para el efecto año, tratamiento y la interacción año $\times$ tratamiento, que otros métodos no realizan. Además, todas las combinaciones año $\times$ tratamiento pueden compararse a través de contrastes particulares, aumentando la potencia de la prueba de comparación de tratamientos cuando el modelo de correlación se eligió correctamente. Si las variaciones de los efectos de tratamiento año a año son

pequeñas o debidas exclusivamente a los efectos acumulativos de las rotaciones, las comparaciones entre rotaciones podrían realizarse usando sólo las componentes de varianza de parcela y residual. Por el contrario, si la diferencia entre los tratamientos varía considerablemente año a año en forma aleatoria, las comparaciones entre tratamientos deben realizarse con una varianza que incluya también la interacción tratamiento $\times$ año.

Para el diseño reducido, el factor Serie es marginal a todos los factores de la estructura de estratificación de unidades experimentales. Es posible realizar un análisis por separado dentro de cada serie y luego obtener estimadores ponderados de las componentes de varianza a través de las series. La ortogonalidad de los totales de parcelas dados por la relación $N=cn$ permite obtener idénticos resultados si se trabaja con las series separadas o con las series en un modelo conjunto. El análisis conjunto adiciona la posibilidad de probar hipótesis sobre las series, las que podrían ser útiles cuando, en algunas rotaciones, el cultivo-prueba se encuentra en más de una fase por rotación y por ende en más de una serie. Si se trabaja con las medias en lugar de modelar los rendimientos parcelarios ese tipo de comparaciones queda totalmente confundida con el efecto de serie y el efecto de las diferencias entre bloque de año a año.

Cuando los experimentos de rotación de cultivos están mal diseñados, la aproximación clásica de medidas repetidas puede derivar conclusiones falsas ya que las parcelas podrían no actuar independientemente. Es decir, conocer si la medición de una parcela está por encima o por debajo de la verdadera media no debería proporcionar información sobre dónde podría estar la medición de otra parcela. En los ELD donde todas las parcelas se ven afectadas simultáneamente por el mismo efecto aleatorio de año, la falta de independencia entre parcelas es esperable. Por ejemplo, si en una parcela se obtiene una medición que se encuentra muy por encima de su verdadera media debido a condiciones favorables, entonces es probable que otras parcelas medidas en el mismo año tengan una respuesta alta. Algunas propuestas frente esta situación (Loughin *et al.*, 2007) sugieren diferenciar la tendencia temporal de las rotaciones del efecto año mediante la incorporación de un patrón de tendencia fijo para modelar la evolución temporal. La componente aleatoria en torno a esta tendencia se interpreta como medida de la variación interanual. Otra alternativa, es explicar los efectos aleatorios de año mediante variables auxiliares. El ajuste de un modelo con efecto año como covariable, *i.e.* ajuste simultaneo de modelos de regresión a través del tiempo para cada tratamiento, permite diferenciar las tendencias promedios de los efectos de rotaciones en el tiempo de la variación interanuales. Las variaciones aleatorias asociadas con los ambientes pueden también ser

explicadas, en alguna medida, por mediciones de variables auxiliares relevadas en esos ambientes como precipitación, radiación o incidencia de plagas. Con información detallada a nivel de parcela, es posible separar efectos de tratamientos de aquellos de año, que de otra manera estarían confundidos.

Consideraciones finales

Diferentes rotaciones pueden ser comparadas en cada uno de los años en que ellas tienen el mismo cultivo; éstos actúan como cultivos-prueba. Pueden incluirse varios cultivos-prueba con la finalidad de evaluar diferentes tipos de efectos. Los cultivos-pruebas no necesariamente deben ser comunes a todas las rotaciones del ensayo. El diseño experimental puede involucrar varios grupos de rotaciones, donde las rotaciones dentro de cada grupo son comparables con respecto a un cultivo-prueba. En el diseño, esto es importante para realizar comparaciones entre las rotaciones en varios años.

En la etapa de diseño, los cultivos de cada rotación deben arreglarse espacial y temporalmente para garantizar grupos de parcelas que incorporen el mismo cultivo en un número suficiente de años para realizar las comparaciones de interés. Es importante, en los experimentos de rotación a largo plazo, incluir todas las fases de la rotación en cada año. Ello permite que los diferentes cultivos estén expuestos a una muestra más amplia de condiciones ambientales por lo que la confianza de las estimaciones para un período de años se incrementa.

Series de parcelas asociadas a los grupos de secuencias comparables, permiten aumentar la cantidad de información disponible en el lapso de tiempo que permanece el experimento. La conformación y disposición de las series define por lo menos tres tipos de diseños para los experimentos de rotación cíclicos: (1) Diseño Básico, (2) Diseño Reducido y (3) Diseño de Fase-Confundida.

Las secuencias comparables deben arreglarse en una misma serie de parcelas. Si cada bloque o repetición de la experiencia contiene todas las series, se tiene un Diseño Básico; si las distintas series se disponen en bloques separados, se tiene un Diseño Reducido. El diseño básico elimina confundimiento, pero cuando el número de rotaciones a comparar es alto, el tamaño requerido de bloque puede ser demasiado grande. La variación de parcelas dentro de un mismo bloque deberá ser contemplada mediante un análisis *a posteriori* de la recolección de información indicadora de tal variación. En general, el diseño reducido puede resultar más eficiente ya que el menor tamaño de bloques aumenta la probabilidad de una buena estratificación.

El diseñador de un experimento de rotación de cultivos debe construir una tabla que muestre el cultivo que debe ser sembrado en cada parcela en cada año (calendario de rotación) y debe controlar que en cada año haya suficientes parcelas con el cultivo-prueba en cada bloque para realizar un análisis correcto de los datos.

Conviene definir las rotaciones a probar, usando cultivos, sitios, productos y labores de manejo ya conocidas. En tal sentido una propuesta aconsejable es, planificar un programa de trabajo de dos etapas. En la primera, sobre experimentos a corto plazo, se pueden estudiar los efectos de los distintos cultivos en secuencia; los resultados de estas experiencias son luego usados en una segunda etapa para seleccionar un número pequeño de rotaciones a contrastar en un ensayo a largo plazo destinado además a evaluar los efectos acumulativos de las mismas. Esta selección hace que sea más factible el arreglo de la experiencia bajo un diseño básico o reducido.

Numerosos aspectos no estadísticos deben ser considerados durante el diseño de un ELD. Por ejemplo, es importante asegurarse que el tamaño de las parcelas sea lo suficientemente grande para evitar que el efecto de un tratamiento se extienda a la parcela adyacente y los sistemas de labranza deben evitar un movimiento excesivo del suelo en la parcela. Además, si el experimento será conducido a través de varias series de rotación, puede ser útil dividir las parcelas con el objetivo de aplicar factores de tratamientos adicionales a los cultivos de rotación, por ejemplo, distintos niveles de fertilización.

Tratamientos básicos (fertilización, sistemas de labranza, controles químicos, etc.) o incluso cualquier rotación en particular puede ser modificada durante el experimento para mantener el experimento de rotación.

Cada vez que un ciclo de rotación se completa, será importante preguntarse qué conocimientos se espera pueda aportar un ciclo más de rotación y qué información es aprovechable en esa instancia de la experiencia. El tiempo del ensayo debería ser acotado, mientras más largo sea más gasto habrá y aumentará la probabilidad de que aparezcan factores no controlables.

Las rotaciones a probar deben ser seleccionadas del grupo de rotaciones factibles de realizar en la práctica. Poco valor tiene determinar cuál es la rotación más conveniente, desde un punto de vista conservacionista, si la superficie sobre las que se conducirán las rotaciones en la práctica, no son suficientes para que se puedan hacer ciertos cultivos en forma económica. Los productores tomarán en cuenta medidas tendientes a la sustentabilidad si, a la vez, perciben que ellas conducen a una

mayor rentabilidad de su empresa. Por ello, el análisis económico de las rotaciones que se comparan es de vital importancia. Quienes conduzcan este tipo de ensayos deben prever los registros que deben ser llevados para tal fin.

Las experiencias de rotación en la práctica, son complicadas, ya que se suele disponer de un número de variantes de cada rotación provocadas por la inclusión en el experimento de otro factor tratamiento como puede ser fertilización o manejo del suelo. En tal caso se pueden usar principios de los experimentos factoriales. Frecuentemente el diseño de parcelas divididas es de valor para incorporar al ensayo ciertos tratamientos auxiliares, en cuyo caso la metodología de análisis propuesta para los experimentos de rotación sin tratamientos auxiliares puede ser fácilmente adaptada.

Si después de unos años de realización de la experiencia se sugiere la necesidad de introducir tratamientos auxiliares tales como fertilización, la partición de las parcelas existentes puede constituir una buena alternativa.

Si se usan producciones de un cultivo como variable de estudio, deben registrarse uniformemente a través de los años. Por ejemplo, todos deberían realizarse a humedad constante. Así, si los porcentajes de humedad varían, se debe calcular la producción por hectárea corregida para una humedad constante.

En la medida de lo razonable, deben realizarse esfuerzos para continuar los tratamientos bajo el esquema planteados inicialmente. Si por circunstancias de fuerza mayor, se debieran introducir alteraciones sustanciales es mejor comenzar una nueva experiencia.

Bibliografía

- Balzarini M; Di Rienzo J; Tablada M; Gonzalez L; Bruno C; Córdoba M; Robledo W; Casanoves F. 2015. Estadística y Biometría. Encuentro Grupo Editor. Córdoba, Argentina.
- Baldock J; Musgrave R. 1980. The Aurora Rotation Study. A statistical and agronomic analysis of crops yields and their variability. Search agriculture 8. Cornell University Agricultural Experiment Station. Ithaca, New York.
- Balzarini M. 1996. Diseño y Análisis de Ensayos para Comparar Rotaciones de Cultivos. Tesis Maestría. UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Diggle P. 1988. An approach to the analysis of repeated measurements, Biometrics 44: 959- 971.
- Gilmour A; Thompson R; Cullis B. 1995. Average information REML: An efficient algorithm for variance parameter estimation in linear mixed models. Biometrics, 51, 1440-1450.

-
- Guerin L; Stroup W. 2000. A Simulation Study to Evaluate PROC MIXED Analysis of Repeated Measures Data. Proceedings of the 12th Annual Conference on Applied Statistics in Agriculture, Manhattan, Kansas State University, 170–203.
- Johnson R ; Wichern D. 1988. Applied multivariate statistical analysis. Prentice-Hall. NJ
- Loughin T; Roediger M; Milliken G; Schmidt J. 2007. On the analysis of long-term experiments. J. R. Stat. Soc.: Ser. A (Stat. Soc.) 170: 29-42
- Martin B; Bennett C; Cullis C; Godwin D; Mason W. 1998. Assessment of long-term experiments in Australia, Kingston, ACT, Australia. Grains Research and Development Corporation, Barton, ACT, Australia.
- Ott L ; Longnecker M. 2001. An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis. (5th ed.). Duxbury, Thomson Learning.
- Patterson H. 1953. The analysis of the results of a rotation experiment on the use of straw and fertilizers. J. Agr. Sci. 43: 77-88.
- Patterson H. 1964. Theory of cyclic experiments. J. Royal Stat. Soc. Serie B. 26: 1-36.
- Patterson H; Thompson R. 1971. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. Biometrika, 58, 545-554.
- West B; Welch K; Galecki A. 2014. Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software, CRC Press.
- Yates F. 1954. The design of rotation experiments. Commonw. Bur. Soils Tech. Commun. 46: 142-155.

Base de datos para monitoreo de la sustentabilidad en sistemas productivos.

Uso de indicadores de calidad de suelos

Juana M. Lopez¹, Jorgelina Huidobro², Amanda Vizgarra³ & María C. Sánchez¹

¹INTA EEA Santiago del Estero; ²INTA EEA Cerrillos (Salta); ³INTA EEA Quimilí

El Suelo es un recurso esencial del medio ambiente natural necesario para producir la mayor parte de los alimentos para la población. Forma parte del entorno heterogéneo cercano a la superficie en que interacciones complejas, que involucran la roca, el suelo, el agua, el aire y los organismos vivos, regulan el hábitat natural y determinan la disponibilidad de recursos que sustentan la vida (Bui E. 2016). En este sentido, Zornoza *et.al.* (2015) afirman que el suelo es un ambiente complejo con alta heterogeneidad donde componentes sólidos, líquidos y gaseosos interactúan dentro de una multitud de procesos físicos, químicos y biológicos interrelacionados.

El suelo brinda múltiples beneficios a la humanidad proporcionando el espacio vital para los seres humanos, así como también los servicios ecosistémicos esenciales que son importantes para la regulación y suministro de agua, la regulación del clima, la conservación de la biodiversidad, el secuestro de carbono y los servicios culturales. El aumento de la población, las mayores demandas de alimentos y la competencia por los usos de la tierra atentan muchas veces contra sus funciones ambientales. Aproximadamente el 33% de los suelos del mundo están degradados y los funcionarios de políticas públicas están explorando estrategias para impulsar el desarrollo sostenible en cada región. (Keesstra *et.al.* 2016; FAO 2016- <http://www.fao.org/global-soil-partnership/>).

Un manejo sustentable de las tierras combina tecnologías, políticas y actividades que se dirigen a la integración de principios socio-económicos con intereses ambientales (Wilson *et.al.*, 2008). La investigación y desarrollo de sistemas productivos sustentables en diferentes ambientes necesita de estudios multidisciplinarios que identifiquen y entiendan los componentes e interacciones en el ecosistema productivo, incluyendo al productor como parte componente del mismo (aspecto socio-económico). Es así que, desde el contexto agrícola, la sustentabilidad ecológica se refiere a la capacidad de un sistema de ser productivo y a la vez mantener la calidad de base de los recursos naturales.

Esta complejidad de factores y sus interacciones en un sistema productivo, representa un desafío para quienes investigan y validan estrategias de manejo sustentables como parte del desarrollo regional. Por ser sistemas dinámicos, sujetos a interacciones múltiples del ambiente, están en permanente cambio que deben ser identificados en los monitoreos a los fines de tomar decisiones oportunas.

Las investigaciones en sistemas productivos a diferentes escalas brindan información necesaria para establecer un inventario crítico de prácticas de manejo actuales, y proyectar opciones a futuro para que el Estado, con sus instituciones y recursos financieros, establezcan un proyecto de inversión en programas de producción sustentables para cada ambiente y escala de trabajo. Estos son temas que el mercado no abordará y por lo tanto, será importante la acción del Estado para el desarrollo e implementación de estos estudios en el país (Echeverría, 2015)

Características y estructura de la base de datos, como soporte de Indicadores de Calidad de Suelos.

La calidad de un suelo se puede cuantificar a través de indicadores de calidad del suelo (ICS) que evalúan la condición actual o “estado del recurso” y su evolución temporal (dirección o sentido del cambio que puede ser positivo o negativo). Son necesarios para monitorear cambios en la calidad del suelo relacionados al uso y manejo agropecuario. Consecuentemente el sector productivo puede tomar decisiones que permitan mitigar o prevenir un daño mayor en el suelo.

En los últimos años se ha generado un cúmulo de ICS de diversa naturaleza en las regiones productivas del país. La cantidad de información generada requiere una sistematización adecuada de la misma, por lo que el diseño y desarrollo de una Base de Datos, se considera una herramienta apropiada para llevarlo adelante.

Es deseable disponer de un sistema que incorpore una base de datos con una estructura de datos dinámica, que sea lo más completa posible para evaluar y monitorear la sustentabilidad de sistemas productivos, pero hay que considerar algunas limitantes tanto para su construcción, como las referidas a su capacidad de respuesta.

En relación a la construcción, una de las limitantes es la disponibilidad y calidad de datos que implica: (i) trabajar sobre la carga y actualización de datos por ambientes y manejos, (ii) definir estructura de datos comunes bajo estándares que permitan acceder a los datos, (iii) organizar una red de monitoreo

que garantice la disponibilidad de información en el tiempo, (iv) unificar los métodos de medición para hacer posible las comparaciones.

Las limitantes que se relacionan con la respuesta que puede proveer un BD, tienen que ver con el lenguaje en que se realiza la consulta, técnico o no técnico, y con la posibilidad de relacionamiento de las distintas variables consideradas.

Las mencionadas limitaciones se minimizan con un protocolo de metodologías de campo definido y un minucioso trabajo diseño de una base de datos, lo que permitirá homogeneizar el nivel de información.

La disponibilidad de bases de datos es una estrategia práctica para consultas públicas, y genera un espacio de interacción entre instituciones con la finalidad de compartir datos que alimentan la base para un mejor estudio y análisis de los procesos del suelo y otros recursos a diferentes escalas y poder ver su evolución en el tiempo.

Algunas bases de datos almacenan datos de uno de los componentes del ecosistema (suelo, agua, clima, vegetación, uso), y otras son más complejas pero presentan ausencia de datos específicos que permitan analizar los procesos de interacción entre tales componentes. Algunas publicaciones al respecto se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Bases de datos de Instituciones

Nombre de Base de Datos	Institución	Página Web	Abordaje
Harmonized World Soil Database (HWSD) Version 1.1 (2009)	FAO, IIASA, ISSCAS, JRC	http://www.isric.org/content/harmonized-world-soil-database-	Iniciativa para combinar los volúmenes recolectados de actualizaciones regionales y nacionales de la información sobre el suelo con la información contenida en la escala 1: 5000000-FAO-UNESCO Digital Soil Map of the World, en una nueva base de datos completa (HWSD).
WoSIS Soil Profile Database	ISRIC	http://www.isric.org/	ISRIC - World Soil Information tiene la misión de servir a la comunidad internacional como custodia de la información global del suelo. Se trata de aumentar la conciencia y la comprensión de los suelos en los principales problemas mundiales.
Soil Quality for Environmental Helath	Department of Natural Resources and Environmental Sciences, University of Illinois at Urbana-Champaign	http://soilquality.org/home.html	Proporciona las bases para la calidad ambiental y el uso sostenible
SINDI online Soil Quality Indicators	LANDCARE RESEARCH - MANAAKI WHENUA	http://sindi.landcareresearch.co.nz/Home	Los indicadores seleccionados para evaluar la calidad del suelo en el SINDI reflejan aspectos de la estructura física del suelo, la fertilidad química, el almacenamiento de nutrientes, los recursos de materia orgánica y la vida biológica en el suelo. Estos indicadores son específicos para suelos de Nueva Zelanda
GEOINTA	INTA	http://geointa.inta.gov.ar/web	Sistema de geo-información para consulta y procesamiento de datos georreferenciados de Argentina
SiSINTA	INTA	http://sisinta.inta.gov.ar/	Se publican perfiles de suelos de la República Argentina. Actualmente hay 3023 perfiles (1765 públicos) cargados en 2161 series.
GAEZ Global Agro-ecological Zones	FAO	http://www.fao.org/nr/gaez/es/	Programa GAEZ: Una evaluación mundial para apoyar la estrategia, la gestión, la planificación, el uso racional y el desarrollo sostenible para afrontar la seguridad alimentaria – facilitando acceso a datos, información y conocimientos.
SoilGrids	FAO ISRIC	https://www.soilgrids.org/	Soil Grids está diseñado como un sistema globalmente consistente y basado en datos que predice las propiedades del suelo y las clases usando covariables globales y modelos globalmente equipados.

Una característica común entre ellas es el tipo de información que se publica y la interfaz a través de la cual el usuario debe hacer la consulta. En general, para hacer la consulta debe utilizar un lenguaje técnico básico para ingresar los valores de las variables o seleccionar indicadores edáficos calculados a priori. Las respuestas son estáticas, respondiendo con información específica almacenada o calculada a partir de procesos de cálculos sencillos. Esto representa una limitante para otros usuarios no familiarizados con el vocabulario técnico, cuyas consultas son abiertas y generales, con un lenguaje de comunicación no técnico. El sistema debería estar orientado a incluir la opción de responder también este tipo de consultas mediante la ejecución de algoritmos que permitan interpretarlas y generar una respuesta relacionando las variables de los diferentes componentes que interactúan en los procesos del suelo consultados. Este funcionamiento relacional es complejo y requiere la interacción de disciplinas de informática y recursos naturales.

Al respecto, Camacho Vazquez *et.al.* (2015) menciona como dificultades para compartir y reutilizar bases de datos geográficas de diversas aplicaciones a la inexistencia de un modelo de datos y funciones estándar de las bases de datos y, a la insuficiencia de datos descriptivos a cerca de los mismos (metadatos).

La implementación de una base de datos como núcleo de un sistema de indicadores de calidad de suelos, que permita el ingreso de datos por informantes calificados (abierto), que soporte la aplicación de algoritmos de procesamiento de los datos de los diversos componentes que interactúan en un ambiente determinado, que se actualice permanentemente e incorpore sus metadatos es una herramienta estratégica para desarrollar y estudiar los procesos que ocurren en un ecosistema particular, útil para monitorear diferentes indicadores de calidad de suelo en diversos manejos productivos y ambientes.

Desarrollo del sistema de indicadores de suelos de INTA

El objetivo definido previamente fue desarrollar una aplicación basada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que incorpore una base de datos multiusuario, algoritmos de procesamiento y entornos de visualización y consulta en la web para medir y monitorear los indicadores de calidad de suelos definidos en diferentes agro-ambientes. Para alcanzar este objetivo se propusieron cuatro puntos:

- F Aplicar la metodología de Proceso Unificado para el desarrollo de la aplicación que aborde de manera iterativa e incremental los casos de uso (problemas o estudios de casos específicos de los agroambientes) que requieran la medición y monitoreo de ICS.
- F Desarrollar el SIG con herramientas de software libre o de código abierto que cumplan con los estándares para la interoperabilidad y comunicación entre tecnologías de Sistemas de Información Geográfica.
- F Implementar los algoritmos de procesamiento para calcular los indicadores de calidad de suelos a partir de los datos almacenados en la base de datos y generar un complemento o plugin (programa) que añada la funcionalidad de cálculo de ICS a un software de SIG.
- F Desarrollar una interfaz amigable e interactiva de carga y consulta de la base de datos, y de visualización de resultados mediante software de escritorio y a través de la web.

Para abordar los puntos mencionados anteriormente se adoptó la metodología propuesta en el siguiente apartado.

Metodología de desarrollo del sistema de indicadores de calidad de suelos

El Proceso Unificado es una metodología de desarrollo de software que se basa en el desarrollo iterativo e incremental. Este enfoque es particularmente útil en este contexto, ya que en cada iteración se desarrolla uno o más casos de uso y el sistema crece incrementalmente a lo largo del tiempo. De esta manera es posible desarrollar el sistema de ICS por problemas o regiones agroambientales.

Cada iteración consta de 4 fases: inicio, elaboración, construcción, y transición (Figura 1)

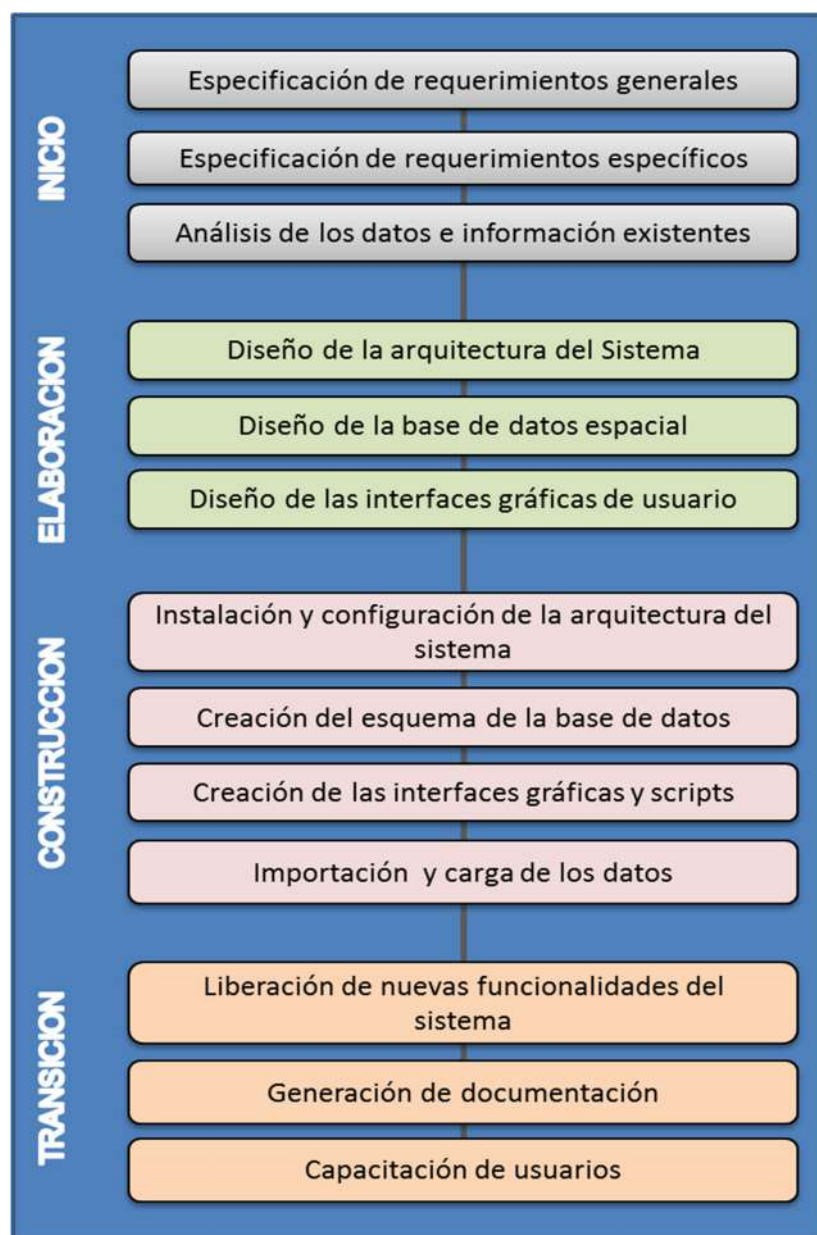


Figura 1. Metodología de desarrollo del sistema basada en una adaptación del Proceso Unificado

a)V FASE DE INICIO

1. Especificación de requerimientos generales

En lo que refiere a la determinación de los requerimientos funcionales y propiedades generales del sistema, se destacan como principales que:

-
- F La base de datos debe soportar el almacenamiento de datos geográficos y alfanuméricos.
 - F El sistema debe ofrecer interfaces que permitan visualizar e interactuar con los datos almacenados en la base de datos de ICS y bases de datos externa, accesible a través de servicios de interoperabilidad.
 - F El sistema debe permitir el acceso remoto a la base de datos geográfica para la carga y consulta de datos, para ello se deben definir tipos de usuarios, con sus respectivos roles y permisos de acceso. Este requerimiento permitirá la participación de los técnicos de las diferentes Estaciones Experimentales y de otros grupos de investigación
 - F Los resultados que se muestren al usuario integren mapas, informes estadísticos, gráficos, textos para facilitar la comprensión de los análisis espaciales y/o temporales realizados. Para ello contará con un sitio web que incorpore un visor de mapas.

2. Especificación de requerimientos específicos

Los requerimientos específicos serán definidos por equipos interdisciplinarios en los diferentes agro-ambientes. Para ello se seguirá la metodología propuesta por von Wirén-Lehr (2001) para evaluar e implementar la sostenibilidad en la agricultura, cuyo objetivo es consolidar diversos principios teóricos y transformarlos en recomendaciones para la práctica agrícola (Figura 2). El proceso consta de 4 pasos, los cuadros presentan el flujo de datos requerido (izquierda) y el resultado esperado (derecha).

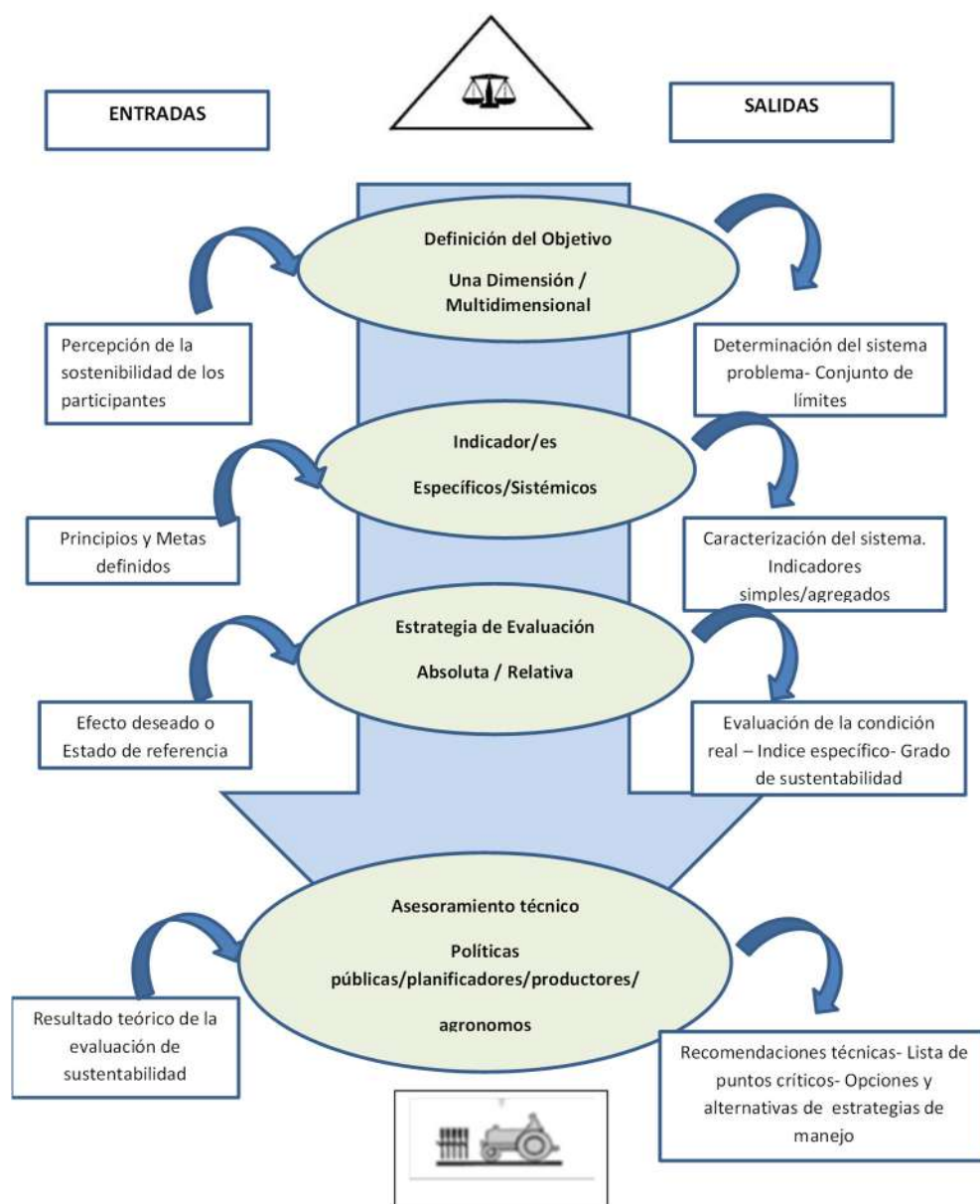


Figura 2. Características básicas de las estrategias de cuatro pasos para evaluar e implementar la sostenibilidad en la agricultura. Los cuadros presentan el flujo de datos requeridos (izquierda) y el resultado esperado (derecha) de cada rasgo (Adaptado de von Wirén-Lehr (2001))

3. Análisis de los datos e información existentes

Las fuentes de información de indicadores de suelos generada por distintos grupos de trabajo en Argentina proveniente de ensayos de larga duración, calicatas, muestreos, mapas y cartas de suelos son utilizados para formar la base de datos. Como el objetivo del sistema es disponer de una base de datos centralizada, es necesario la depuración y conversión de los diferentes formatos de archivos de

cada fuente de datos a una estructura común para ser importados a la base de datos. Las fuentes de información para la base de datos de INTA incluyen: i) SISINTA, ii) GeoINTA, (iii) Planillas de Microsoft Excel que contienen datos de mediciones de ensayos de larga duración, muestreos, calicatas entre otros realizadas por diferentes grupos de investigación; (iv) acceso remoto a datos de cartografía complementaria, tales como cobertura, uso del suelo, datos climáticos, pendientes, mapas y cartas de suelos a través de servicios de interoperabilidad WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service), WCS (Web Coverage Service).

b) V FASE DE ELABORACIÓN

1. Diseño de la arquitectura del Sistema

Las aplicaciones y tecnologías propuestas en el diseño de la arquitectura del sistema se basan completamente en software libre o de código abierto (Figura 3). Entre las aplicaciones más importantes de para el diseño de esta arquitectura se utilizaron:

Servidor de base de datos geográficos: el sistema de gestión de bases (SGBD) de datos objeto-relacional PostgreSQL y la extensión espacial PostGIS. tienen la función de almacenar de forma estructurada y segura los datos alfanuméricos y geográficos de la base de datos de ICS y por otro recuperar eficientemente los datos usando el lenguaje estructurado de consulta (SQL) y las funciones espaciales y de acceso a las geometrías.

Servidor de datos espaciales: como aplicación intermedia que permita acceder de manera remota a los datos espaciales a través de servicios de interoperabilidad se utiliza Geoserver. Los datos geográficos (básicos o ICS calculados), una vez publicados en Geoserver pueden agregarse como capas en un visor de mapas.

Sistema de Indicadores de calidad de suelos: Se creará una plugin o complemento que incorpore el cálculo de indicadores de calidad de suelos de los diferentes agro-ambientes utilizando un lenguaje de programación. Este complemento se podrá ejecutar desde el software de SIG, QGIS.

Sistema de Indicadores de calidad de suelos en la web: es posible publicar los mapas de indicadores de calidad de suelos en el sitio de GeoINTA, el cual dispone de un visor de mapas que permite el acceso en tiempo real, a la información espacial generada en el marco de los diferentes proyectos de INTA. Se prevé, el desarrollo de un sitio Web interactivo que permita realizar consultas tanto en

lenguaje técnico como no técnico y visualizar los resultados a través de contenidos multimedia (mapas interactivos, textos, imágenes, audios, videos).

2.V Usuarios del Sistema de indicadores de calidad de suelos

Respecto a los usuarios, podemos distinguir tres tipos de usuarios, de acuerdo al nivel de interacción con el sistema:

- Faquellos que realizan consultas y/o visualizan la información derivada de la cuantificación y monitoreo de indicadores de calidad de los suelos a través del sitio web.
- Faquellos que además pueden acceder, consultar y recuperar la información geográfica a través de los servicios de interoperabilidad como WMS o WFS utilizando software libre y/o propietario. Estos usuarios pueden acceder a los datos, transformarlos y extraer información utilizando la aplicación de cálculo de indicadores y/o funciones de análisis espacial provistas por estas herramientas.
- Faquellos que tendrán permiso de cargar y editar datos de la base de datos, quienes podrán acceder a la base de datos de manera directa (usuarios INTA) o a través del protocolo de servicio WFS con permisos de edición.



Figura 3. Diseño de la arquitectura y tecnologías del Sistema de indicadores de calidad de suelos

3.F Diseño de la base de datos espacial

A partir del análisis de requisitos para cada caso de uso, se definirán los datos que deben ser almacenados en la base de datos, y las relaciones entre ellos para poder calcular los ICS relevantes.

Para ilustrar el concepto de caso de uso y el diseño de la base de datos se enunciará un ICS seleccionado para un sistema productivo agropecuario. De acuerdo a la complejidad, puede ser abordado en un caso de uso de manera individual o junto a otros ICS definidos para el mismo sistema productivo.

El carbono orgánico del suelo (COS) es un indicador de la fertilidad y calidad del suelo y monitorear sus cambios en el espacio (integrando ambiente, paisaje, usos) y el tiempo es un pre-requisito para

establecer estrategias con el fin de reducir las pérdidas de suelo y preservar su calidad. Se sabe que el comportamiento del COS depende fuertemente de la textura del suelo, historia de uso de la tierra, régimen de precipitaciones y temperatura, y los índices topográficos relacionados a la erosión y a la deposición.

El proceso de diseño de la base de datos consistirá de tres pasos fundamentales:

Diseño Conceptual: a partir de la definición de los casos de uso (cambios en la calidad del suelo que se deban monitorear para un uso y manejo agropecuario sustentable), se identifican las aplicaciones que la base de datos debe soportar y – a nivel conceptual – los datos que son necesarios para ello. El modelo conceptual de la base de datos, proporciona una representación formal del problema sin introducir demasiados detalles. De este modo es posible obtener una visión global que pueden entender tanto usuarios del sistema (grupos multidisciplinarios), como los diseñadores. Este paso se suele realizar con el modelo Entidad-Relación. Para el caso de uso del ejemplo, las capas espaciales que se deben incorporar a la base de datos son: regiones naturales, precipitación, suelos, geología, uso de suelos, sitios de muestreo, índices topográficos (Figura 4)



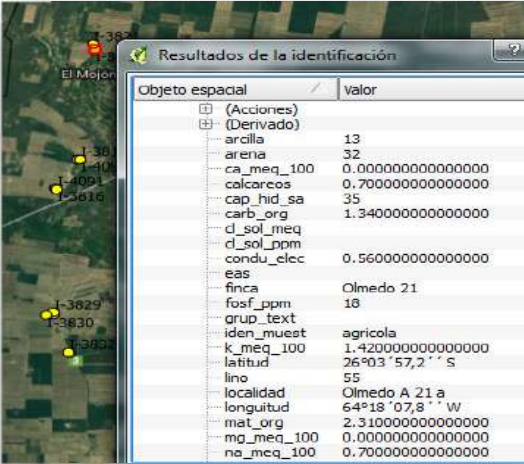
Figura 4. Superposición de datos geográficos del área de estudio

La relación entre las variables es: cada sitio de muestreo pertenece a una región natural, está contenido en una unidad cartográfica de suelos, pertenece a una unidad geológica, tiene usos de suelos que cambiaron a lo largo del tiempo, posee un régimen de precipitaciones e índices

topográficos (altura, pendiente y orientación). Estas relaciones son propias de cada ambiente por la naturaleza dinámica, heterogénea y abierta del sistema suelo.

Diseño Lógico: Este esquema se suele llamar modelo de datos, es mucho más detallado que el modelo de datos conceptual, se deben especificar las capas temáticas, tablas, atributos, asociaciones, reglas de comportamiento y tipos de relaciones entre los elementos. Como ejemplo, la Figura 5 muestra una tabla de atributos asociada a los sitios de muestreo y la visualización de los datos de un sitio (ubicación y atributos).

ID	Nombre	Tipo	Nombre de tipo	Longitud	ecisii
0	nro_labo	QString	String	254	0
1	zona	QString	String	254	0
2	empr_prod	QString	String	254	0
3	finca	QString	String	254	0
4	localidad	QString	String	254	0
5	iden_muest	QString	String	254	0
6	latitud	QString	String	254	0
7	longitud	QString	String	254	0
8	arena	int	Integer	10	0
9	lino	int	Integer	10	0
10	arcilla	int	Integer	10	0
11	textua	QString	String	254	0
12	grup_text	QString	String	254	0
13	cap_hid_sa	int	Integer	10	0
14	ph	double	Real	24	15
15	condu_elec	double	Real	24	15



The screenshot shows a map with several sampling points marked by yellow dots. A window titled 'Resultados de la identificación' (Identification Results) is open, displaying a list of attributes for a selected point. The attributes include spatial objects (e.g., 'arcilla', 'arena'), derived values (e.g., 'ca_meq_100', 'colcareos'), and various chemical and physical parameters (e.g., 'cap_hid_sa', 'carb_org', 'cl_sol_meq', 'cl_sol_ppm', 'condu_elec', 'eas', 'fosf_ppm', 'grup_text', 'iden_muest', 'k_meq_100', 'latitud', 'lino', 'localidad', 'longitud', 'mat_org', 'mg_meq_100', 'na_meq_100').

Figura 5. Definición de la tabla de atributos (campos, tipo de datos, longitud) a la izquierda y a la derecha la identificación de un sitio con sus atributos

Diseño Físico: una vez elegido el SGBD a utilizar, se convierte el diseño lógico de la base de datos en un esquema de base de datos del SGBD elegido, en este caso a la estructura de datos que puede manejar PostgreSQL + PostGIS. En este paso se define el sistema de coordenadas y/o se hace algún rediseño con el fin de mejorar el funcionamiento del sistema.

Diseño de las interfaces gráficas de usuario

De acuerdo a las funcionalidades a incorporar al sistema se deben diseñar las interfaces graficas de usuario. Las interfaces gráficas son formas y métodos que posibilitan a los usuarios la interacción con un sistema, empleando para esto, gráficos e imágenes. Estas interfaces se incorporan a la aplicación

para facilitar la entrada de datos tales como la ubicación de un sitio a partir de la delimitación de un rectángulo sobre un mapa, elementos que faciliten la construcción de consultas como casillas de verificación para seleccionar indicadores, listas desplegables para seleccionar variables y construir sus consultas en un lenguaje similar al lenguaje natural. También incorporan la visualización de resultados derivados de su procesamiento, por ejemplo un mapa de COS acompañado de un gráfico que muestre su variación en el tiempo, en función del uso de la tierra en un ambiente y paisaje determinado. La figura 6 muestra una interfaz a modo ilustrativo.

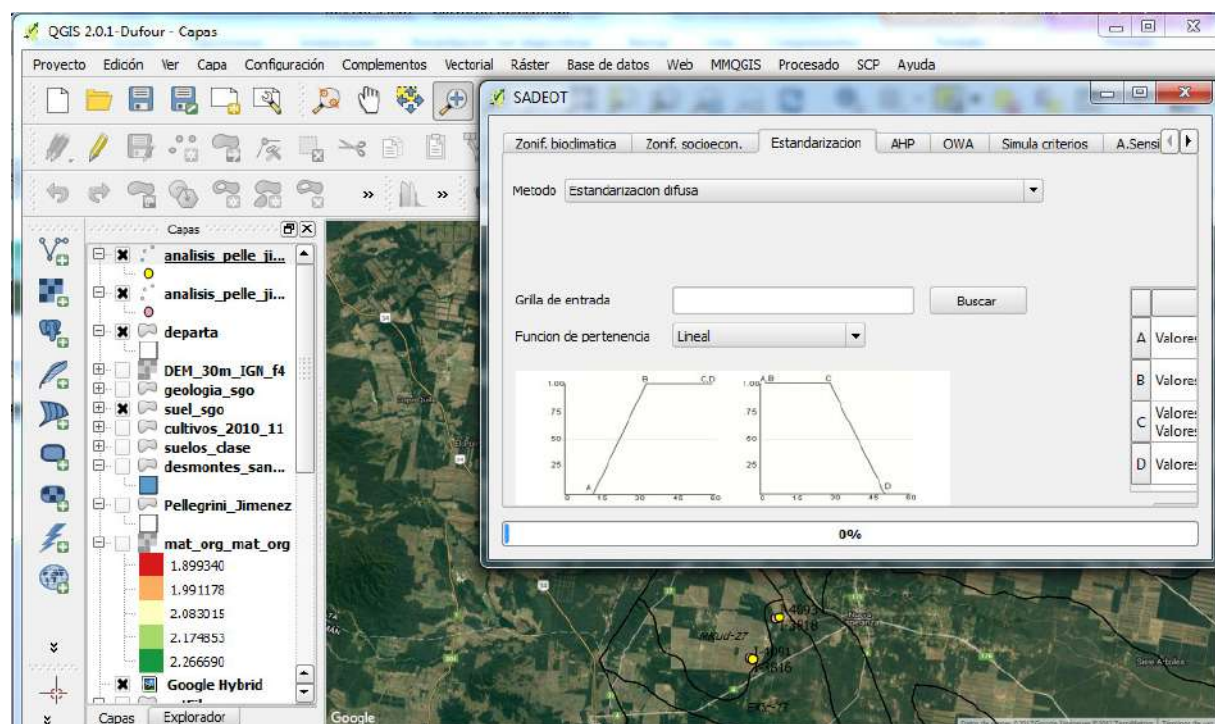


Figura 6. Ejemplo de una interfaz gráfica de usuario. De fondo se observa la interfaz gráfica de QGIS, a la izquierda se observan las capas de datos provenientes de la base de datos y superpuesta alrededor de QGIS, una interfaz gráfica para realizar procesos sobre los datos.

c)V FASE DE CONSTRUCCIÓN

1.F Instalación y configuración de la arquitectura del sistema

La instalación y configuración de los programas que soportan el sistema debe tener el SGBD y el servidor de datos espaciales Geoserver instalados y en funcionamiento.

2.F Creación del esquema de la base de datos

El esquema se refiere a la estructura de la base de datos: las tablas, sus nombres, sus campos, tipos de datos, dominios, entre otros. En esta etapa se deben asignar los roles y permisos de los usuarios de acuerdo a los requerimientos específicos en cada caso de uso.

3.F Creación de las interfaces gráficas y complementos

La programación de las funciones de la aplicación se realiza utilizando el lenguaje Python, y se vinculan con las interfaces gráficas generadas en PyQt. En algunos casos se puede requerir implementar técnicas de evaluación multicriterio, árboles de decisión, funciones disponibles en el marco de procesamiento de QGIS,. El caso de árboles de decisión permite clasificar nuevos casos (sitios, usos, por ejemplo) en base a otros cuyos resultados se conocen (casos de entrenamiento) y la evaluación multicriterio se puede usar para estimar vulnerabilidad o riesgos de alteración de calidad de suelos en base a datos disponibles (pendiente, clima, textura, uso de suelo, etc.)

4.F Importación y carga de los datos

Los datos que se almacenan en la base de datos pueden provenir de otras fuentes de datos y deben ser importados o, se deben cargar manualmente.

Como resultado del análisis de los datos e información existente para cada caso de uso planteado (ver punto arriba) y, dependiendo del formato y calidad de los mismos, se identificarán los procesos previos a la importación a la base de datos. Estos procesos pueden incluir importación de datos geográficos, normalización de tablas de datos alfanuméricos, depuración de datos, entre otros. En el caso de datos aún no cargados, se deben definir los controles a implementar durante la carga y realizar la capacitación del personal involucrado en el proceso de automatización.

d)V FASE DE TRANSICIÓN

Esta es la última fase del desarrollo, el sistema se hace accesible a la comunidad de usuarios a través acciones como: actualización del complemento que calcula los ICS, incorporación de mapas e información de indicadores en el visor y/o página web. Esta transición se puede realizar de manera

parcial, a medida que se incorporen nuevos indicadores y debe contemplar la generación de documentación para el usuario en forma de tutoriales o videos explicativos que ayuden a interpretar el proceso de cálculo y los resultados. Todo el proceso debe estar acompañado de un programa de capacitación destinado a los grupos que trabajan en su desarrollo como a usuarios finales (productores, estudiantes, otros equipos de investigación). De esta manera se obtiene una retroalimentación (devolución) para incorporar correcciones o mejoras al sistema.

Consideraciones finales

La base de datos para indicadores de calidad de suelo tiene como finalidad el libre acceso a datos e información sobre suelos y sus relaciones con el ambiente, para agricultores y responsables de gestión pública en el Estado como regulador y responsable de proteger nuestros recursos naturales (Constitución Nacional- Ley de Presupuestos Mínimos para la protección de los recursos naturales). Esto es posible si logramos concretar un sistema nacional de información geográfica especializado, integrado por redes que incorporan (desde diferentes sitios y software) datos y funciones que grafiquen o modelen las diferentes situaciones del suelo en sus manejos productivos.

Los ensayos de larga duración que se desarrollan en diferentes ambientes de la República Argentina, son un repositorio de información fundamental para el estudio de indicadores de calidad de suelos y sustentabilidad de los sistemas productivos. El registro sistemático de variables ambientales y de producción, claramente integran la capacidad del sistema para adaptarse a las variaciones climáticas, y cuál es el rol que cumplen las diferentes interacciones suelo-agua-planta-atmosfera en el control o regulación de las funciones eco-productivas del suelo.

Agradecimientos

En este trabajo participan los proyectos INTA de investigación PNSUELOS 1134023 Indicadores de Calidad de suelos para el monitoreo de la sustentabilidad en sistemas productivos; PNNAT 1128032 módulo GeoINTA y PNNAT 1128033 Sistema de Información Territorial (SIT) para la toma de decisiones a nivel local y nacional

Bibliografía

- Bui Elisabeth N. 2016. Data-driven Critical Zone science: A new paradigm. *Science of the Total Environment* 568: 587–593.
- Camacho Vázquez H., Y. M. Fernández Ordóñez, J. Soria Ruiz y M. J. Escalona Maurice. 2015. Enfoque metodológico para la construcción de una Geobase como apoyo a la investigación en agricultura y recursos naturales. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* - ISSN 0188-4611, núm. 87, pp. 39-50, [dx.doi.org/10.14350/rig.37303](https://doi.org/10.14350/rig.37303).
- Casas R. y G. Albarracin. 2015. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo I y II. Casas y Albarración (Editores). Editorial Dunken. ISBN 978-950-9149-39-7.
- Echeverría Ruben. 2015. “El clima está cambiando”. *Actualidad en I+D. Revista RIA* (41) N° 3. pp 248-253. Ediciones INTA. ISSN en línea 1669-2314.
- FAO 2016. Alianza Mundial por los Suelos. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data/es/>
- Keesstra S., J. Bouma, J. Wallinga, P. Tittonell, P. Smith, A. Cerdà, L. Montanarella, J. N. Quinton, Y. Pachepsky, W. H. van der Putten, R. D. Bardgett, S. Moolenaar, G. Mol, B. Jansen, and L. O. Fresco. 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2, 111–128. www.soil-journal.net/2/111/2016/ doi:10.5194/soil-2-111-2016
- von Wirén-Lehr S. 2001. Sustainability in agriculture— an evaluation of principal goal oriented concepts to close the gap between theory and practice. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 84: 115–129.
- Wilson M.G., H.A. Tasi, M.C. Sasal, J. Cerana A. N. Indelángelo. 2008. Condición de suelos en producción. *Jornada Agricultura Sustentable*. INTA Paraná.
- Zornoza R., J. A. Acosta, F. Bastida, S. G. Domínguez, D. M. Toledo, and A. Faz. 2015. Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. www.soil-journal.net/1/1/2015/ doi:10.5194/soil-1-1-2015



ELDs EN DISTINTAS REGIONES DEL PAIS

Rotaciones en siembra directa con énfasis en la producción de algodón en el domo agrícola de la provincia del Chaco

Julieta Mariana Rojas, Graciela Susana Guevara & María Florencia Roldán

INTA EEA Sáenz Peña.

Descripción Regional

La Ecorregión Chaco se encuentra dentro de la región llamada Gran Chaco Sudamericano, cuya superficie abarca 1.141.000 km², representando el segundo bioma en área vegetal en importancia en Sudamérica luego del Amazonas, de una gran riqueza en biodiversidad y potencial en recursos naturales. Argentina posee un 60% del total de esta región equivalente a una superficie de 675.000 km². Dentro de las grandes regiones naturales de la Argentina, la Ecorregión se encuentra en la transición entre el Chaco seco y el Chaco subhúmedo. La vegetación predominante es el bosque o parque chaqueño, siendo las especies principales quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae* Engl.), quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl.), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco* Schltdl.), algarrobo blanco y negro (*Prosopis alba* Griseb. y *Prosopis nigra* Hieron.), guayacán (*Caesalpineia paraguariensis* (Parodi) Burkart), palo borracho (*Ceiba speciosa* (A.St.-Hil.) Ravenna), guayaibí (*Patagonula americana* L.), entre otros. En el Gran Chaco se registra un polo de calor importante de América del Sur, con alta insolación y evaporación, que ocasiona déficit hídrico en los meses más cálidos del año. La región Gran Chaco en Argentina está conformada por las provincias de Chaco, Formosa y Santiago del Estero; por el norte de Santa Fe, noroeste de Córdoba, noreste de Salta y Tucumán, sureste de Catamarca y el sureste de La Rioja.

El área de estudio donde se ubica el ensayo se encuentra en el centro de la Provincia del Chaco, zona agropecuaria por excelencia, dentro del Dpto. Comandante Fernández (Figura 1). El mismo posee una superficie de 150.000 hectáreas (ha) aproximadamente y aloja como ciudad principal a Presidencia Roque Sáenz Peña, ubicada a 167 km de la ciudad de Resistencia, capital de la provincia.

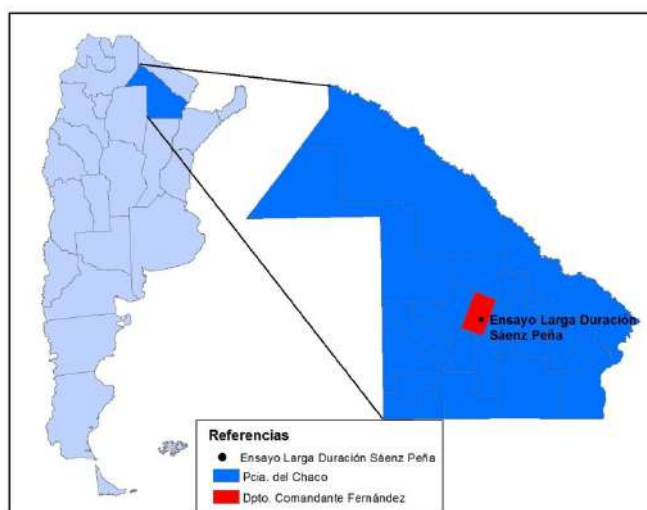


Figura 1. Departamento Comandante Fernández- Provincia del Chaco

Este departamento se encuentra ubicado en el centro del Área Geomorfológica Sáenz Peña, una gran llanura de loess disectada por paleocauces, cuyos ambientes más importantes son las abras o pampas naturales u obtenidas por desmonte, junto a isletas de bosque nativo. Los paleocauces constituyen el sistema de drenaje que está constituido por ríos actualmente muertos, denominados localmente “caños”, con un alto porcentaje de arena. Principalmente en el sector NO, algunos de estos paleocauces pueden funcionar como cauces de agua intermitente en épocas de precipitaciones excesivas y, en general, son utilizados para agricultura.

La Provincia del Chaco posee un gradiente de precipitaciones que la dividen en tres zonas: subhúmeda-húmeda al este, subhúmeda-seca en el centro con veranos lluviosos e inviernos secos y semiárida continental en el oeste, variando de un promedio de 1300 mm anuales al este, a 800 mm anuales al oeste. El clima del Dpto. Comandante Fernández oscila según el año entre subhúmedo y continental seco. El promedio anual de precipitaciones para la serie 1924-2015 es de 983 mm. La temperatura media de la región para el mes más cálido (enero) es de 27°-28°C y la media del mes más frío (julio) es de 14°-15°C, registrándose en verano temperaturas diarias mayores a 40°C y en invierno menores que 0°C, existiendo, por lo tanto, una gran amplitud térmica no sólo anual sino también estacional en los meses de otoño y primavera (Figura 2). La evapotranspiración anual es de 1686 mm según la serie 1968-2014, que genera un déficit hídrico principalmente en los meses más cálidos.

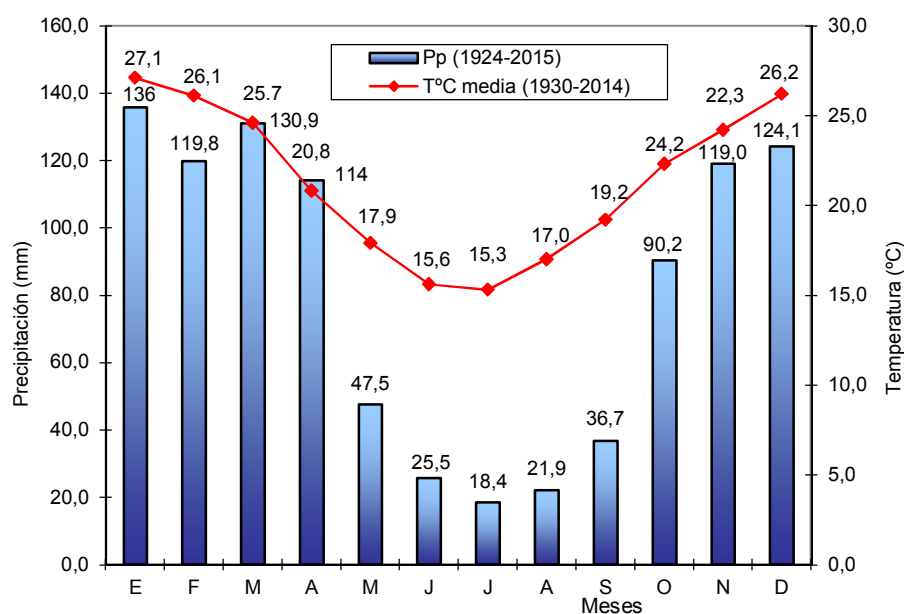


Figura 2. Precipitación y temperatura media mensual del Dpto. Cte. Fernández, Chaco. Datos observatorio meteorológico EEA INTA Sáenz Peña

La cobertura vegetal boscosa o tierras forestales que han sido convertidas a suelos agrícolas, se encuentran ubicadas sobre albardones o lomas medias y bajas. Intercalado con este tipo de relieve se encuentran sectores de menor relieve subnormal y cóncavo con problemas de anegabilidad que generalmente son destinados a la producción ganadera.

Se ha estimado para el Chaco una pérdida de 620.098 ha de cobertura boscosa en el período 2000-2014 (Global Forest Watch, 2016), que fueron principalmente destinadas a agricultura o planteos silvopastoriles en la región más seca de la provincia. De esta superficie, un gran porcentaje corresponde a las capacidades de uso IV y V, es decir suelos marginales para agricultura que requieren prácticas de manejo y conservación intensivas, o no son aptos para la agricultura. En el área del Dpto. Cte. Fernández en los últimos años la agricultura avanzó sobre los suelos de mejor calidad y el monte nativo o pastizales, facilitada por la transitabilidad de los caminos, el clima o el acceso a la tecnología. Este avance fue extendiéndose de forma rápida y en algunos casos, con escaso o ningún control por parte de las autoridades u organismos responsables de dichas decisiones (Goytía, 2014).

Problema a estudiar a partir del cual se instala el ELD

El ensayo de rotaciones en siembra directa (SD) se inició en el año 2003 con la implementación del Proyecto Regional de Siembra Directa de INTA. En ese momento el principal objetivo de instalar un módulo de experimentación era generar información sobre este sistema de labranza en el Chaco que, aunque nuevo en la región, avanzaba a paso rápido; y conocer cómo afectaba al comportamiento de los cultivos y el suelo

Por otra parte, el algodón (*Gossypium hirsutum* L.) es un cultivo representativo de la Provincia del Chaco y durante el siglo XX, gran parte del área sembrada se destinó al monocultivo del algodón bajo el sistema de labranza convencional, es decir, sin considerar secuencias ni rotaciones. La siembra de este cultivo en la provincia representa el 50,2% de la superficie total sembrada en Argentina, es decir 269.350 de 532.280 ha totales (Delssin, 2015), produciéndose el 70% de la fibra de algodón del país. Desde el gobierno local hay un fuerte impulso a la producción, a pesar de que el área aldonera en las últimas décadas decayó en forma notable debido al aumento de la superficie sembrada con el cultivo de soja (SIIA, 2015), precios bajos para el producto textil y el avance del picudo aldonero (*Anthonomus grandis* B.), su plaga principal, que afecta notablemente a la producción económica. Sin embargo, es un cultivo clave en años de sequía por sus características que le permiten alcanzar altos rendimientos en condiciones en que otros cultivos de renta no podrían desarrollar su máximo potencial, ya que es tolerante al estrés hídrico y térmico. En los últimos años, el cultivo atravesó cambios tecnológicos importantes: manejo bajo SD, acortamiento de la distancia entre surcos, cosecha mecánica y adopción de variedades transgénicas resistentes a lepidópteros y glifosato.

Los objetivos del ensayo fueron la generación de información sobre el desempeño de la SD y la cuantificación de las componentes productivas del algodón, en secuencia con otros cultivos bajo SD; además del impacto de las rotaciones de cultivos bajo SD sobre parámetros físicos y químicos de suelo. Sin embargo, debido a los cambios en las perspectivas regionales respecto al algodón y el aumento del área sembrada con otros cultivos como soja y maíz, en 2013 se replantearon las rotaciones y los objetivos.

Suelo presente en el ensayo y rotaciones planteadas

El ensayo se encuentra ubicado en el Campo Experimental de la EEA INTA Sáenz Peña (26° 51' 11.94" S, 60° 25' 27.22" O), sobre tres series de suelo (Ledesma, 1996): Golondrina (*Argiustol údico*), Matanza (*Argiustol údico*) y Paz (*Albacualf vértico*), las tres de textura franco-arcillo-limosa. Ocupa en

total una superficie completa de 3,8 ha. Los suelos de las series Golondrina y Matanza son de origen forestal y pueden presentar problemas de erosión hídrica o salinidad, este último se evidenció desde el 2010 a partir de la presencia de manchones blanquecinos sin crecimiento vegetal, que al inicio del ensayo habían sido tratados con yeso. La serie Paz presenta permeabilidad lenta y drenaje imperfecto como principales limitantes. La serie Matanza presenta un horizonte Bt entre 30 y 50 cm de profundidad, mientras que Golondrina y Paz tienen un horizonte E que se encuentra de 18-23 cm aproximadamente en Golondrina y entre 18-30 cm en Paz.

Las rotaciones iniciales evaluadas entre 2003 y 2007, fueron las siguientes:

- **Rotación 1:** Soja (*Glycine max* L. Merr) / Trigo (*Triticum aestivum* L.) - Algodón (*Gossypium hirsutum* L.) / Barbecho– Algodón (cultivo prueba)
- **Rotación 2:** Algodón/Trigo – Algodón/Trigo – Algodón (cultivo prueba)
- **Rotación 3:** Maíz (*Zea mays* L.) /Barbecho – Soja/Trigo – Algodón (cultivo prueba)

Al finalizar el ciclo de rotación se sembró algodón en todos los tratamientos, como **cultivo prueba** (CP). El CP es aquél que cierra un ciclo de rotaciones y del cual se espera exprese diferencias en desarrollo y rendimientos asociadas al efecto de la rotación. En 2007 se incluyó al girasol (*Heliantus annuus* L.), oleaginosa de importancia en la región, por tanto se plantearon nuevas secuencias y se dividieron las parcelas para tener en el mismo año (calendario) las dos fases de cada secuencia. Las rotaciones propuestas fueron:

- **Rotación 1 (alto aporte de residuos):** Soja – Girasol / Maíz – Algodón (CP)
- **Rotación 2 (bajo aporte de residuos):** Algodón – Trigo / Algodón – Algodón (CP)
- **Rotación 3 (medio aporte de residuos):** Algodón – Trigo / Soja – Algodón (CP)

A partir de 2013 se evidenciaron cambios en el escenario de la producción regional, con la caída de la superficie sembrada de algodón y la introducción de maíz en las rotaciones de la zona con incorporación de un “maíz de punta”, que se realiza en la zona después de un barbecho primavero-estival de 5 o 6 meses, con materiales genéticos más costosos y que es usualmente fertilizado y otro denominado “hijo de híbrido” , que es un material más barato o F1 y que se realiza luego de una secuencia de dos oleaginosas con el objetivo principal de generar cobertura. Estos cambios llevaron luego de una serie de encuestas y entrevistas a extensionistas, técnicos y productores de la zona sobre las secuencias de cultivos predominantes, a replantear el ensayo con 3 nuevas rotaciones

planificadas a 6 años (2013-2019), y donde se aumentó el tamaño de las parcelas, se disminuyó la presencia del algodón y se cambió el cultivo de prueba a maíz. Las rotaciones planteadas durante todo el período se esquematizan en la Tabla 1.

Tabla 1. Ciclos de rotaciones entre 2013-2019.

	2003				2007				2013								2019
ROT 1	SJ	TR	ALG	BAR	ALG	SJ	GIR	MZ	ALG	TR	ALG	MZ	SJ	ALG	SG	GIR	MZ
ROT 2	ALG	TR	ALG	TR	ALG	ALG	TR	ALG	ALG	SJ	GIR	MZ	SJ	MZ	SJ	GIR	MZ
ROT 3	MZ	BAR	SJ	TR	ALG	ALG	TR	SJ	ALG	MZ	SJ	MZ	SJ	SG		GIR	MZ

SJ: soja; TR: trigo; ALG: algodón; GIR: girasol; MZ: maíz; SG: sorgo; BAR: barbecho.

Las secuencias actuales se resumen como de alto, medio y bajo aporte de residuos o rastrojos.

- **Rotación 1 (medio aporte de residuos):** 26 meses de barbecho desde julio/2013 - 4 oleaginosas y 4 gramíneas (proporción 50,0 y 50,0%). Se conservó al algodón sólo en ésta rotación por ser Chaco la provincia que mayor superficie tiene sembrada de éste cultivo en el país, pero por no ser parte actualmente de los planteos agrícolas no se lo incluyó en las otras dos secuencias.

- **Rotación 2 (bajo aporte de residuos):** 19 meses de barbecho desde julio/ 2013 - 5 oleaginosas y 3 gramíneas (proporción 62,5 y 37,5%). En 2013 era la rotación agrícola de mayor riesgo desde el punto de vista de disponibilidad hídrica, pero representativa del centro y oeste del Chaco, donde el productor realiza soja/girasol, luego maíz de menor calidad genética y en otro momento del ciclo busca obtener renta de un maíz de mejor material con más estrategias de manejo como la fertilización.

- **Rotación 3 (alto aporte de residuos):** 28 meses de barbecho desde julio/2013– 3 oleaginosas y 4 gramíneas (proporción 43,0 y 57,0 %). Esta rotación llamada “un cultivo por año” se comenzó a realizar en la región a raíz de que se repitieron años secos con precipitaciones anuales que no llegan a la media histórica.

Los resultados del ELD de Rotaciones en Siembra directa no son del todo concluyentes y reflejan restricciones metodológicas como consecuencia del replanteo de secuencias y especies cultivadas con la intención de acompañar los cambios productivos regionales; y con las características que tiene la comparación de tratamientos de largo plazo entre sí y a través del tiempo. Se presentan valores de

determinaciones de suelo, datos sobre el aporte de materia seca de residuos y porcentaje de cobertura lograda, y rendimientos obtenidos en los diferentes años por cultivo.

Metodología estadística: los datos obtenidos de las mediciones realizadas entre 2003 y 2016 se consideran resultados de corto plazo, principalmente por las variaciones que se fueron dando en relación al tamaño de las parcelas y los cambios en las secuencias. Se utilizó estadística descriptiva y análisis inferencial con enfoque de modelos mixtos, con el programa InfoStat (Di Rienzo, 2017). Las rotaciones, tiempos y profundidades se consideraron efectos fijos, las series de suelo y bloques como efecto aleatorio. Las medias se compararon por medio del test LSD Fisher ($\alpha=0,05$). Se consideraron la serie de suelo y bloque efectos aleatorios. El análisis multivariado se realizó con el programa R 3.0.1 (R, 2011), utilizando el paquete FactoMineR.

Efecto de la SD y las rotaciones sobre el suelo

Densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración e infiltración

La principal modificación de la SD con respecto al suelo en relación al planteo tradicional es la no remoción, que conlleva múltiples cambios en las propiedades del mismo. Se ha informado como efecto de la no remoción mayor estabilidad del sistema poroso e incremento de bioporos, resultando en mayor infiltración y disponibilidad de agua (Gil & Garay, 2001), así como también se ha resaltado la importancia de la condición de degradación inicial en el logro de efectos físicos favorables, como también que las conclusiones de experiencias en el corto plazo corresponden a una etapa inicial llamada SD de transición (Quiroga *et al.*, 1998).

Las primeras determinaciones físicas de suelo en agosto de 2008 (sistema aún no estabilizado, por el corto tiempo de implantación y porque las condiciones meteorológicas no permitieron cumplir con la inclusión del trigo). La densidad aparente (D_a) fue extremadamente alta con promedios de 2,00 y 2,25 g.cm⁻³ para el entresurco y de 1,88 y 2,20 g.cm⁻³ para el surco, a 0-5 y 5-10 cm de profundidad, respectivamente. Se midió en surco y entresurco para evaluar el efecto de la variabilidad espacial en distancias pequeñas y comparar si las diferencias se relacionaban más con las secuencias o con el paso de la maquinaria, conocido como causa de compactación. Estos valores superan los establecidos como máximos para el normal desarrollo de las raíces de los cultivos (Reynolds *et al.*, 2002). Aunque desde la implementación de la SD la siembra, pulverización y cosecha se realizaron en condiciones de humedad óptimas para el tránsito de máquinas, es decir con humedad menor a

capacidad de campo; la compactación podría atribuirse al paso continuo de maquinaria pesada y al alto contenido de limo y arcilla de las series presentes en el ensayo. La resistencia mecánica a la penetración (RMP) presentó valores significativamente menores en el surco respecto al entresurco en todos los tratamientos. La infiltración (Inf), varió entre lenta y moderadamente rápida, sin ser afectada por las rotaciones, y también se diferenció el surco del entresurco, variando entre 6 y 4 cm.h^{-1} en el entresurco, y entre 6 y 10 cm.h^{-1} en el surco. La Da y la Inf fueron mayores bajo algodón continuo o rotación 2 (1.96 contra 1.86 y 1.85 la Da; 6 cm.h^{-1} contra 5.76 y 5.07 cm.h^{-1} de las rotaciones 1 y 3, respectivamente); la RMP no se diferenció entre rotaciones y presentó valores más altos para las 3 rotaciones en la profundidad de 10-20 cm, superando en todas las profundidades el valor de 2 MPa, por encima del cual estaría restringido el crecimiento de las raíces (Da Silva *et al.*, 2016). En 2010 se repitieron las determinaciones físicas, incluyendo químicas y biológicas (Rojas & Guevara, 2012). Las propiedades físicas no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre rotaciones, pero sí valores medios siempre mayores en el entresurco, al igual que los años anteriores (Tabla 2).

Tabla 2. Valores medios de densidad aparente (Da) para las profundidades de 0-10 y 10-20 cm y de infiltración (Inf) determinados en el surco y entresurco en las distintas rotaciones en 2010.

Rotación	Da (g cm^{-3})		Inf (cm.h^{-1})			
	Surco		Entresurco		Surco	Entresurco
	0-10 cm	10-20 cm	0-10 cm	10-20 cm		
1- Alto aporte de residuos: SJ-GIR/MZ-ALG	1,69	1,96	1,74	2	2,65	2,57
2- Bajo aporte de residuos: ALG-TR/ALG-ALG	1,60	1,87	1,73	1,90	3,23	2,12
3- Medio aporte de residuos: ALG-TR/SJ-ALG	1,63	1,97	1,76	1,95	3,63	3,23

En la Figura 3 se representan los valores obtenidos en las mediciones del ciclo de rotaciones que comenzó en el año 2013 y en el 2016. En 2013 se determinó únicamente la Da, por ser el parámetro físico con menor coeficiente de variación (CV: 6,93%). Si se comparan los mismos con los valores obtenidos en 2008, se concluye que aunque la Da disminuyó a valores normales para suelos de textura franco arcillo limosa, hacia 2016 este parámetro aumentó, en todas las profundidades

respecto de 2013, principalmente de 0-5 cm. (Figura 3). La rotación 3 de alto aporte de residuos que incluyó dos veces maíz en la secuencia, presentó menor aumento de Da.

En 2016 se midió Inf y arrojó valores medios de 1,62, 2,71 y 1,79 cm.h⁻¹ en las rotaciones 1, 2 y 3 respectivamente, sin diferencias significativas y con CV de 58%; siendo los valores medios más bajos de todos los registrados en el ensayo. Por lo tanto, no se puede concluir que la SD mejoró la condición física del suelo en el período estudiado.

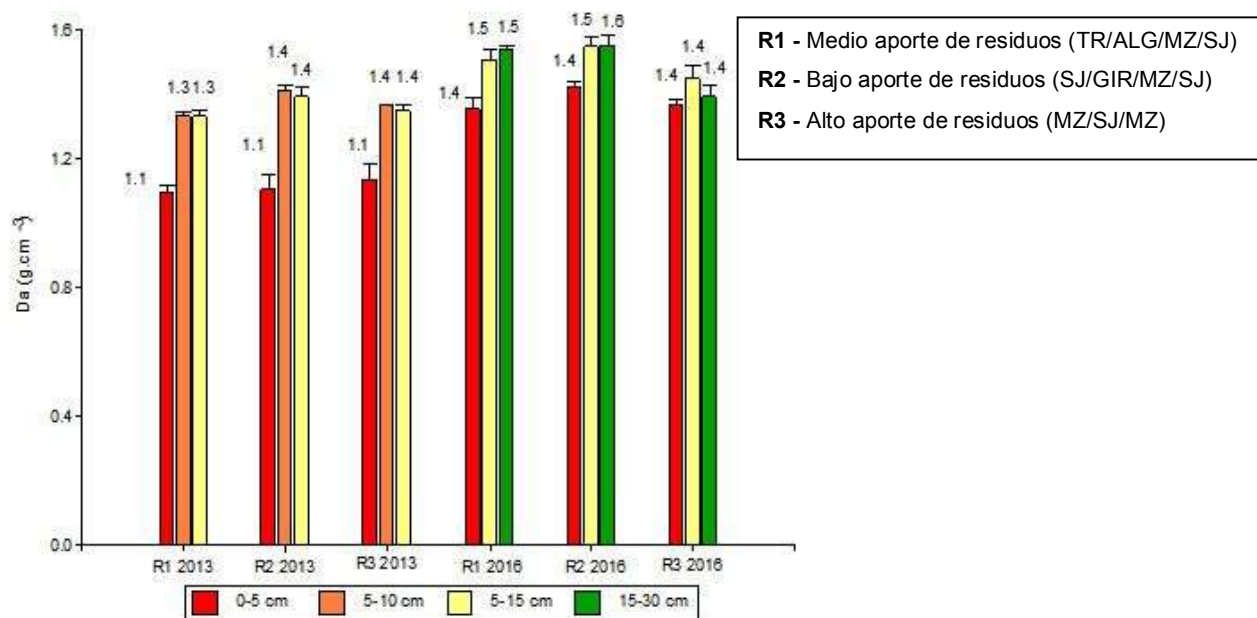


Figura 3. Valores medios de densidad aparente (D_a , g.cm⁻³) por profundidad (0-5, 5-10, 5-15 y 15-30 cm), rotación (R1, R2, R3) y período (2013, 2016).

Parámetros químicos y biológicos del suelo

Además de la modificación de las propiedades físicas que conlleva la SD, los residuos vegetales dejados en superficie afectan también la química y biología del suelo, con diferente intensidad que cuando se incorporan los residuos en el suelo en otros sistemas de labranza, por la menor superficie de contacto, variando la composición bioquímica del rastrojo según el cultivo y afectando esta composición a la tasa de mineralización. Una de las formas en que se puede evaluar la sustentabilidad de un sistema productivo es conocer la capacidad de ese sistema para mantener o mejorar la calidad del suelo, la cual se evalúa por medio de sus propiedades.

En 2010, durante el barbecho invernal, se determinó pH, nitrógeno total (Nt), conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico total (COT) y particulado (COP), carbono de biomasa microbiana (CBM) y nitrógeno de biomasa microbiana (NBM), de 0 a 10 cm (Tabla 3), en las diferentes rotaciones.

Tabla 3. Valores medios de carbono de biomasa microbiana (CBM), nitrógeno de biomasa microbiana (NBM), nitrógeno total (Nt), carbono orgánico total (COT) también expresado como materia orgánica (MO), carbono orgánico particulado (COP), pH y conductividad eléctrica (CE) de 0 a 10 cm evaluados en las rotaciones 1, 2 y 3 en 2010.

Rotación	CBM μg. g ⁻¹	NBM mg. kg ⁻¹	Nt g. kg ⁻¹	COT g. kg ⁻¹	COP g. kg ⁻¹	MO %	pH	CE dS.m ⁻¹
1- Alto aporte de residuos: SJ-GIR/MZ-ALG	67,02 b	8,72 b	1,9 ab	15,75	8,76	2,71	6,57	0,68
2- Bajo aporte de residuos: ALG-TR/ALG-ALG	74,78 ab	12,48 a	2,0 a	15,90	8,55	2,74	6,65	0,81
3- Medio aporte de residuos: ALG-TR/SJ-ALG	98,18 a	10,82 ab	1,6 b	18,09	10,71	3,11	6,46	1,66

LSD Fisher -Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

El efecto de las rotaciones en la calidad del suelo no afectó significativamente a todos los parámetros evaluados (Rojas & Guevara, 2012). Los parámetros biológicos CBM y NBM junto con el Nt demostraron ser los más dinámicos en el corto plazo presentando diferencias entre rotaciones (Tabla 3). La hipótesis principal en esta evaluación fue que la secuencia de cultivos donde predominaba el algodón (rotación 2), podría afectar la calidad del suelo, por el menor aporte de materia seca y composición proveniente de los residuos en comparación con el aporte de las gramíneas, el menor volumen de raíces y la superficie de suelo sin cobertura posterior a la cosecha del algodón (Tabla 6 y Figura 5). Hulugalle *et al.* (2016) compararon las propiedades del suelo bajo algodón en rotación con maíz y algodón continuo, y encontraron que los lotes en rotación tenían menor CE y concentraciones de cationes, y mayor concentración de carbono orgánico (CO) hasta 10 cm como resultado del mayor aporte de carbono a través de la biomasa por encima y por debajo del suelo. No obstante, los resultados mostraron que la rotación con mayor presencia de algodón y menor aporte de residuos no afectó variables asociadas a la calidad de del suelo y contrariamente a lo esperado, presentó mayores valores de Nt y NBM.

Los resultados microbiológicos señalaron la importancia de determinar estas propiedades por su sensibilidad como indicadores, pero la principal limitante a la fecha es la disponibilidad de instrumental para realizarlas.

La Tabla 4 presenta valores de propiedades químicas para el período 2003 - 2016, sin diferenciar entre rotaciones. Las profundidades evaluadas a lo largo de los años no fueron uniformes por lo que no se pudieron analizar los parámetros como mediciones repetidas en el tiempo.

Tabla 4. Variación de valores medios de pH, fósforo (P), conductividad eléctrica (CE) y nitrógeno total (Nt) entre 2003 y 2016 sin diferenciar las rotaciones.

Año Profundidad (cm)	2003		2010	2012		2013		2014		2015		2016	
	0-5	5-15	0-10	0-10	10-20	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-15
pH	6,25	6,55	6,56	6,76	7,03	6,75	7,03	6,64	7,03	7,02	7,31	6,97	7,45
P (mg.kg ⁻¹)	60	67	s/d	141	120	138	128	104	101	114	106	124	114
CE (dS.m ⁻¹)	1,18	0,44	1,05	0,19	0,19	0,18	0,15	0,17	0,12	0,10	0,08	0,06	0,06
N (g.kg ⁻¹)	1,5	1,3	1,9	1,1	0,9	1,3	1,1	1,3	1,0	1,8	1,6	1,7	1,4

Durante el período considerado, el pH presentó un aumento gradual, siendo en todos los años los valores más altos a mayor profundidad. La CE presentó valores bajos y disminución gradual, pero los problemas de manchones salinos se agravaron principalmente en años menos lluviosos. No se puede generar cobertura en los mismos por la ausencia de germinación.

El P disminuyó significativamente entre 2012 y 2016, principalmente en la profundidad mayor a 5 cm, que según el año hasta 15 o 20 cm. Aunque estos suelos están altamente provistos de P, es importante monitorearlo, ya que la incorporación de maíz y soja en la rotación haría disminuir este elemento en el corto plazo y podría provocar pérdidas considerables en el mediano y largo plazo, dado que desde el comienzo del ensayo los cultivos nunca fueron fertilizados con P. El Nt varió de pobre a moderadamente y bien provisto de nitrógeno (N), aumentando en promedio de 1,1 g.kg⁻¹ en 2003 a 1,7 g.kg⁻¹ en 2016.

Evaluación integrada con análisis multivariado al final del ciclo 2007-2013

Al finalizar el 2013, luego de la cosecha del algodón como cultivo de prueba se realizó un análisis multivariado con el objetivo de analizar en forma integrada el efecto de las rotaciones sobre la calidad del suelo y si los rendimientos del algodón podrían asociarse a uno o más parámetros de calidad del suelo (Rojas *et al.*, 2015). Los parámetros que diferenciaron las rotaciones fueron el contenido de P, la CE y el COP. La rotación 1 con mayor cobertura, gramíneas y cultivos por año, presentó menores valores de CE y P en superficie, y mayor contenido de COP en la capa de 10 a 20 cm. El mayor aporte de residuos y biomasa de raíces de esta rotación habría influido sobre el COP y la CE, ya que mayor volumen de residuos contribuye a una menor evaporación del agua del suelo, lo cual restringe el ascenso capilar de sales; la mayor presencia de raíces favorece la apertura de canales para la percolación de la solución del suelo. Respecto al P evaluado hasta 20 cm de profundidad, cultivos altamente extractivos como maíz y soja habrían sido la causa de los menores niveles dado que no se fertilizó con P y además exportan más P en el grano. Los rendimientos del algodón como cultivo de prueba no se correlacionaron significativamente con un parámetro de suelo en particular, pero se mostraron más asociados al COT y al COP en forma positiva y en forma negativa a la Da a 0-10 cm.

Efecto de las rotaciones y la SD en el CO del suelo

En todas las rotaciones y años analizados en el ELD, el CO fue mayor en la capa superficial y disminuyó con la profundidad, confirmando el efecto causado por la SD (Tabla 5). Existen relaciones directas entre la cantidad de residuo vegetal aportado anualmente al suelo y el cambio en el nivel de materia orgánica edáfica. Se han informado aumentos de CO en SD y en rotación de cultivos, debido a que la SD estimula la acumulación de residuos y de CO dentro de los agregados del suelo, las gramíneas en rotación aportan residuos con mayor relación carbono nitrógeno (C: N), más perdurables; y las oleaginosas residuos con mayor contenido de lignina que se descomponen rápidamente y contribuyen positivamente al balance de MO (Aziz *et al.*, 2013; Nascente *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2010; Andriulo & Cordone, 1998). Varios autores han hecho referencia a la existencia de la estratificación o acumulación superficial del CO bajo SD; un fenómeno que en sistemas agrícolas se origina en el aporte de residuos, el menor disturbio y la acumulación de raíces superficiales (López-Fando & Pardo, 2011; Hernanz *et al.*, 2009).

Tabla 5. Variación del carbono orgánico total (COT) por profundidades entre 2003 y 2016.

Año	Profundidad (cm)	COT (g.kg ⁻¹)
2003	5	25,7
	15	15,4
	30	7,5
2010	10	16,6
2012	10	12,7
	20	10,3
2013	5	18,2
	10	14,4
	15	12,8
2014	5	14,7
	10	11,1
	20	9,8
	30	7,2
2015	5	18,7
	10	14,3
	20	12,4
	30	9,1
2016	5	13,4
	15	10,2
	30	7,7

Entre 2003 y 2016, el COT disminuyó, en diferente grado según la profundidad, pero la disminución no fue lineal ya que presentó oscilaciones, aumentando en superficie en 2013 y 2015, sugiriendo que hay una dinámica del CO en el ensayo que puede ser más dependiente del manejo y el año climático.

Se analizó el stock de COT en Tn.ha⁻¹ para 2013 (por ser el inicio de un nuevo ciclo de rotaciones) y 2016, tomando como base la masa equivalente de 1840 Tn.ha⁻¹, la menor masa calculada para el período, hasta la profundidad de 15 cm. Al comparar el stock, se pasó de 12,99 Tn.ha⁻¹ en 2013 a 17,24 Tn.ha⁻¹ en 2016 (Figura 4), pese al aumento de la masa del suelo. Es importante la información que brinda el cálculo de stock, dado que la concentración media de COT en este período disminuyó, pero por otro lado la Da aumentó presentando interacción con las profundidades, lo cual enmascara la acumulación de carbono si se analizan las variables por separado o si se observa sólo la concentración de COT.

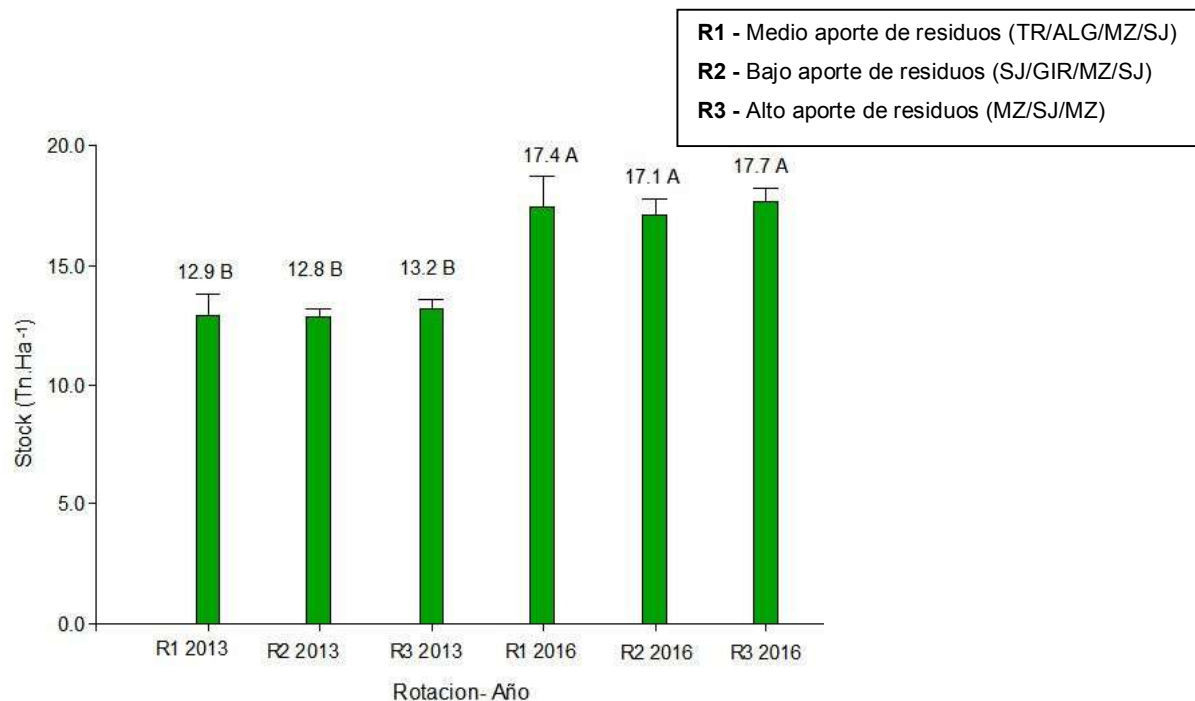


Figura 4. Stock de carbono orgánico total (COT) en los primeros 15 cm de suelo calculados para una masa de suelo equivalente a 1840 Tn.ha⁻¹.

Evaluación del carbono orgánico total (COT) y particulado (COP) entre rotaciones

Al finalizar el ciclo 2007-2013 se estudiaron los contenidos de COT y COP entre rotaciones (Roldán *et al.*, 2013), con la hipótesis que las rotaciones con mayor frecuencia de gramíneas aumentarían el COT del suelo, y que las transformaciones de CO en respuesta al manejo son detectables en el corto plazo en fracciones del CO más lábiles como el COP, fracción mayor a 53 μ m, considerada gruesa, liviana y proveniente de los residuos orgánicos recientes. Se evaluaron las secuencias tomándose muestras compuestas de 0-10 y 10-20 cm, previo a la implantación del cultivo de prueba (algodón) en noviembre de 2012, y se midió biomasa de rastrojos (materia seca de los residuos aéreos a la cosecha del último cultivo de la rotación). La rotación 1, que incluyó maíz, soja y girasol en la rotación presentó los mayores valores medios de COT a 0-10 cm y valores medios de COP significativamente mayores en superficie (4,60 g.kg⁻¹). En la profundidad de 10–20 cm, el contenido de COP bajo la rotación 1 fue mayor pero las diferencias no fueron estadísticamente significativas. La biomasa aportada fue significativamente mayor en la rotación 1, que incluyó maíz y girasol (Tabla 6). Los rendimientos del algodón cosechado en 2013 no mostraron diferencias entre rotaciones.

Tabla 6. Valores medios de carbono orgánico total (COT) y carbono orgánico particulado (COP) para cada rotación de 0-10 y 10-20 cm y materia seca de los residuos por ha. 2013

Rotación	COT (g. kg ⁻¹)		COP (g. kg ⁻¹)		Rastrojos acumulados (kg materia seca.ha ⁻¹)
	0-10	10-20 cm	0-10	10-20 cm	
1- Alto aporte de residuos: SJ-GIR-MZ-ALG-SJ-MZ-ALG	13,0 a	10,1 d	4,6 a	2,6 c	4655 a
2- Bajo aporte de residuos: ALG-TR/ALG-ALG-ALG-ALG	12,2 b	10,7 c	3,3 b	2,4 c	3340 b
3- Medio aporte de residuos: ALG-TR-SJ-ALG-ALG-SJ	12,7 a	10,0 d	3,6 b	1,8 d	3175 b

LSD Fisher -Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

La secuencia que presentó menor COP fue la de algodón continuo, cuyo rastrojo tiene una relación C:N alta (109:1), lo cual hace que su descomposición sea más lenta contrario al de soja que tiene baja relación C:N (48:1). Andriulo & Cordone (1998) informaron sobre las diferencias en la mineralización del tipo de rastrojo según la relación C:N, regulada por la composición del mismo, siendo el de más rápido aporte al C del suelo los residuos que poseen menor relación C:N y porcentaje de lignina en su composición, principalmente los de soja y girasol.

Rastrojo y % de cobertura logrados por la SD en el centro de Chaco

Algunos investigadores han puesto en evidencia la importancia de la cobertura, el principal aporte de MO y protección física (Derpsch *et al.*, 2014). Para que la SD se considere implementada adecuadamente, la cobertura no debería ser menor del 60% (Marelli, 1998). En la Tabla 7 se presentan los valores disponibles de % de cobertura a la siembra y cosecha según cultivo y cultivo previo o antecesor, ya que los residuos del cultivo previo permanecen según su composición hasta la siembra y a veces hasta la cosecha del cultivo siguiente. Aunque en varios casos la cobertura superó el 90%, en algunas campañas también cayó hasta un mínimo de 7% porcentaje insuficiente en un sistema óptimo de labranza conservacionista. La máxima cobertura a la siembra fue en soja sobre maíz (91,5%), a cosecha correspondió a trigo sobre algodón (86,2%). La menor cobertura se midió a la siembra de maíz sobre girasol (9,7%) y a la cosecha de algodón sobre algodón (12,1%).

Tabla 7. Porcentaje (%) de cobertura media, máxima y mínima a la siembra y cosecha de los cultivos-Período 2009-2015.

Campaña	Cultivo	Momento	Cultivo previo o antecesor	Cobertura media (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
2009/10	algodón	siembra	algodón	56.9	34	79
			maíz	70.7	59	79
			soja	61.1	40	83
		cosecha	algodón	20.50	19	23
	trigo	cosecha	algodón	86.25	79	92
2010/11	girasol	siembra	soja	89	86	92
	maíz	siembra	girasol	45.5	44	47
	soja	siembra	trigo	66.88	44	84
		cosecha	trigo	53.25	27	62
2011/12	algodón	siembra	algodón	51.75	23	81
			soja	50.75	38	58
	maíz	siembra	girasol	9.75	7	14
	soja	siembra	maíz	61.25	53	68
			trigo	63	60	66
	trigo	siembra	algodón	29.88	24	37
2012/13	algodón	siembra	algodón	37.9	16	55
			maíz	40	32	48
			soja	51.5	35	66
		cosecha	algodón	12.1	7	18
			maíz	20	16	28
			soja	17.4	12	32
2014/15	girasol	siembra	soja	30.25	23	36
	maíz	siembra	girasol	37.25	29	52
	soja	siembra	maíz	91.50	90	94

Respecto al aporte de residuos (Figura5), los mayores valores del período correspondieron a algodón sobre maíz, cosechado en 2013 (5,8 Tn/ha), seguido del maíz sobre girasol en 2011 (4,9 Tn/ha), soja sobre maíz en 2012 (4,8 Tn/ha) y maíz sobre girasol en 2015 (4,1 Tn/ha).

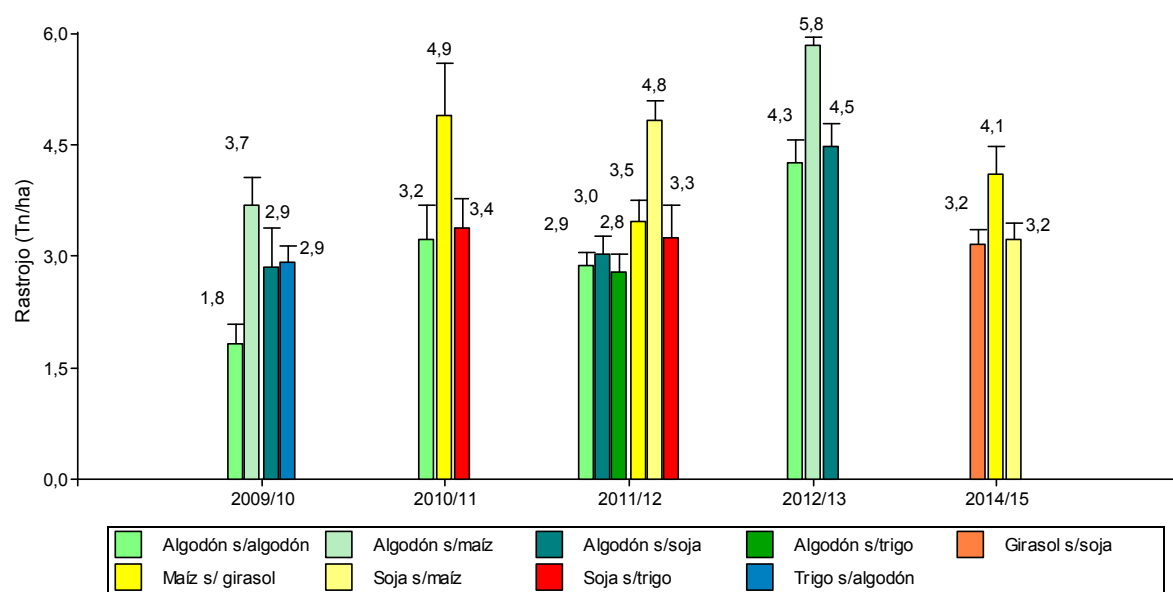


Figura 5. Rastrojo ($\text{Tn} \cdot \text{ha}^{-1}$) a cosecha de los cultivos presentes en el ensayo entre 2009 y 2015.

Rendimientos logrados en SD para los principales cultivos de la región

Los rendimientos del algodón como cultivo de prueba al final de cada ciclo de rotaciones y en 2010 (mediados del período 2007-2013), sugieren que la mayor variabilidad no se debió a un efecto de las rotaciones (Figura 6), y si, probablemente al desarrollo de variedades ya que las últimas variedades comerciales son parte de programas de mejoramiento que están orientados en gran parte a aumentar y estabilizar los rendimientos en la producción de algodón (Tcach, 2014). No se halló relación entre rendimientos y las precipitaciones del año o del año anterior. En la Figura 6 la línea de corte horizontal indica el rinde promedio ($2000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de cada cultivo en la región, informado para el período 2011-2016. Puede observarse que durante el 2013 el cultivo superó ampliamente este valor lográndose el mayor rendimiento desde el inicio del ensayo. En dicho año, aunque los rindes no mostraron diferencias significativas entre rotaciones, el mayor valor se obtuvo en el tratamiento de algodón continuo.

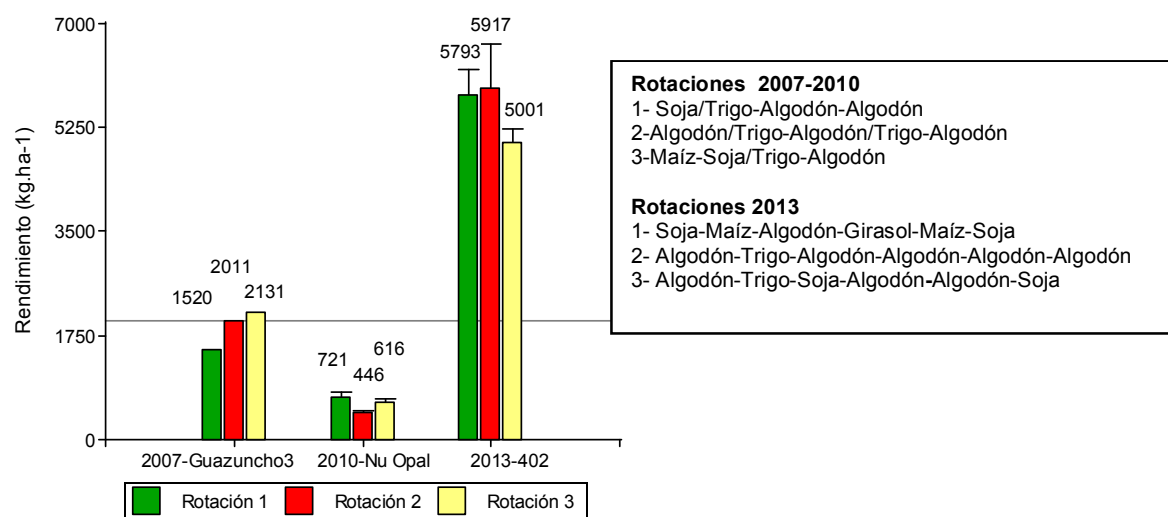


Figura 6. Rendimientos de algodón en bruto en los años 2007, 2010 y 2013 diferenciando la variedad y las rotaciones. La línea de corte horizontal indica el rinde promedio ($2000 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) del cultivo en la región para el período 2011-2016.

Respecto a los demás cultivos presentes en las rotaciones, se informan los rendimientos a partir del año 2010 (Figura7).

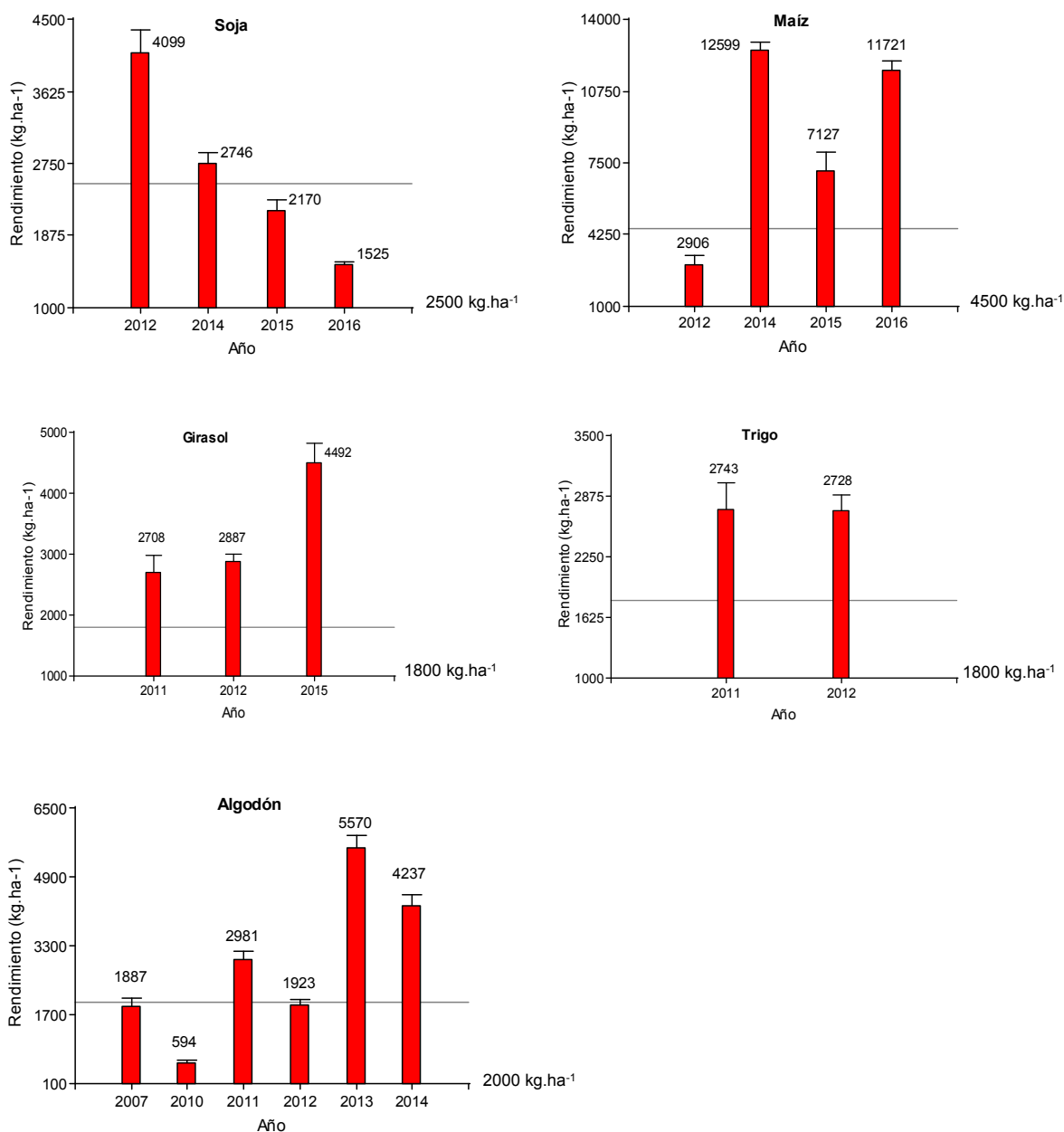


Figura 7. Rendimiento anual de los cultivos principales (2010-2016). Las líneas de corte horizontal indican los rendimientos promedio para la zona para el período 2011-2016

Síntesis general de los resultados

- La SD no mejoró la condición física del suelo en el período estudiado, un período corto de tiempo para un ELD donde se evaluaron niveles bajo, medio y alto de aporte de residuos. De todos modos, la secuencia con mayor aporte presentó menor aumento de la Da.

- Aunque los suelos de la región se encuentran bien provistos de P, la falta de reposición de este elemento en la rotación pueden disminuir el nivel del mismo en el suelo en el corto y mediano plazo.
- La concentración media de COT disminuyó, pero el aumento de la Da provocó un aumento en el stock de COT en los 15 cm de profundidad.
- El algodón continuo en rotación con trigo, una secuencia de bajo aporte de residuos, no afectó negativamente a las propiedades químicas del suelo en el período 2003-2013.
- Las rotaciones que incluyeron maíz presentaron mayor % de cobertura y biomasa de residuos, así como mayores valores de COP.

Recomendaciones

Dados los resultados de las rotaciones evaluadas en SD para suelos de textura franco- arcillo- limosa típicos del centro chaqueño, y los cultivos principales de la región: algodón, soja, girasol, y maíz; se recomienda principalmente incluir maíz en la rotación u otra gramínea de alto volumen de residuos, reponer nutrientes como el P en rotaciones que incluyan alto % de oleaginosas en la secuencia y reducir todo lo posible el paso de la maquinaria, principalmente en condiciones de mayor humedad, ya la densificación reduce como consecuencia la infiltración afectando con esto diversos procesos del suelo que afectan la sustentabilidad de la producción.

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a la memoria de Ramón Ledesma, un compañero que durante años trabajó con su mejor voluntad y dedicación en el ensayo. Además agradecemos especialmente a Alberto Canteros, Daniel Renaud, José Gomez y Yanina Goytía por su colaboración y trabajo permanente en relación al ELD, y a todos los tractoristas y auxiliares de campo.

Bibliografía

Aziz I, Mahmood T & K Rafiq Islam. 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. Soil Till Res. 131: 28-35

- Andriulo, A & G Cordone. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de suelos de la Región Pampeana Húmeda. En: Panigatti, JL; Marelli, H; Buschiazzi, D & R Gil (Eds). Siembra Directa. Editorial Hemisferio Sur. INTA.
- Da Silva, WM; Bianchi, A & Da Cunha, C. 2016. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering. 36: 449-459. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n3p 449-459/2016>
- Delssin, E. 2015. Pronóstico de estabilidad en la producción mundial de algodón. URL: <http://inta.gob.ar/documentos/pronostico-de-estabilidad-en-la-produccion-mundial-de-algodon>. Último acceso: 30 de junio de 2017
- Derpsch, R, AJ Franzluebbers, SW Duiker, DC Reicosky, K Koeller, T Friedrich, WG Sturny, JCM Sá & Weiss, K, Why do we need to standardize no tillage research? 2014. Letter to the Editor. Soil Till. Res. 137:16-22
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2017. InfoStat versión 2017p. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL: <http://www.infostat.com.ar> . Último acceso: 5 de julio de 2017.
- Global Forest Watch. 2016. URL: <http://www.globalforestwatch.org> . Último acceso: 30 de junio de 2017.
- Gil RC & A Garay. 2001. La siembra directa y el funcionamiento sustentable del suelo. En: Panigatti, JL; Buschiazzi, D & H Marelli (Eds). Siembra Directa II. Ediciones INTA.
- Goytía, SY. 2014. Análisis de los factores que inciden en el cambio del uso del suelo en el Departamento Comandante Fernández - Provincia del Chaco. Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires [Azul, Argentina].
- Hernanz, JL; Sánchez-Girón V & L Navarrete. 2009. Soil carbon sequestration and stratification in a cereal/leguminous crop rotation with three tillage systems in semiarid conditions. Agr Ecosyst Environ 133: 114-122
- Huang Sh, Sun YN, Rui WY, Liu WR & WJ Zhang. 2010. Long-Term Effect of No-Tillage on Soil Organic Carbon Fractions in a Continuous Maize Cropping System of Northeast China. Pedosphere 20 (3): 285-292
- Hulugalle NR; McCorkell B; Heimoana VF & LA Finlay. 2016. Soil Properties Under Cotton-Corn Rotations in Australian Cotton Farms. The Journal of Cotton Science 20: 294-298
- Ledesma, L.L. 1996. Carta de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria de Presidencia Roque Sáenz Peña (Chaco). EEA INTA Sáenz Peña. Chaco, Argentina
- López-Fando C & MT Pardo. 2011. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. Soil Till Res. 111:224-230
- Marelli, HJ. 1998. La siembra directa como práctica conservacionista. En: Panigatti, JL; Marelli, H; Buschiazzi, D & R Gil (Eds). Siembra Directa. Editorial Hemisferio Sur. INTA.
- Nascente AS, Yuncong CL & CA Costa Crusciol. 2013. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. Soil Till Res. 130: 52-57

-
- Quiroga, A; Ormeño O & N Peinemann. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos. En: Panigatti, JL; Marelli, H; Buschiazzi, D & R Gil (eds). Siembra Directa. Editorial Hemisferio Sur. INTA.
- R Development Core Team. 2011. "R: a language and environment for statistical computing". R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.r-project.org/>. Último acceso: 30 de junio de 2017.
- Reynolds, WD; Bowman, BT; Drury, CF.; Tan, CS. & X Lu. 2002. Indicators of good soil quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110:131-146
- Rojas, JM.; Roldán, MF & GS Guevara. 2015. Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del Chaco y su relación con la producción de algodón. *Ci. Suelo* 33 (2), 239-246.
- Rojas, JM & GS Guevara. 2012. Efecto de rotaciones con algodón como cultivo principal en propiedades del suelo. XIX Congreso Latinoamericano y XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata -16 al 20 de abril de 2012.
- Roldán, MF; Rojas JM & GS Guevara. 2013. Efecto de rotaciones de cultivos bajo siembra directa sobre el carbono orgánico particulado de un Argiustol en el Chaco subhúmedo. *Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos*. Julio 2013. Buenos Aires-Argentina.
- Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA). 2015. URL: <http://www.siaa.gov.ar> . Último acceso: 30 de junio de 2017.
- Tcach, MA. 2014. Estabilizar rendimientos en la producción de algodón. URL: <http://inta.gob.ar/documentos/estabilizar-rendimientos-en-la-produccion-del-algodon>. Último acceso: 30 de junio de 2017.

Agricultura intensificada en siembra directa y convencional en el Norte de Santa Fe

Luciano Mieres

INTA EEA Reconquista

Descripción regional

El Domo Oriental es un sector de la llanura chaco-pampeana en el norte de la Provincia de Santa Fe, que presenta suelos agrícolas y ganaderos. Esta planicie de orientación norte-sur entre el Río Paraná y la Cuña Boscosa, es atravesada por más de diez arroyos de noreste a sureste, conformando estrechas y largas cuencas (Figura 1). El relieve es plano-cóncavo en cercanía de arroyos y puede presentar susceptibilidad de erosión hídrica moderada y alta. En partes elevadas entre arroyos se presentan relieve plano y la aptitud de los suelos para agricultura es buena, aunque el drenaje interno es moderado e imperfecto. Esto se debe a la conformación limosa de los minerales de 0 a 30 cm de profundidad con presencia de arena muy fina, mientras que limos finos muy arcillosos se presentan en los 70 cm subsiguientes (Iriondo, 2012). La potencialidad productiva de la zona se encuentra sostenida por el clima subtropical, con régimen de precipitaciones abundantes (1250 mm año⁻¹) y temperaturas medias anuales (20,1°C) acordes para realizar diversos cultivos agrícolas. Por otra parte, la productividad se encuentra condicionada por la gran variabilidad en las precipitaciones (Mieres y Marano, 2011) y la calidad química superficial de los suelos, los que han perdido al menos un tercio del contenido de materia orgánica (De Orellana y Pilatti, 1994; Vivas y Sosa, 1998) como consecuencia del uso de labranzas y siembras convencionales (SC).



Figura 1- Imagen satelital del Sector Norte de Santa Fe donde se ubica el Domo Oriental y la Estación Experimental Agropecuaria Reconquista.

La superficie con agricultura en suelos de baja aptitud es importante y se ha incrementado en la cuña boscosa y sectores próximos a los arroyos. Estudios realizados en estas áreas luego de incorporadas a agricultura, indican rápidos detrimentos de la calidad fisicoquímica de los suelos (Heredia et al. 2006; Vidal y Aparicio, 2008). Relevamientos regionales de contenidos de materia orgánica realizados en la última década indican para los 20 cm superiores contenidos de 1,74 % en lotes con algodón (Paiz, 2009) y 1,95% en lotes con soja (Bianchi, 2016). Otros estudios destacan que los suelos presentan gran variación en las propiedades físico-químicas en cortas distancias y que el manejo por ambientes podrían mejorar los planteos productivos (Gambaudo et al, 2011).

La erosión hídrica abarca más de 100 mil hectáreas en los departamentos Vera, General Obligado y San Javier (Bonel et al, 2015), mientras que la sistematización con terrazas y curvas de nivel ocupa una superficie de 23 mil hectáreas. Planes de conservación hace más de 30 años originaron lo diseñado. Para atender en parte este problema y la pérdida de calidad físico-química en los suelos en SC, se introdujo la siembra directa (SD) y se adaptó el manejo de cultivos de soja, girasol, maíz, trigo, sorgo y algodón (variedades, fecha de siembra, fertilización y Manejo de plagas). La SD superó el 90 % de adopción hacia el 2013 en dichos cultivos. De forma reciente, más del 25% de la superficie en

SD fue discontinuada acudiendo a la eficacia de la labranza para suprimir malezas tolerantes y resistentes a herbicidas. También ante necesidad de regenerar camas de siembra dañadas con el tránsito agrícola y situaciones de suelos compactados. En esos casos los eventos erosivos son evidentes ante precipitaciones abundantes, con pérdida de partículas finas, coloides y cobertura de rastros.

El almacenaje de agua de los suelos Argiudoles acuérticos y Argialboles vérticos predominantes es importante. Sin embargo, la alta variabilidad en las precipitaciones de diciembre a febrero (65%CV; Mieres y Marano, 2011) determina que la probabilidad de ocurrencia de estrés hídrico en los cultivos sea alta, ya que el agua almacenada en el suelo no logran suplir las altas demandas atmosféricas (ETP media mensual superior a 5,5 mm día⁻¹). También se dan temperaturas elevadas (más de 30 °C de máxima media mensual) por lo cual se debe evitar que los periodos críticos de los cultivos se desarrollen en estos meses.

Para mejorar la cobertura-rugosidad del suelo y generar rotación de cultivos se logró difundir secuencias intensivas e incluir gramíneas en el esquema productivo agrícola, realizando girasol-maíz de segunda y trigo-soja de segunda en siembra directa (SD). Esto motivó la realización de ensayos comparativos en SD y SC de largo plazo en la EEA Reconquista. La intensificación de secuencias agrícolas se adoptó gradualmente en el norte de Santa Fe, junto con el uso de fertilizantes que complementan la disponibilidad de nitrógeno y fósforo del suelo. Actualmente las reposiciones de ambos nutrientes siguen siendo sub-óptimas y los balances nutrimentales negativos, sin embargo los cultivos de maíz y trigo se consolidaron en los esquemas agrícolas regionales como complemento para lograr manejos sustentables.

Problemática de estudio

Falta de adopción de rotaciones de cultivos y manejos intensivos que propendan a disminuir el riesgo de la actividad y reviertan el estado de degradación de suelos en agricultura continúa.

Características del ELD

Se inició en 2006 con el emplazamiento de macro parcelas de 750 m² en bloques completos al azar con tres repeticiones (Figura 2). En las mismas se cultivan secuencias anuales (Girasol-Maíz, Soja,

Trigo-Soja) que siguen un orden de rotación. Esto permite estudiar cada cultivo todos los años, considerando la productividad, como también las propiedades fisicoquímicas del suelo. Se comparan dos tratamientos:

Siembra Directa (SD): Barbechos químicos con herbicidas totales y selectivos previos a la siembra de cada cultivo. En post-emergencia las malezas se controlaron con herbicidas selectivos. La fertilización de soja se realizó con 120 kg ha^{-1} de superfosfato triple, en bandas debajo de línea de siembra. Girasol, Maíz y Trigo fueron suplementados de igual manera, pero con 120 kg ha^{-1} de fosfato di amónico a la siembra y 50 kg ha^{-1} de sulfato de calcio. En post emergencia se aplicaron 70 kg de Urea en cultivos no leguminosos.

Siembra Convencional (SC): Previo a la siembra de cada cultivo se laboreó el suelo con arado de discos, rastra de discos y cultivador de campo. Posterior a la emergencia se realizó manejo con herbicidas selectivos, de manera similar que en SD. El manejo de la fertilización fue equivalente al realizado en SD.

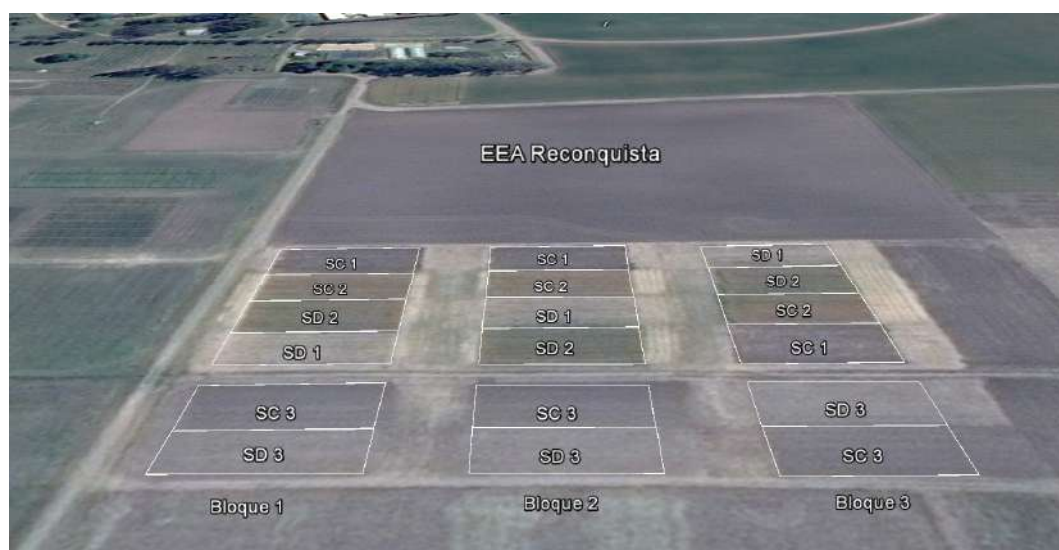


Figura 2: Imagen satelital de Ensayo de Larga Duración en Campo Experimental de EEA Reconquista. Tratamientos Siembra directa (SD) y convencional (SC) con sus diferentes fases de la rotación Girasol-Maíz Segunda (1); Soja Primera (2); Trigo-Soja Segunda (3).

Los rendimientos fueron relevados mediante la recolección manual de cuatro submuestras de 6 m^2 por parcela, que fueron trillados con cosechadora experimental. Los rendimientos fueron corregidos por humedad de mediante estándares de merma por secado de cada cultivo.

El rendimiento de cada cultivo se analizó comparando entre tratamientos en cada campaña y la productividad media por cultivo para el período 2006-2015, para lo cual se realizó análisis de

varianza y test de comparación de medias LSD (Fisher, $\alpha=0,05$) utilizando Infosat (Di Rienzo et al., 2008).

Las evaluaciones realizadas en el suelo invierno de 2013 consideraron dos capas (0 a 10 y 10 a 20 cm), donde se cuantificó el carbono orgánico total, carbono orgánico particulado, nitrógeno total, estabilidad de agregados y pH. También en dichas capas se realizó la determinación de densidad aparente y se evaluó la distribución de poros según su tamaño (Tabla 1). Se realizó análisis de varianza y test de comparación de medias LSD (Fisher, $\alpha=0,05$)

Resultados

Productividad de cultivos

En el periodo 2006-2016 el rendimiento medio de los cultivos de soja de primera, trigo y girasol, fue similar entre tratamientos SD y SC. Soja de primera produjo 2372 y 2306 kg granos $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en SD y SC respectivamente, mientras que trigo 3234 y 2919 kg $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en ambos tratamientos. Girasol rindió de forma media 2157 y 2062 kg $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en SD y SC. En los tres cultivos los rendimientos comenzaron a presentar diferencias significativas anuales entre tratamientos luego del quinto año de evaluaciones, donde SD presentó superioridad respecto a SC en la mayoría de los años (Figura 3).

A diferencia de los cultivos soja de primera, trigo y girasol, el cultivo de soja de segunda presentó productividad total media mayor en SD respecto a SC durante el periodo 2006-2017 evaluado, siendo 2251 y 1910 kg ha^{-1} respectivamente. Solo las dos primeras campañas los rendimientos fueron similares entre tratamientos y en las subsiguientes la productividad en SD fue mayor que la de SC.

De forma similar a soja de segunda, maíz de segunda presentó productividad media mayor en SD en comparación con SC, siendo de 5955 y 5191 kg ha^{-1} respectivamente. Maíz de segunda a partir del quinto año presentó rendimientos mayores en SD todos los años (Figura 3).

Las precipitaciones en el periodo evaluado variaron más en verano-otoño que en invierno-primavera (Figura 3). Esta característica del ambiente subtropical imperante determinó la pérdida de cultivos soja, trigo y maíz por estrés hídrico en 2008-09 y de soja por exceso hídrico en 2014-15. La distribución de precipitaciones verano-otoño se relacionaron de manera importante con los rendimientos de maíz de segunda, mientras que el rendimiento de los demás cultivos presentó menos asociación con las variaciones de las precipitaciones. En el cultivo de soja, factores como las

condiciones de temperatura, radiación y disponibilidad del agua de suelo son determinantes de la productividad (Zuil, 2011).

Estudios de consumo de agua del cultivo de soja de primera y de segunda, realizados a 5 años de inicio del ensayo de larga duración (Mieres y Zuil, 2011), comprobaron que en ambos cultivos la eficiencia de uso de agua (EUA) para generar granos fue mayor en SD respecto a SC. Soja de primera presentó valores de EUA de 3,8 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ en SD, mientras que en SC alcanzó 3,4 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹. La EUA de soja de segunda fue de 4,1 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ en SD, 31% mayor que en SC. La disposición de rastrojos en superficie que se da en SD, condicionó la evaporación directa y la temperatura del suelo, generando mejores condiciones hídricas para que el cultivo de soja utilice el agua eficientemente. Evaluaciones realizadas en cultivos de trigo y girasol durante la campaña 2011-12, indicaron similitudes en la EUA entre tratamientos de SD y SC. Esta fue 7,1 y 6,3 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ en trigo y 7,2 y 7,4 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ en girasol para SC y SD respectivamente.

La realización de este tipo de rotación intensiva en SD, con promedio de 1,6 cultivos año⁻¹, permitió alcanzar niveles productivos aceptables. Luego de un periodo de transición la productividad demostró ser mayor en SD, que en SC, donde se ven favorecidos en mayor medida los cultivos segunda como maíz y soja de segunda. Sin embargo, la productividad alcanzada en SC también fue aceptable en el contexto regional. En ambos tipos de manejo, la demanda de nutrientes será mayor, si se intensifica el esquema, por lo que realizar complementos nutricionales acordes será importante. Esta rotación realizada en SC podría ser válida cuando se busca suprimir el uso de herbicidas, como sucede en planteos agroecológicos y sistemas agrícolas periurbanos. También en estrategias que busquen incorporar abonos orgánicos en el suelo con labranzas.

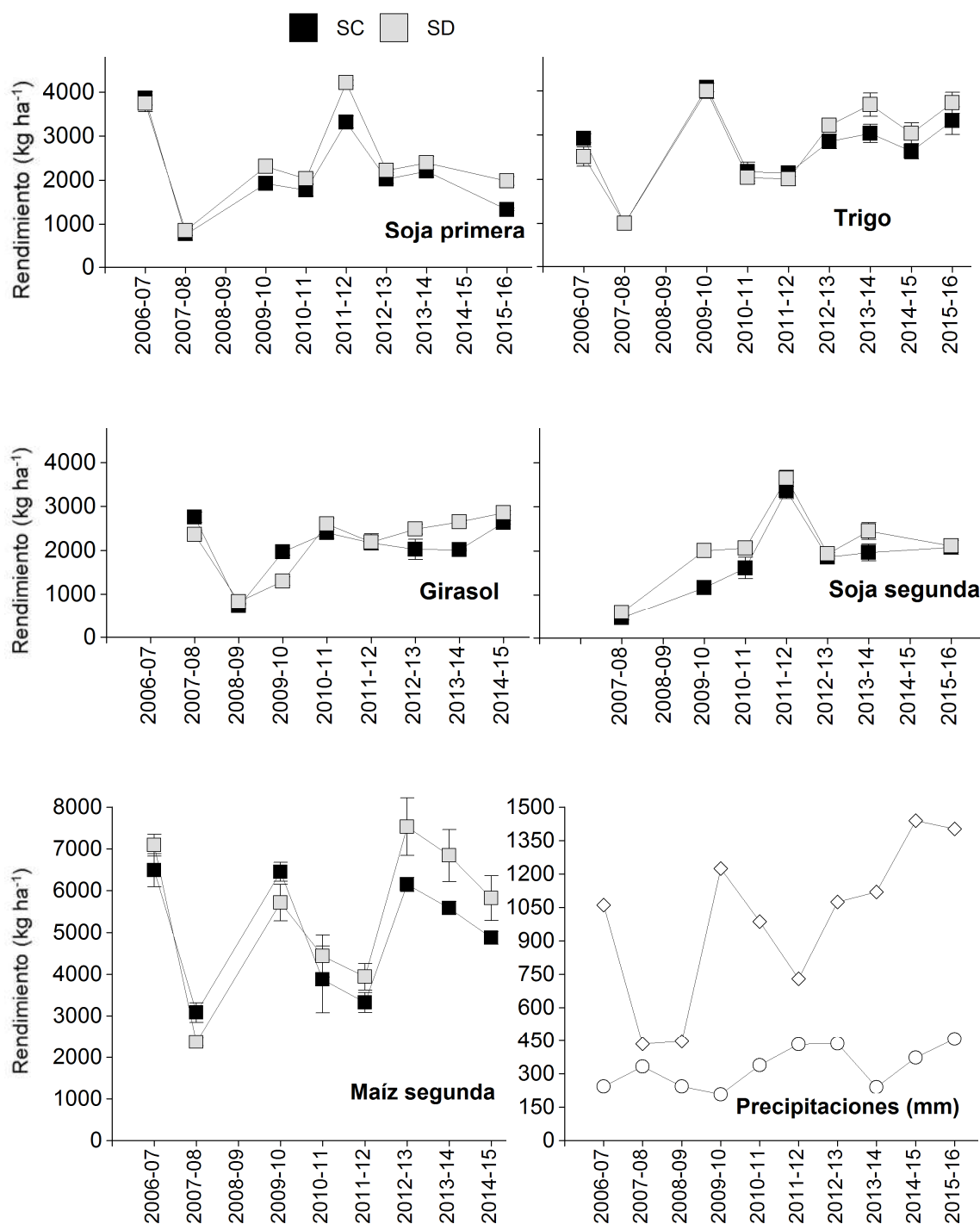


Figura 3: Rendimientos de cultivos evaluados en sistemas siembra convencional con labranzas (SC, cuadrado negro) y siembra directa (SD, cuadrado gris), y distribución de precipitaciones invierno-primavera (rombo) y verano-otoño (círculo) durante ciclos agrícolas de los años 2006-07 a 2015-16

Efectos sobre el suelo

Evaluaciones realizadas a siete años del comienzo del ensayo de larga duración, cuantificaron el carbono orgánico total, carbono orgánico particulado, nitrógeno total, estabilidad de agregados y pH, en dos capas de suelo (Tabla 1).

El carbono orgánico del suelo presentó contenidos totales (COT) similares en SD y SC, en ambas profundidades. El carbono orgánico particulado (COP) presentó contenidos que resultaron 20% mayores en SD, determinando también mayores relaciones COP/COT en SD, con lo cual se asume que la composición del COT es más lábil y joven en SD.

Tabla 1: Valores medios de variables de suelo evaluadas en tratamientos en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC) con labranzas en dos profundidades de un suelo franco limoso del norte de Santa Fe.

Tratamiento	Profundidad	COT gr kg ⁻¹	COP gr kg ⁻¹	COP/COT %	NT gr kg ⁻¹	C/N Rel1:1	EAS DMP (mm)	pH Rel 1:2,5
SD	0 a 10 cm	10,9 a	4,35 a	39,9 a	1,03 a	10,6 a	1,56 a	5,8 a
SC		10,4 a	3,57 b	34,3 b	1,00 a	10,3 a	1,11 b	5,9 a
SD	10 a 20 cm	8,8 a	2,11 a	24,3 a	0,79 a	11,1 a	0,89 a	5,9 a
SC		8,6 a	1,75 a	20,1 a	0,76 a	11,3 a	0,81 a	5,9 a

Medias con letra distinta indican diferencias significativas para cada profundidad. LSD ($\alpha = 0,05$).

También se constató que el COT fue un 20 % mayor en superficie respecto de la profundidad 10 a 20 cm, indicando que en ambos sistemas se presenta similar estratificación de los contenidos de COT, con tendencia a la disminución en profundidad.

Los contenidos de nitrógeno total (NT) **presentaron** la misma tendencia que el COT con valores similares entre tratamientos y mayor contenido en la capa superficial. La relación entre contenidos de carbono y nitrógeno (C/N) resultó menor en 0-10 cm respecto de 10-20 cm coincidiendo con un mayor contenido de N lábil en la primera. Por otra parte, las evaluaciones de pH del suelo indicaron que se presentan rangos levemente ácidos por igual para los tratamientos, que similares a los encontrados en suelos del norte de Santa Fe.

La estabilidad de agregados de suelo (EAS), fue mayor en SD (38%) respecto a SC, en la profundidad 0 a 10 cm y similares entre sistemas de 10 a 20 cm. En esta profundidad los diámetros de agregados determinados fueron significativamente menores que a nivel superficial, coincidiendo con menor contenido de COP (Tabla 2).

Por otra parte luego de la cosecha de cultivos de verano, las densidades aparentes (DAP) no variaron entre tratamientos en las profundidades estudiadas (Tabla 2). Tampoco varió la porosidad total del suelo. Estas variables mostraron valores comparativamente menos favorables en la capa más profunda, con mayor DAP y menor porosidad total en ambos tratamientos.

La distribución de poros por tamaño fue distinta entre tratamientos en la capa superficial. Mientras los macroporos mostraron similares porcentajes en ambos sistemas, SD presentó menos poros medianos y más poros chicos que SC. Esto indica que si bien las labranzas incrementan temporariamente la porosidad, durante el ciclo del cultivo el suelo tiende a perder los cambios adquiridos.

Tabla 2: Valores medios de densidad aparente de suelo, la porosidad total y la distribución de poros por tamaños, evaluados en tratamientos en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC) en dos profundidades de un suelo franco limoso del norte de Santa Fe.

<i>Tratamiento</i>	<i>Profundidad</i>	DAP gr cm ⁻³	Porosidad Total %	Macroporos >60 µm %	Mesoporos 60-15 µm %	Microporos <15 µm %
SD	0 a 10 cm	1,36 a	45,7 a	5,6 a	2,9 a	32,7 b
SC		1,36 a	41,5 a	5,9 a	5,9 b	29,6 a
SD	10 a 20 cm	1,51 a	39,4 a	6,8 a	7,3 a	29,1 a
SC		1,53 a	39,8 a	5,9 a	8,6 a	28,0 a

Medias con letra distinta indican diferencias significativas para cada profundidad. LSD ($\alpha = 0,05$).

A 7 años de su implementación los cambios determinados en el suelo por SD se limitaron a la capa superficial. El período de tiempo es relativamente breve para mostrar cambios en el contenido de COT, aunque se observó un incremento en fracciones más lábiles y sensibles como el COP. Esto indica el inicio de un proceso de mejora de la fertilidad química. Desde el punto de vista físico sólo se aprecia un incremento en el diámetro medio de los agregados del suelo y una ligera pérdida de mesoporos. Estos cambios no alcanzaron la capa 10-20 cm.

Recomendaciones surgidas de los resultados

Los resultados evaluados indican la realización de rotación intensiva en SD presenta a mediano plazo ventajas productivas respecto a su realización en SC, mejorando el uso de los recursos ambientales en épocas estivales. También se generan algunos cambios en los suelos que hacen a la SD más

sustentable en la conservación del suelo. Sin embargo los cambios no han sido los realmente necesarios para revertir los problemas de degradación que presentan los suelos agrícolas del Domo Oriental. Esto plantea que a futuro deban incorporarse también otras prácticas que complementen los planteos en SD, que permitan generar dinámicas más importantes en los procesos de mejora del suelo.

Por ello, además de continuar con evaluaciones iniciadas en 2006, se encuentran en proceso evaluación en ensayos de larga duración desde la campaña 2013-14, rotaciones que incorporan cultivos de cobertura y gramíneas en mayor proporción, también pasturas perennes, y planteos mixtos, como así también ensayos tendientes a comprender el impacto de las enmiendas orgánicas sobre las rotaciones agrícolas diversificadas.

Bibliografía

- Bianchi J.A. 2016. Manejo de suelo y diagnóstico de fertilidad. Soja campaña 2015/2016. Oficina de Desarrollo Agropecuario. Unión Agrícola de Avellaneda, 1:17-22.
- Bonel B., J. Denoia, N. Di Leo y S. Montico. 2015. Provincia de Santa Fe. 2:275-285. En Casas R. y G. Albarracín (eds.). El deterioro del Suelo y del Ambiente en la Argentina. Tomo 2. 1a ed. FECIC. Editorial Dunken. Buenos Aires. 550 pp.
- De Orellana J. y M. Pilatti. 1994. La Estabilidad de Agregados como Indicadores edáficos de Sostenibilidad. Ciencia del Suelo, 2: 75-80.
- Gambaudo, S.; Fontanetto H.; Campos R., Mieres L., Oprandi G., Parodi M., Rotela F., Boretto D. y H. Boschetto. 2011. La Precisión en Ganadería. 10mo Curso Internacional de Agricultura de Precisión. EEA INTA Manfredi, 13, 14 y 15 de julio de 2011. Pág. 89-96.
- Heredia O.; Giuffré, L.; Florentino J. y M. Conti. 2006. Calidad de los suelos del norte de Santa Fe: Efecto de la geomorfología y uso de la tierra. Ciencia del suelo, 24(2), 109-114.
- Iriondo M.H. Aguas Superficiales y Subterráneas de la Provincia de Santa Fe. 2012. (Segunda edición). ISBN 978-987-24637-3-1. 290 páginas.
- Mieres, L. y R. Marano. 2010. Respuesta productiva del cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) a riego suplementario en el NE santafesino. IV Jornadas Riego y Fertilización. Mendoza, Argentina.
- Mieres L. y E. Lorenzini. 2014. "Efecto del sistema de labranza sobre fracciones carbonadas de un suelo del Chaco Húmedo Santafesino". XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Bahía Blanca, del 5 al 9 de mayo de 2014. En CD.
- Mieres L. y S. Zuil. 2011. Consumo de agua por soja en siembra directa y convencional en un ambiente subtropical. Quinto Congreso de Soja del Mercosur / Primer Foro de la Soja ASIA – Mercosur. SP1

-
- Vivas H.S. y M.A. Sosa. 1998. Labranzas conservacionistas para el norte de Santa Fe. En Siembra Directa. Editores: Panigatti J.L., H. Marelli, A. Buschiazzi y R. Gil. SAGPyA – INTA. Ed Hemisferio Sur. 1º edición. 1998.
- Paiz D.H. 2009. Caracterización de los suelos sembrados con algodón. Provincia de Santa Fe. Resumen de actividades Asociación para la Promoción de la Producción Algodonera, 9:26-31.
- Vidal, C.; V. Aparicio. 2008. Evaluación de algunas propiedades físicas y químicas de suelos provenientes del desmonte en el norte de Santa Fe. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Potrero de los Funes, San Luis. Mayo 2008.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. 2008. InfoStat, versión 2008, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Zuil S. 2011. Comportamiento de soja en tres campañas contrastantes en el norte de Santa Fe. Quinto Congreso de Soja del Mercosur / Primer Foro de la Soja ASIA – Mercosur.

Labranzas y secuencias de cultivos en la Región Central de Córdoba: efecto sobre el rendimiento y propiedades físicas suelo

Carolina Alvarez^{1*}; Juan Pablo Giubergia¹; María Basanta²

¹INTA EEA Manfredi; ²INTA EEA Rafaela

Ubicación y características generales de la región

Los ensayos de larga duración (ELD) que se describen en este trabajo están localizados en la Estación Experimental Agropecuaria de INTA Manfredi, Córdoba, Argentina (31,5° S, 63,5° O, 292 m.s.n.m.), dentro de la región semiárida pampeana. La región central de Córdoba (RCC) es una llanura integrada por varios ambientes geomorfológicos denominada pampa loésica alta. Estructuralmente, esta unidad constituye un bloque elevado hacia el oeste por fallas geológicas del basamento profundo, parcialmente cubierto por depósitos de piedemonte y luego por una potente sedimentación eólica. Superficialmente sólo se encuentra loess franco limoso muy homogéneo donde se han observado espesores de hasta 50 m. No se observa la presencia de depósitos fluviales ya que, por razones topográficas, esta gran unidad geomorfológica de la provincia ha quedado fuera de la influencia de los derrames y abanicos provenientes de las Sierras Chicas de Córdoba. Como formas menores se observan en el paisaje líneas de escurrimiento deprimidas de origen estructural (Gorgas & Tassile, 2003). El loess pampeano presenta predominio de silicatos provenientes de la descomposición de las rocas feldespáticas. Esos silicatos contienen grandes reservas de potasio e importantes reservas de fósforo (Jarsún *et al.*, 2006). El carbonato de calcio varía entre 3 y 10% a una profundidad de 55 cm (Jarsún *et al.*, 1987).

Particularmente, el suelo sobre el que se llevan adelante los ELD en INTA Manfredi es un Haplustol éntico, serie Oncativo, profundo, bien drenado, desarrollado sobre materiales franco limosos, con una capacidad de almacenaje de agua disponible de 300 mm hasta los 200 cm de profundidad (Jarsún *et al.*, 1987).

De acuerdo con Thornthwaite, el clima de esta región se clasifica como subhúmedo seco con una evapotranspiración anual promedio de 1190 a 1569 mm. El período de lluvias se extiende de octubre a marzo, donde se concentra el 80% de las precipitaciones. La precipitación media anual es de 750 mm. La temperatura media anual de la región es de 16,6°C, con una temperatura media del mes más

frío de 9,5 °C y media del mes más cálido de 23,4 °C (Jarsún *et al.*, 1987). La distribución media anual de las precipitaciones y temperaturas de la localidad de Manfredi se describen en la Figura 1. A pesar de que las precipitaciones se concentran en el período primavero-estival, la elevada demanda atmosférica determina que dicho período sea el de mayor déficit de agua, promediando 252 mm (Casagrande & Vergara, 1996). A pesar de que la oferta de agua de lluvia para los cultivos estivales muchas veces es incierta en términos de oportunidad, cantidad o frecuencia, de manera particular hacia el comienzo del ciclo (De la Casa & Ovando, 2006), los cultivos estivales (soja (*Glycine max* L.), maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.)) son los más importantes en la economía agrícola regional. La fecha de inicio del período lluvioso es muy errática, pudiendo ocurrir entre los meses de septiembre a diciembre, lo que condiciona la fecha de siembra de los cultivos. Consecuentemente, como en todas las regiones semiáridas, los cultivos de secano están sujetos a condiciones de estrés hídrico en alguna etapa de su desarrollo, lo cual causa disminución del rendimiento o pérdida total del cultivo (Unger, 2002).

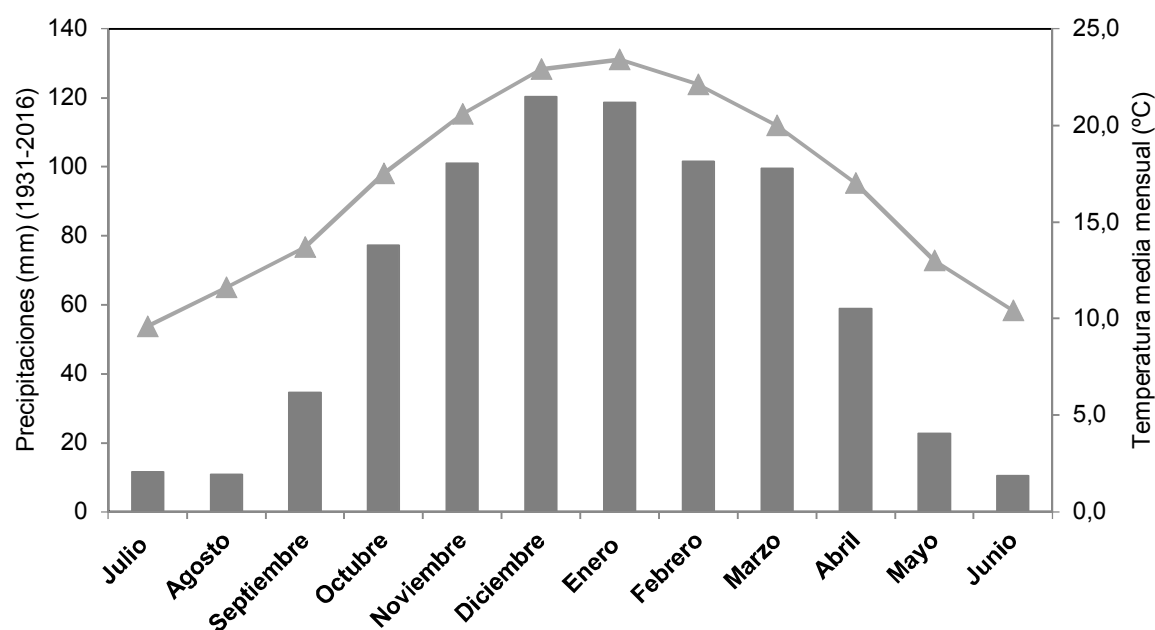


Figura 1. Distribución anual de las precipitaciones (indicada con barras) y temperatura media mensual (▲). Serie 1931-2016. Datos tomados de la Estación Meteorológica de INTA EEA Manfredi.

Problema a estudiar al momento de instalar los ELD

En la RCC hubo importantes cambios en el transcurso de los últimos treinta años con respecto al uso de la tierra dedicada a la agricultura. Entre ellos, hubo un avance de la producción de granos sobre áreas anteriormente destinadas a la ganadería. A partir de la década del 80, esta agriculturización se caracterizó por un creciente predominio del monocultivo de soja en reemplazo de otros cultivos como sorgo, maíz, trigo (*Triticum aestivum* L.), girasol y maní. Al inicio, comenzó con sistemas de labranza convencional que se caracterizaban por la remoción de suelo y la escasa o nula permanencia de rastrojos en superficie. Este tipo de manejo predominó por más de tres décadas, el cual derivó en la degradación del recurso suelo, especialmente por la pérdida de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, disminución de la estabilidad de agregados e incremento del escurrimiento superficial. Los sistemas de labranza fueron evolucionando hacia fines de la década del 80 a los llamados “conservacionistas”, entre los cuales se encuentra el sistema de siembra directa (SD), que se caracteriza por el no laboreo, siendo en la actualidad el de mayor adopción en la región (Salas *et al.*, 2005).

La SD fue propuesta como una alternativa al sistema de labranza convencional para reducir la degradación de los suelos (Alvarez *et al.*, 1998). La incidencia de las labranzas sobre la dinámica de materia orgánica del suelo puede variar debido al tipo de suelo, sistemas de cultivo, manejo de los residuos, y el clima (Paustian *et al.*, 1997). Los cambios tendientes a mejorar propiedades del suelo debidos a diferentes manejos en una región semiárida son a menudo lentos, por la limitada producción de biomasa aérea y subterránea en el tiempo (Mikha *et al.*, 2006).

La agricultura bajo siembra directa puede ser sustentable solo si los aportes de biomasa vegetal son suficientes para mantener y/o incrementar la materia orgánica del suelo (MOS). Todas las acciones que, a lo largo de una rotación, incrementen la cantidad de C aportado al sistema (alta frecuencia de cultivos con gran volumen de rastrojo y/o sistema radical) mantendrán o mejorarán los niveles de MOS, según sea que el sistema haya alcanzado o no su nivel de carbono orgánico de equilibrio.

La introducción de semilla de soja genéticamente modificada resistente al glifosato ha permitido el aumento sostenido del área sembrada con este cultivo principalmente en SD (Hang *et al.*, 2011). Esto resultó en una pérdida de gramíneas en las secuencias de cultivo, que ha influido en forma negativa sobre el contenido de carbono (C) en los suelos de Argentina (Andriulo *et al.*, 2008), debido a los menores aportes de C que proporcionan las leguminosas respecto de las gramíneas (Alvarez & Steinbach, 2006).

Para revertir esta situación una alternativa es el uso de cultivos de cobertura (CC) invernales con lo cual aumenta el periodo de ocupación del suelo y en consecuencia mejora la eficiencia del uso de los recursos (nutrientes, radiación y agua) en el sistema suelo-cultivo, lo que se traduce en mayor aporte de C al suelo, con aumento de la MOS (Basanta et al., 2012; Villamil et al., 2006) y de su fracción joven (Salvagiotti et al., 2012; Galarza et al., 2010, Basanta et al.; 2010).

En función de la problemática anteriormente descripta, se instalaron ELD en la EEA INTA Manfredi con el objetivo de estudiar en el largo plazo el efecto de los sistemas de labranza y las secuencias de cultivo sobre el manejo y conservación del suelo. Con ello se buscó generar información local sobre prácticas de manejo e identificar aquellas compatibles con un manejo sustentable de los sistemas de producción agrícola en la provincia.

Tratamientos estudiados

En la EEA INTA Manfredi se conduce un ELD de sistemas de labranza (ELD₁) desde el año 1983. El ensayo fue instalado para buscar alternativas a las labranzas tradicionales de la época y para intentar detener y revertir la creciente degradación de los suelos. El ensayo tiene un diseño experimental de bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Los tratamientos de labranzas son cuatro y se realizan en la secuencia soja-maíz: i) labranza convencional con arado de rejas (LC), ii) labranza vertical con cincel (LV), iii) siembra directa desde 1994 (SD) y iv) siembra directa desde 2006 (SD06). El tratamiento SD06 corresponde a un tratamiento con labranza con rastra de discos que pasó a SD a partir del año 2006 (Tabla 1). Las parcelas tienen una superficie de 420 m² (10,5 m de ancho por 40 m de largo).

Tabla 1. Tratamientos de labranza en el ELD₁.

Sistemas de Labranza	Descripción
Convencional (LC)	Arado de rejas y rastra de discos
Vertical (LV)	Cincel y cultivador de campo
Siembra Directa iniciada en 1994 (SD)	Sin labranzas, con control químico de malezas en el barbecho
Siembra Directa iniciada en 2006 (SD06)	Sin labranzas, con control químico de malezas en el barbecho

Posteriormente, en el año 1995, se instaló un segundo experimento de larga duración (ELD₂) en el que se buscaba comenzar a estudiar otra problemática de la época, que era la pérdida de gramíneas en la rotación a causa de la introducción del cultivo de soja. Por ello, en este ELD₂ se evalúan distintos sistemas de labranzas en monocultivo de soja (SS) y en la secuencia soja-maíz (SM) incluyendo tratamientos con gramíneas de invierno como CC. Los sistemas de labranza son labranza reducida con rastra de discos y vibrocultivador (LR), SD y siembra directa con un CC en el periodo otoño-invierno (SDcc). De la combinación de sistemas de labranzas y secuencias de cultivo resultan los siguientes tratamientos: 1) SS-LR, 2) SS-SD, 3) SS-SDcc, 4) SM-LR, 5) SM-SD y 6) SM-SDcc (Tabla 2). En consecuencia, la soja se evalúa en dos secuencias (monocultivo y rotación) y el maíz sólo en rotación con soja. Las unidades experimentales tienen 110 m de largo por 35 m de ancho.

Al tratamiento LR se le realiza una labor primaria de rastra de discos al finalizar el invierno. Luego, previo a la siembra de los cultivos de verano, se refina el suelo con un vibrocultivador. En el tratamiento SD las malezas se controlan con herbicidas durante el período de barbecho, realizándose la siembra de los cultivos con siembra directa. En el tratamiento SDcc el cultivo de cobertura, triticale (*Triticosecale* Wittm.), se siembra después del cultivo de soja con el objetivo de generar mayor cobertura de residuos. Por lo tanto, en el tratamiento SS-SDcc el CC se realiza todos los años, mientras que en la secuencia soja-maíz (SM-SDcc), año por medio (siembra del CC después de soja y barbecho químico después de maíz). El ciclo del CC se interrumpe con un herbicida cuando alcanza el estado fenológico de encañazón.

Tabla 2. Tratamientos de secuencias x labranzas en el ELD₂.

Tratamiento	Descripción
SS-LR	Rastra de discos y vibrocultivador en monocultivo de soja.
SS-SD	Sin labranzas, con control químico de malezas en el barbecho en monocultivo de soja.
SS-SDcc	Sin labranzas, con cultivo de cobertura y control químico de malezas en el barbecho en monocultivo de soja.
SM-LR	Rastra de discos y vibrocultivador en rotación soja-maíz.
SM-SD	Sin labranzas, con control químico de malezas en el barbecho en rotación soja-maíz.
SM-SDcc	Sin labranzas, con cultivo de cobertura y control químico de malezas en el barbecho en rotación soja-maíz.

En ambos ELD se realizaron periódicamente determinaciones de rendimiento de los cultivos, contenido de agua en el suelo al inicio (AUi) y final de cada ciclo de cultivo, determinaciones de fertilidad física y química como carbono (C) del suelo, densidad aparente (Dap), infiltración básica (Ib) y estabilidad de agregados (EA).

Interpretación de los resultados

Efectos de la siembra directa y la rotación sobre el agua en el suelo y el rendimiento de los cultivos

En base a los resultados obtenidos a partir del ELD₂, el manejo bajo SD y con rotación de cultivos soja-maíz (SM-SD) generó, en promedio, los valores más altos en el contenido de agua en el suelo al momento de la siembra de soja (Figura 2). El efecto sobre la captación y acumulación de agua en el suelo estuvo dado, en primer lugar, por el sistema de labranza. Pasar de LR a SD generó mayores AUi, y la diferencia entre ambos, fue mayor en SM que en SS (56 mm vs 48 mm, respectivamente). La ausencia de laboreo del suelo y la presencia de rastrojo de maíz, con mayor volumen, mejor cobertura y mayor duración que el residuo de soja, favorecieron la captación y conservación del agua en el suelo (Basanta & Alvarez, 2015).

Respecto al contenido de agua en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz, se observó nuevamente que los sistemas bajo SD resultaron ser más eficientes en el almacenamiento de agua en el suelo, acumulando entre un 25% (SDcc) y un 50% (SD) más de agua que el sistema con laboreo del suelo (LR) (Figura 3).

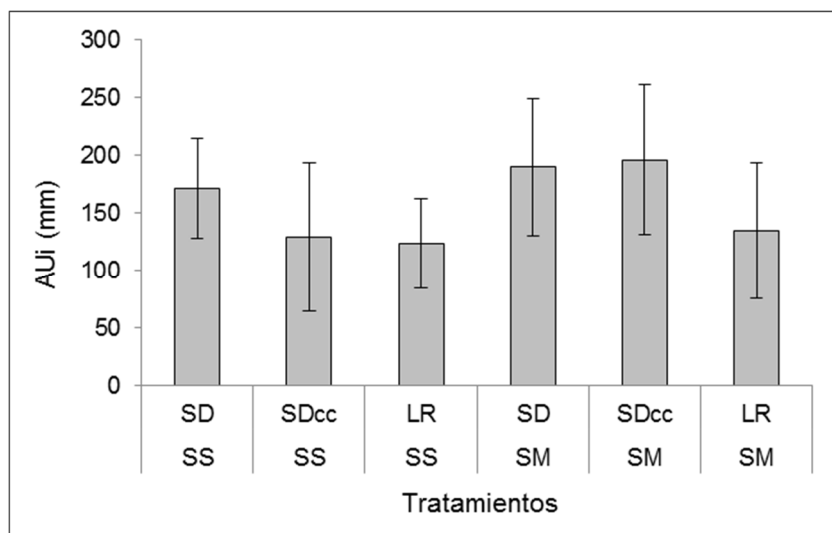


Figura 2. Agua útil inicial (AUi) para el cultivo de soja (promedio 1997-2014), en el ELD₂. Las líneas sobre las barras representan el desvío estándar. SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

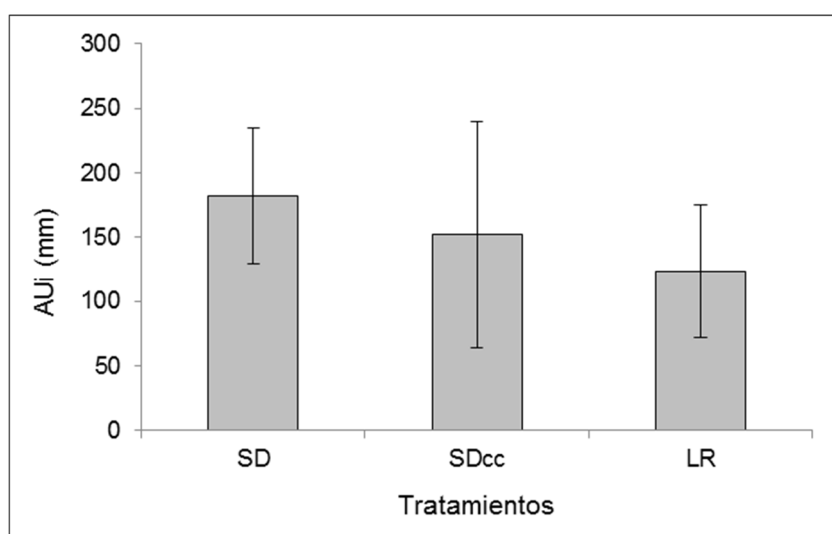


Figura 3. Agua útil inicial (AUi) para el cultivo de maíz (promedio 1997-2014), en el ELD₂. Las líneas sobre las barras representan el desvío estándar. SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

Los rendimientos promedio (Rto) de soja para el período 1997 a 2014, no mostraron interacción significativa de los factores secuencia y labranza (Figura 4). El mayor Rto fue en SD en rotación (SM-SD) y el menor bajo el suelo labrado y en monocultivo (SS-LR), con una diferencia de 950 kg ha⁻¹ entre estos tratamientos. Dentro de cada secuencia hubo un orden decreciente de Rto: SD>SDcc>LR. Es

importante señalar que en el 60% de los años, la SD presentó un Rto significativamente superior al tratamiento LR. Por otro lado, en la Figura 5 se observan los Rto del cultivo de maíz para el mismo período. El Rto según sistema de labranza presentó el siguiente orden decreciente: SD>SDcc=LR, siendo en SD un 27% superior que en el resto de los tratamientos.

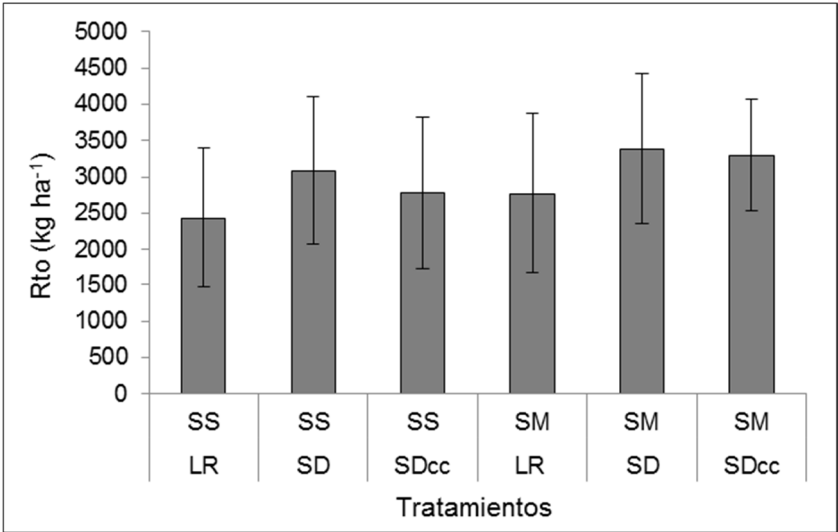


Figura 4. Rendimientos (Rto) de soja durante el período 1997-2014, para el ELD₂. Las líneas sobre las barras representan el desvío estándar. SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

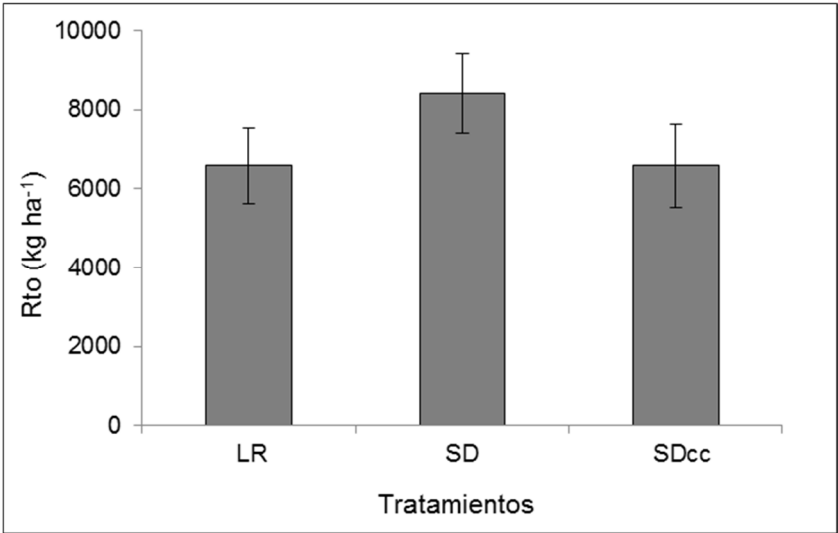


Figura 5. Rendimientos (Rto) de maíz durante el período 1997-2014, para el ELD₂. Las líneas sobre las barras representan el desvío estándar. SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

Se encontró una relación lineal positiva entre el rendimiento de soja y el agua útil inicial (Figura 6). Es interesante observar que los sistemas sin laboreo y con presencia de maíz en la rotación son los que presentan más agua útil a la siembra y eso se tradujo en mayores rendimientos. Así, la SD al conservar mejor el agua durante el barbecho, permitió obtener mayores rendimientos que la LR. Por su parte, en maíz el rendimiento aumentó desde 6500 kg ha⁻¹ a más de 8000 kg ha⁻¹, como resultado del incremento del AUi de 125 mm a 185 mm, al pasar de LR a SD (Figura 7).

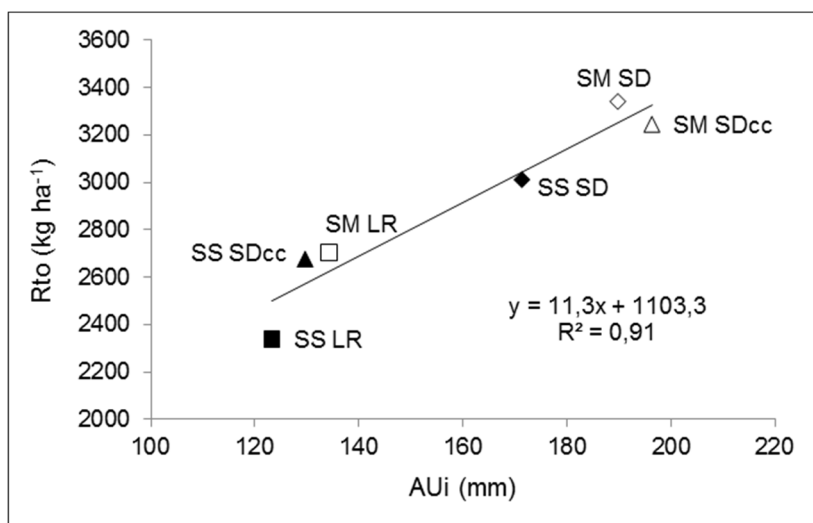


Figura 6. Relación entre rendimiento (Rto) y agua útil inicial (AUi) para el cultivo de soja (promedio 1997-2014). SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

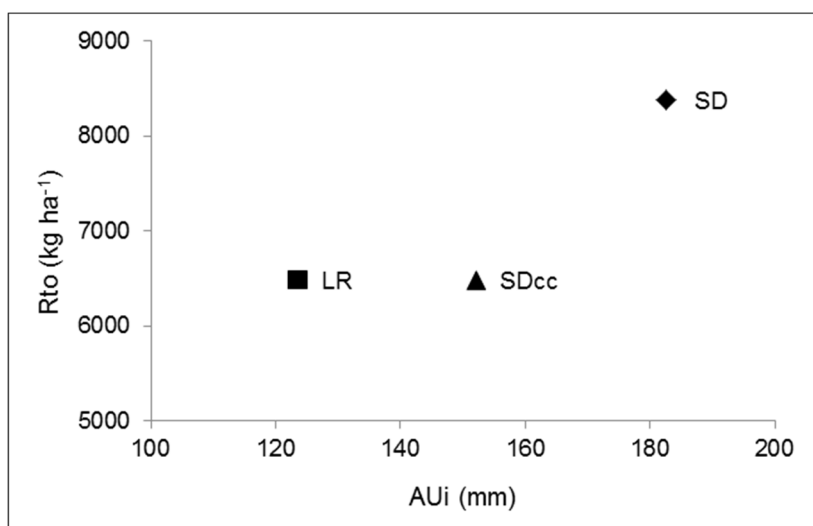


Figura 7. Relación entre rendimiento (Rto) y agua útil inicial (AUi) para el cultivo de maíz (promedio 1997-2014). SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

Los rendimientos de cultivos medidos durante 30 años de experimentación en el ELD₁ mostraron resultados similares a los anteriormente descriptos (Álvarez & Basanta, 2013). El efecto de los sistemas de labranza a lo largo del tiempo sobre el rendimiento del cultivo de soja tuvo un efecto significativo a favor de la SD (3134 kg ha⁻¹) respecto de LV (2505 kg ha⁻¹) y la LC (2344 kg ha⁻¹). La tendencia se mantuvo cuando se analizaron los rendimientos del cultivo de maíz, siendo significativamente mayor la SD (8081 kg ha⁻¹) respecto a LV (6605 kg ha⁻¹) y LC (5836 kg ha⁻¹).

Efectos del cultivo de cobertura sobre agua en el suelo y rendimiento

En los sistemas de agricultura continua una alternativa interesante de manejo es la inclusión de un CC entre dos cultivos de cosecha. Los cultivos de verano se cosechan en marzo-abril y la siembra del próximo cultivo ocurre entre septiembre y diciembre, con lo cual el período de barbecho se extiende entre 5 y 9 meses, siendo lo más frecuente una duración de 7 a 8 meses. Durante un período tan largo es altamente probable la ocurrencia de procesos de pérdida de agua del suelo, aún bajo sistemas conservacionistas. Las pérdidas de agua en los barbechos largos bajo SD justificarían la inclusión de un CC invernal, ya que de esta manera se utiliza el agua para generar cobertura y aumentar el aporte de C al sistema (Basanta *et al.*, 2008).

En la RCC, un CC sembrado a inicios de otoño llega a inicio de encañazón en agosto o septiembre, previo al comienzo de las lluvias de primavera. Esto permite la recarga del perfil hasta la siembra de los cultivos de verano, la cual ocurre generalmente a fines de noviembre o principio de diciembre. Además de que contribuyen a la fijación de C, los CC facilitan también el control de malezas y reciclan nutrientes. No obstante, tienen la desventaja del uso consuntivo de agua del suelo, lo que en años con escasas precipitaciones puede afectar negativamente la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente, especialmente para cultivos sensibles como el maíz (Salas *et al.*, 2005).

Los resultados obtenidos en el ELD₂ muestran que en ambas secuencias bajo el tratamiento SDcc, el CC disminuyó el AUi afectando significativamente el rendimiento de soja en monocultivo y de maíz. En el caso del maíz, además del efecto sobre el AUi, es posible que el rendimiento haya sido afectado por la inmovilización del nitrógeno en los residuos con alta relación C/N del triticale (Figura 7) (Vigil & Kissel, 1991).

En un período de 18 años, la inclusión de un CC en el monocultivo de soja disminuyó el AUi en 41 mm en promedio, respecto al testigo sin CC (esto es SS-SD vs SS-SDcc) (Figura 2). Esto se tradujo en una

reducción del rendimiento del cultivo de soja de 300 kg ha^{-1} (Figura 4). Respecto al cultivo de maíz, la realización del CC durante el barbecho, generó una pérdida de Rto promedio de aproximadamente 1800 kg ha^{-1} (Figura 5) ($31 \text{ mm de AU}_i \text{ SDcc} < \text{SD}$). Se observó también que los tratamientos con CC presentaron el mayor desvío estándar respecto a la media para la variable AU_i (Figuras 2 y 3). Así, en años con ocurrencia de lluvias durante el ciclo del CC y posterior barbecho, el consumo de agua por parte del CC no ejerció un efecto negativo sobre la disponibilidad del agua del suelo. Sin embargo, en años con escasez de lluvias, el consumo del CC se vio reflejado en menor AU_i a la siembra de soja o maíz.

Aportes de biomasa y carbono del suelo

En la Tabla 3 se presentan los valores anuales promedio de aportes de residuos y de C en todos los sistemas de manejo evaluados en el ELD₂. Se observó en las dos secuencias de cultivo que los aportes se incrementan de LR a SD y que la inclusión del CC en SD mejora los niveles de aporte de C. El sistema con mayores aportes resultó ser la siembra directa en rotación SM con cultivo de cobertura (SS-SDcc), donde la biomasa del CC mejora los aportes de C aún con la disminución de la biomasa de rastrojo del maíz debida a los menores rendimientos en SDcc con respecto a SD (Figura 3). En términos relativos, SM-SDcc aportó 1,4 veces más C que el sistema menos sustentable (SS-LR) y la inclusión del CC incrementó los aportes de C con respecto a SD en 33% en SS y 21% en SM. En relación al monocultivo de soja, Martínez *et al.* (2013) han constatado que la inclusión de una gramínea como CC mejora el balance de carbono del suelo incrementando la productividad y la sostenibilidad del sistema.

Tabla 3. Aporte anual de residuos y carbono en distintos sistemas de manejo (promedio 1997-2014).

Secuencia	Labranza	Aporte de residuos ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Aporte de C ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Aporte de C	relativo
SS	LR	4245	1698	100	
	SD	5428	2171	128	
	SDcc	7243	2897	171	
SM	LR	6614	2645	156	
	SD	8399	3359	198	
	SDcc	10176	4070	240	

SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

Los mayores aportes de residuos resultan en mayores contenidos de C en el suelo. Como se observa en la Tabla 4, los tratamientos de la secuencia SM en combinación con siembra directa (SM-SDcc y SM-SD) tienen los mayores stocks de COS, mientras que los tratamientos bajo LR (SM y SS) los menores stocks de COS. Se observó una correlación positiva significativa entre los aportes de C de los residuos y el COS a 0-30 cm (Figura 8).

Esto puede atribuirse a condiciones edáficas que favorecen la mineralización de la materia orgánica en los sistemas laboreados, tales como mayor temperatura y menor protección física, provocando liberación de nutrientes y pérdidas de C como CO₂ (Abril *et al.*, 2005).

Tabla 4. Stock de Carbono hasta 30 cm de profundidad en los distintos sistemas de manejo.

Secuencia	Labranza	Stock COS 0-30 cm (Mg ha ⁻¹)	E.E.
SM	LR	36 b	0,9
	SD	41 a	0,59
	SDcc	42 a	0,49
SS	LR	36 b	0,89
	SD	37 b	1,34
	SDcc	39 ab	0,76

SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

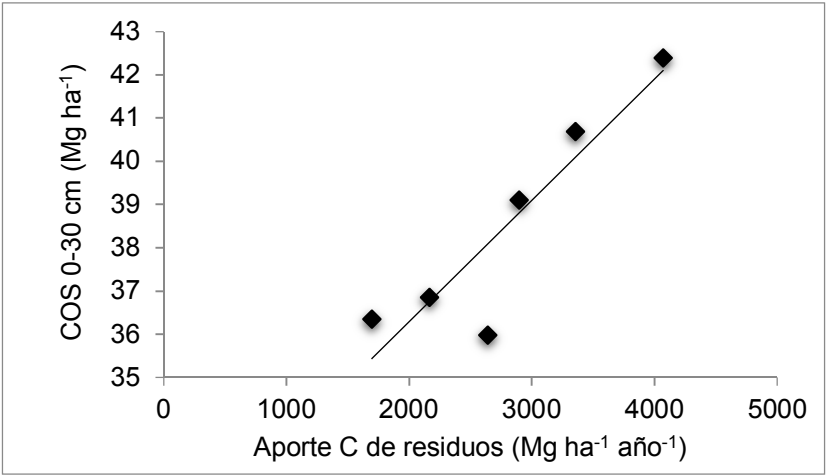


Figura 8. Carbono orgánico del suelo (COS) en 0-30 cm en función de los aportes anuales de carbono de la biomasa de cultivos ($y = 0,0028x + 30,675$; $R^2 = 0,829$).

Mediciones realizadas en el ELD₁ durante el año 2013 mostraron que la concentración de C orgánico (CO), fue mayor bajo SD que bajo LV y LC en todas las profundidades, aunque dicha diferencia fue significativa sólo en los primeros 5 cm. Sin embargo, considerando el stock de CO en los primeros 20 cm del perfil de suelo, se observó que bajo SD fue de 32,2 Mg ha⁻¹ frente a 29,6 Mg ha⁻¹ en LV y 27,6 Mg ha⁻¹ bajo LC. En términos relativos, SD acumuló 16% más de CO que LC y 9% más que LV. Estos valores de CO fueron similares a los encontrados en mediciones realizadas en el año 2006, por lo que se podría considerar que luego de 30 años de ser aplicados de forma continua, los sistemas de labranzas podrían estar alcanzando el equilibrio en sus contenidos de CO. En suelos prístinos de la serie Oncativo, se encontraron valores de stock de C de 49 Mg ha⁻¹ hasta los 20 cm de profundidad (Álvarez & Basanta, 2013). El cambio de uso del suelo provocó una pérdida de los contenidos de CO. Si bien el efecto acumulado de la SD logró mejorar el contenido de CO, este alcanzó solo el 66% del valor de CO de la situación prístina.

Propiedades físicas

En suelos con altos contenidos de limo y manejados con SD continua, es frecuente observar un incremento en los valores de Dap respecto a suelos labrados, además de un aumento en los valores de Dap en profundidad, respecto al estrato superficial (Buschiazzo *et al.*, 1998; Peirone *et al.*, 2008). Este fenómeno ha sido observado en los dos ELD de INTA Manfredi. A modo de ejemplo, en la Figura 9 se presentan los resultados observados en el ELD₁ en la última medición realizada en el año 2012. En 0-5 y 5-10 cm, la Dap no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, aunque se observó una tendencia de menores valores bajo SD a nivel superficial. En los estratos de 10-20 y 20-30 cm los tratamientos bajo SD mostraron mayor Dap que bajo LC.

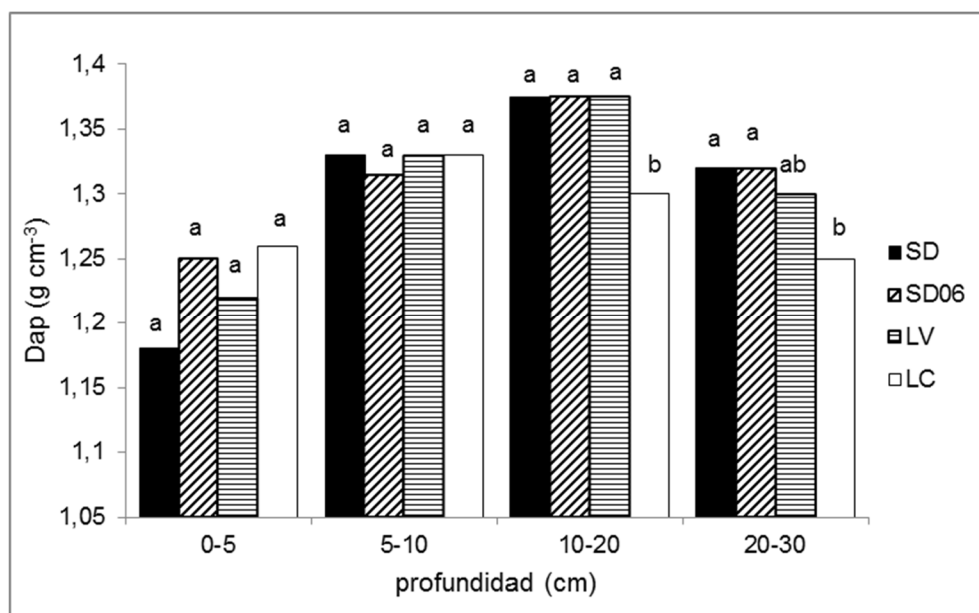


Figura 9. Densidad aparente (Dap) del suelo bajo distintos sistemas de labranza, para las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) dentro de cada profundidad. SD: siembra directa; SD06: siembra directa iniciada en 2006; LV: labranza vertical; LC: labranza convencional.

En la capa superficial, el mayor contenido de CO y la consecuente mayor actividad de la macrofauna del suelo, influyen marcadamente en la capacidad de mantener valores bajos de Dap bajo SD (Alvarez *et al.*, 2009). Por su parte, los mayores valores de Dap a nivel subsuperficial se deberían a un efecto de compactación generado por el manejo en SD (Sasal *et al.*, 2006). Sin embargo, los valores de Dap estarían dentro del rango considerado como normal para suelos de textura franco-limosa, por lo que no estarían afectando negativamente al crecimiento radical de los cultivos. Para la textura estudiada se mencionan valores de Dap de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, como umbral de afectación del crecimiento radical (Arshad *et al.*, 1996). Una evidencia de que los niveles de Dap no son limitantes estaría dada por la mayor cantidad de AUi acumulada a la siembra de los cultivos bajo SD y los Rto más altos obtenidos bajo este tratamiento. No obstante, el monitoreo de esta y otras variables indicadoras de compactación es una práctica recomendable bajo SD.

Por otro lado, el incremento en los valores de CO en los primeros cm de suelo bajo SD generalmente está asociado a una mejora de algunas propiedades físicas relacionadas con la estructura del suelo. Al respecto, se presentan los resultados de EA medida en los ELD de INTA Manfredi. En el ELD1, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados. El manejo

más antiguo bajo SD presentó el mayor porcentaje de EA en la capa superficial de suelo (50%), seguido por SD06 (36%), LV (24%) y LC (19%).

En el ELD₂, se observó que para la profundidad de 0-5 cm, los tratamientos bajo SD y SDcc presentaron mayores valores de EA que bajo LR, tanto en la secuencia SM como en SS. Además, se observó un incremento de la EA cuando la secuencia fue SM. Para la profundidad 5-10 cm, los valores de EA fueron menores que en 0-5 cm y no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 5). La ausencia de efectos del tratamiento SDcc en el estrato superficial (0-5 cm) podría estar explicada por la ausencia del CC previo en SM, y al bajo rendimiento del CC en la secuencia SS, sumado al momento en que se realizó el muestreo (aproximadamente 4 meses después de secado el CC).

Tabla 5. Estabilidad de agregados para los distintos tratamientos en el ELD₂.

Profundidad (cm)	Secuencia	Manejo	EA (%)
0-5	SS	LR	29 a
		SDcc	50 b
		SD	48 b
	SM	LR	26 a
		SDcc	58 bc
		SD	65 c
	Prístino		94
5-10	SS	LR	32 a
		SDcc	37 ab
		SD	43 ab
	SM	LR	43 ab
		SDcc	40 ab
		SD	49 b
	Prístino		92

Letras distintas dentro de cada profundidad indican diferencias significativas ($p < 0,05$). SS: soja-soja; SM: soja-maíz; SD: siembra directa; SDcc: siembra directa con cultivo de cobertura; LR: labranza reducida.

Numerosos estudios muestran que sistemas con SD producen un incremento de la estabilidad estructural en relación a sistemas convencionales de labranzas (Sasal *et al.*, 2006). La no remoción del suelo y la presencia de rastrojos en superficie que favorecen el incremento del contenido de CO y la actividad biológica en las capas superficiales de suelo, podrían ser responsables del mejor estado

estructural en superficie bajo SD. Por su parte, el sistema radicular del cultivo de maíz y la cantidad y calidad de sus residuos favorecerían la estructuración y la estabilidad de los agregados del suelo.

Respecto a la variable infiltración de agua en el suelo, las mediciones realizadas en el ELD₁ en el año 2012 mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Los sistemas bajo siembra directa (SD y SD06) con Ib de 56 y 51 mm h⁻¹, respectivamente, se diferenciaron de la LC (35 mm h⁻¹), y la LV presentó valores intermedios (42 mm h⁻¹). En comparación con LC, la Ib promedio obtenida en los sistemas bajo SD, fue un 35% superior (Figura 10).

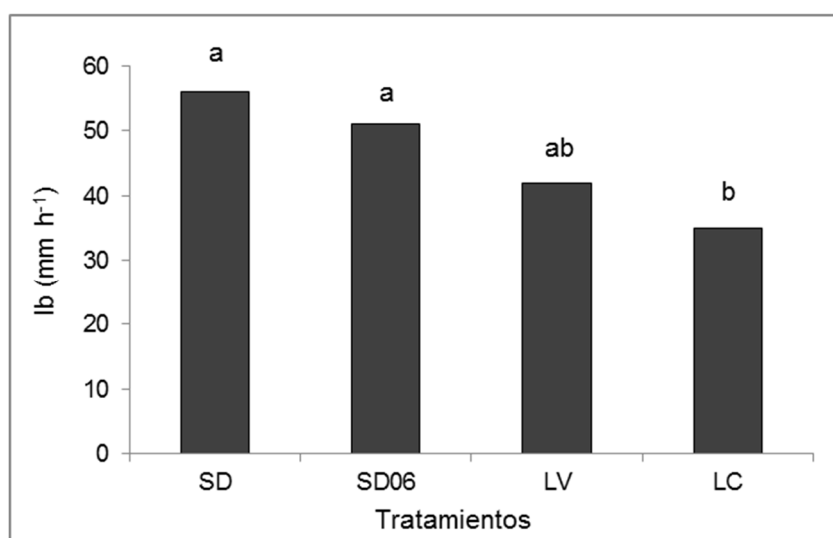


Figura 10. Infiltración básica (Ib) bajo distintos sistemas de labranza, en el ELD₁. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). SD: siembra directa; SD06: siembra directa iniciada en 2006; LV: labranza vertical; LC: labranza convencional.

En relación al movimiento del agua, hay coincidencias que en los suelos bajo SD se incrementaría la conductividad hidráulica en las capas superficiales y la infiltración. Esto estaría asociado principalmente al aumento en la estabilidad de los agregados y formación de macroporos también más estables y menos tortuosos en el largo plazo (Arshad *et al.*, 1999; Sanzano *et al.*, 2005). Por el contrario, algunos estudios más recientes han mostrado disminución de los valores de infiltración bajo SD (Sasal *et al.*, 2006; Álvarez *et al.*, 2009). Estos autores asociaron la pérdida de infiltración bajo SD en suelos con altos contenidos de limo, a la compactación superficial por el tráfico de maquinarias y secuencias de cultivos que aportan bajos volúmenes de rastrojo en superficie.

Consideraciones finales

El análisis de la información generada a partir de las experiencias de larga duración permite comprobar que la SD y la inclusión del cultivo de maíz en la rotación con soja contribuyeron a aumentar los rendimientos de los cultivos, principalmente porque mejora la condición hídrica del suelo. El cambio de uso del suelo provocó una pérdida de los contenidos de carbono orgánico. El efecto acumulado de la SD logró mejorar los niveles de CO y propiedades físicas asociadas, aunque sin llegar a alcanzar los valores prístinos. La combinación de la rotación soja-maíz con un cereal de invierno como cultivo de cobertura en SD produjo importantes aportes de C de la biomasa vegetal que incrementaron el stock de carbono del suelo.

El efecto del CC sobre las propiedades del suelo fue más evidente en la secuencia SS que en SM. La inclusión de CC invernales en los sistemas de agricultura continua con cultivos de cosecha estivales puede ser una alternativa de manejo válida para generar cobertura y mejorar el balance de C del sistema de producción, principalmente en planteos con monocultivo de soja. Sin embargo, el uso consuntivo de agua por parte del CC puede afectar de forma importante el agua disponible para el cultivo siguiente, en años en los que las precipitaciones no sean suficientes para la recarga del perfil antes de la siembra del mismo, pudiendo comprometer el rendimiento. Los resultados obtenidos hasta ahora muestran que ésta sería la principal limitante de la inclusión de CC invernales en los sistemas de producción de la RCC.

Acciones a futuro

El valor de los ELD radica en su potencial para generar conocimientos sobre los sistemas de cultivos en distintas escalas temporales. Los ELD son apropiados para medir efectos acumulados en el tiempo sobre distintos tipos de variables respuesta, ya sea del suelo como del cultivo.

Cada experimento incluye un rango de posibilidades que pueden contribuir a la comprensión de resultados tanto inmediatos como de largo plazo. Estas medidas pueden ser tomadas anualmente o en frecuencias menores o mayores, a intervalos regulares o irregulares. Los objetivos a lo largo del tiempo pueden ir reformulándose en función de nuevas tecnologías y contexto productivo del sector agropecuario.

Los ELD a lo largo del tiempo pueden ir modificándose, planteándose nuevas metodologías o estrategias de manejo, pero no hay que dejar de ver su fortaleza. En este caso nos podrían permitir

profundizar en estudios sobre los cambios de la comunidad microbiana por efecto de las labranzas y las secuencias de cultivo luego de más de 30 años de agricultura. Las acciones a futuro se pueden enriquecer día a día.

Bibliografía

- Abril, A; P Salas; E Lovera; S Kopp; N Casado-Murillo. 2005. Efecto acumulativo de la siembra directa sobre algunas características del suelo en la región semiárida central de la Argentina. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 23 (2):179-188.
- Alvarez, C & M Basanta. 2013. Efectos de 30 años de sistemas de labranzas sobre el rendimiento de soja y maíz y el stock de C orgánico en el suelo. *Actas Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos*. Buenos Aires.
- Álvarez, CR; MA Taboada; FH Gutierrez Boem; A Bono; PL Fernández & P Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Álvarez, R & H Steimbach. 2006. Efecto de la agricultura sobre el nivel de materia orgánica. En: Álvarez R (Ed.). *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Editorial Facultad de Agronomía. UBA. Argentina. Pp 41-53.
- Álvarez, R; M Russo; P Prystupa; J Sheiner & L Blotta. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in the Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90: 138-143.
- Andriulo, A; MC Sasal; AB Irizar; SB Restovich & F Rimatori. 2008. Efecto de diferentes sistemas de labranzas, secuencias de cultivos y de la fertilización nitrogenada sobre los stocks de C y N edáficos. En: *Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina*. Galantini JA (eds). Universidad Nacional del Sur. 117-129.
- Arshad, MA; B Lowery & B Grossman. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. P. 123-142. In: J. W.Doran and A. J. Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- Arshad, MA; AJ Franzluebbers & RH Azooz. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil Till. Res.* 53: 41-47.
- Basanta, M & C Alvarez. 2015. Manejo sustentable de sistemas agrícolas en la región central de Córdoba: una experiencia de largo plazo en INTA EEA Manfredi. *RIA* 41 (2): 215-222.
- Basanta, M.; Alvarez, C.; Giubergia, J.P.; Lovera, E. 2012. Cultivos de cobertura em sistemas de agricultura continua en la región central de Córdoba. En: Álvarez, C.; Quiroga, A.; Santos, D.; Bodrero, M. (Eds.) *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. 1° ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 50-57.
- Basanta, M.; Ghiotti, M.L.; Giubergia, J.P.; Lovera, E. 2010. Fracciones de carbono orgánico en un Haplustol bajo sistemas de agricultura continua en la región central de Córdoba. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Disponible en CD.
- Basanta, M; J Giubergia; E Lovera; C Álvarez; E Martellotto; E Curto & A Viglianco. 2008. Manejo del barbecho invernal y su influencia en la disponibilidad hídrica para el cultivo estival en un

Haplustol de la región central de Córdoba. XXI congreso argentino de la ciencia del suelo. San Luis.

Buschiazzo, DE; JL Panigatti & PW Unger. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49: 105-116.

Casagrande, GA & GT Vergara. 1996. Características climáticas de la región. En: Panigatti J; D Buschiazzo & F Babinec. (Ed.) *Labranzas en la región Semiárida Argentina*. p. 11-17.

De la Casa A & G Ovando. 2006. Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. *RIA*, 35: 67-85.

Galarza, C.; Cazorla, C.; Bonacci, F. 2010. Influencia de los cultivos de cobertura en algunas propiedades físicas del suelo en sistemas agrícolas en siembra directa. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario. En CD.

Gorgas, J & JL Tassile. 2003. Recursos naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos. Ed. INTA y Agencia Córdoba Ambiente S.E. 567 pp.

Hang, S; EA Rampoldi & GJ Negro. 2011. Herbicide behavior in relation to soil management. Cap. 3. En: "Herbicides: Properties, Crop Protection and Environmental Hazards" NOVA Publishers. Version on-line: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=16946. Verificado: 01/06/2011.

Jarsun, B; H Bosnero H & E Lovera. 1987. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3163-32 Oncativo. Plan Mapa de suelos (Ed.).

Jarsún, B; JA Gorgas; E Zamora; H Bosnero; E Lovera; A Ravelo & JL Tassile. 2006. Recursos naturales de la Provincia de Córdoba, Los Suelos. Gorgas, JA & JL Tassile (eds.). Publicaciones Técnicas. Agencia Córdoba Ambiente S.E. y INTA Regional Córdoba. Córdoba. 612 pp.

Martínez, J.P.; Barbieri, P.A.; Sainz Rosas, H.R.; Echeverría, H.E. 2013. Inclusion of Cover Crops in Cropping Sequences with Soybean Predominance in the Southeast of the Humid Argentine Pampa. *The Open Agriculture Journal*, 7, (Suppl 1-M2): 3-10.

Mikha, MM; MF Vigil; MA Liebig; RA Bowman; B McConkey; EJ Deibert & JL Pikul. 2006. Cropping system influences on soil chemical properties and soil quality in the Great Plains. *Renewable Agric. Food Syst.* 20: 26-35.

Paustian, K; HP Collins & EA Paul. 1997. Management controls in soil carbon. En: Paul, E.A., et al. (Eds.), *Soil Organic Matter in Temperate Ecosystems: Long Term Experiments in North America*. CRC Press, Boca Rotan, FL, pp. 15-49.

Peirone, LS; MV Basanta; E Lovera; JP Giubergia & C Álvarez. 2008. Propiedades químicas y densidad aparente de un haplustol del centro de la provincia de Córdoba bajo siembra directa y labranza convencional. *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo*. San Luis.

Salas, P; E Lovera; M Basanta; J Giubergia; E Martellotto & A Salinas. 2005. Producción de soja y maíz en función de la rotación y del sistema de manejo en un haplustol típico de la región central de Córdoba. Disponibilidad de agua y rendimiento. EEA INTA Manfredi (Ed.). Argentina. 12p.

Salvagiotti, F.; Vernizzi, A.; Bodrero, M.; Bacigaluppo, S. 2012. Cambios en el corto plazo en distintas fracciones de la materia orgánica en respuesta a la inclusión de cultivos de cobertura en secuencias basadas en soja. En: Álvarez, C.; Quiroga, A.; Santos, D.; Bodrero, M. (Eds.)

Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción. 1° ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 88-91.

Sanzano, G; R Corbella; J García & G Fadda. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ciencia de Suelo* 23 (1): 93-100.

Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinians Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.

Unger, PW. 2002. Conservation Tillage for improving dryland crop yields. *Ciencia del Suelo*, 20(1):1-8.

Vigil, MF & DE Kissel. 1991. Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 757-761.

Villamil, M.B.; Bollero, G.A.; Darmody, R.G.; Simmons, F.W.; Bullock, D.G. 2006. No-Till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. 2006. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 1936-1944.

Evaluación de reposición de nutrientes en experimentos de larga duración del Sudeste de Córdoba

Vicente Gudelj¹; Hugo Ghio²; Olga Gudelj¹, Claudio Lorenzon¹, Maria Belen Conde¹, Juan Pablo Ioele³, Carlos Galarza¹, Pedro Vallone¹, Pablo Tamburrini⁴ & Fernando García⁵

¹ INTA EEA Marcos Juárez, ² AAPRESID, ³ INTA AER Corral de Bustos, ⁴ Agroservicios Pampeanos, ⁵ IPNI Cono Sur

Introducción

El INTA Marcos Juárez tiene una prolongada tradición en experimentos de larga duración (ELD), que se continúan conduciendo hasta el presente. En los mismos se comparan sistemas de labranzas para las secuencias trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* [L.] Merr.), maíz (*Zea mays* L.)-soja, maíz-trigo/soja-soja y para los monocultivos de soja y maíz, incluyendo la siembra directa (SD). También se estudian diferentes secuencias de cultivos que contemplan los principales que se realizan en la región: soja, maíz, trigo, sorgo (*Sorghum* spp.) y girasol (*Helianthus annuus*), incluyendo la fertilización con nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S), la SD y la utilización de cultivos de cobertura (CC). Se evalúan los rendimientos y algunas propiedades de física y química del suelo. Algunos de estos experimentos se comenzaron a mediados de la década de 1970 y, junto a otros iniciados en las décadas de 1980 y 1990, acompañaron de alguna manera el proceso de agriculturización y el incremento de la superficie implantada con soja a partir del segundo quinquenio de la década de 1970. Todos aportaron resultados que sirvieron para realizar recomendaciones con la finalidad de hacer una agricultura más sustentable. Se comprobó que el rendimiento de la soja y maíz pueden aumentarse en un 10% y 37%, respectivamente, cuando ambos se hacían en rotación comparados con el sistema de monocultivo. Asimismo, el rendimiento de trigo fue un 11% superior cuando integró la secuencia trigo/soja-maíz respecto al monocultivo o el monocultivo continuo trigo/soja. Un mejor aprovechamiento del agua de lluvia y del N, surgen como los principales factores que fundamentan los mejores rendimientos cuando los cultivos se incluyen en una secuencia adecuada (Lattanzi, 1989). Respecto a los sistemas de labranza, se corroboró que la SD permitió adelantar la fecha de siembra y ahorrar energía y tiempo en la implantación de los cultivos. Se consiguieron mejores rendimientos de soja cuando se logró controlar las malezas eficientemente, y los rendimientos de trigo mostraron un aumento cuando la soja se implantaba con SD. Las evaluaciones determinaron un menor escurrimiento y que su comienzo se demoraba en SD, con lo que se

consiguió, además, disminuir las pérdidas de suelo principalmente en los primeros estadios de la soja sobre trigo (Marelli & Arce, 1989). El valor final de los niveles de carbono (C) y N en los primeros 5 cm del suelo fue mayor en SD comparativamente con los tratamientos de labranza reducida y convencional. Las secuencias de cultivos que incluyeron gramíneas resultaron las más eficientes para incorporar C y N al suelo comparadas con las de alta proporción de leguminosas (Lattanzi *et al*, 2005 y Marelli *et al*, 2006).

¿Por qué se realizaron experimentos de reposición de nutrientes de largo plazo?

En el año 1986, el INTA Marcos Juárez, a través del Proyecto de Agricultura Conservacionista (PAC), comenzó una experiencia comparativa de la secuencia maíz-trigo/soja-soja implantada con SD continua (SDC) y Labranzas combinadas (LC) (incluía labranza mínima para trigo, labranza vertical para maíz y soja y SD para soja de 2°). Luego de 16 años de experiencia, los cultivos implantados en SDC presentaron en promedio iguales o mejores rendimientos que los implantados en LC, y ambos tratamientos redujeron la brecha respecto de los rendimientos potenciales, comparados con los del área núcleo maicera para el mismo periodo. No obstante, si bien el porcentaje de materia orgánica (MO) creció superficialmente hasta 5 cm, disminuyó respecto a la situación inicial al considerarse mayores profundidades. Hasta 18 cm de profundidad, el deterioro fue menor en SDC que en LC, mientras que de 18 a 30 cm los resultados se invirtieron, dado que los valores de MO fueron mayores en LC. Lo anterior sugirió una estratificación diferente en ambos sistemas producto de que en SDC todos los residuos quedan en superficie y que el mayor volumen de raíces se concentra más superficialmente que en LC. También se vio deteriorada la estabilidad estructural (EE) del suelo respecto a la situación inicial y, si bien, superficialmente los valores de densidad aparente (DA) se mantuvieron por debajo de los considerados críticos para el tipo de suelos involucrado: Argiudol típico de la serie Hansen con textura franco-limosa (INTA, 1985), sub-superficialmente, a 5-12 cm y 12-17 cm, los valores en SDC fueron significativamente mayores que los de LC, acercándose al límite crítico. Los resultados mencionados anteriormente se atribuyeron a un buen manejo del agua a través de la SDC y a un insuficiente aporte de nutrientes mediante fertilización, por lo que esos buenos rendimientos se lograron a expensas del deterioro del suelo (Gudelj *et al.*, 2002). Efectivamente, al realizar el balance de los principales nutrientes, a finales de la década de 1990 se observó que había sido negativo para N, P y S. Frente a este panorama y a partir de los resultados de las experiencias de los ELD de INTA, la hipótesis que se planteó fue que la utilización de una

estrategia de fertilización de manera de reponer los principales nutrientes: N, P y S, entre otros, que se llevan los granos cosechados, permitiría lograr mayores rendimientos, mayores aportes de residuos y restitución de nutrientes al suelo, con lo cual se lograría frenar el deterioro químico, mejorar la fertilidad física del suelo y contribuir a una agricultura sustentable. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la reposición de nutrientes sobre el rendimiento de los cultivos y algunas propiedades químicas (pH, contenidos de P, potasio (K), boro, zinc y MO) y físicas (DA y EE) del suelo.

Características de los experimentos y metodologías utilizadas

Desde el ciclo 1999-2000, en el área de la EEA INTA Marcos Juárez se condujeron dos experiencias con diferentes alternativas de fertilización en la secuencia maíz-trigo/soja con todos los cultivos implantados bajo SD. Los lotes donde se realizaron las experiencias están ubicados en los establecimientos “Don Osvaldo” (DO), (33° 11' 20,09" Lat. S – 61° 58' 49,34" Long. O) y “Los Chañaritos” (LCH), 33° 17' 3,43" Lat. S – 64° 7' 9,08" Long. O) en las zonas rurales de Camilo Aldao y Corral de Bustos, provincia de Córdoba, respectivamente. El clima es templado con 16,5°C de temperatura media anual, sub-húmedo húmedo con un promedio anual de 830 mm, exceso hídrico en primavera y sequía estival; el primero atenúa a la segunda, y los suelos son Argiudoles típicos de la serie Hansen (INTA, 1985). Al inicio de la experiencia, DO tenía una historia agrícola de 31 años de agricultura continua con sólo dos pasturas en los últimos 100 años, 2,4 % de MO y 8 mg.kg⁻¹ de P extractable (Pe) hasta 18 cm de profundidad. El pH del suelo era 6,1 y 6,2 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Por otro lado, LCH contaba con 12 años de agricultura continua (AC), 3,12 % MO y 15 mg.kg⁻¹ de Pe. El pH del suelo era 6,2 y 6,25 de 0-5 cm y 5-18 cm de profundidad, respectivamente. Es necesario aclarar que LCH, además de la mejor condición inicial de suelo del sitio, presentó napas de agua a escasa profundidad, de donde las raíces de los cultivos pudieron haberse abastecido de agua en periodos secos. En cambio, en el sitio DO las napas estaban a mayor profundidad fuera del alcance de las raíces. Los experimentos se realizaron a campo en franjas contiguas y cada tratamiento tuvo una superficie de 6300 m² en DO y 3600 m² en LCH. Los tratamientos que se evaluaron fueron los siguientes: 1) testigo sin fertilizar (T); 2) azufre (S); 3) nitrógeno (N); 4) nitrógeno + fósforo (NP); 5) nitrógeno + fósforo + azufre (NPS) (para estos tratamientos se utilizó la dosis que utiliza el productor medio de la zona que en promedio fue de 80 kg.ha⁻¹ de N, 17 kg.ha⁻¹ de P y 15 kg.ha⁻¹ de S, para maíz, y 80 kg.ha⁻¹ de N, 21 kg.ha⁻¹ de P y 14 kg.ha⁻¹ de S, para trigo/soja) 6) nitrógeno + fósforo + azufre de reposición (NPSr) (se reponen el nitrógeno,

fósforo y azufre que se llevan los granos con la cosecha) y 7) NPSr + micronutrientes (NPSrm) (igual al tratamiento 6, más reposición de zinc y boro). La determinación de la dosis de reposición se realizó en función de un rendimiento objetivo definido para cada cultivo y de los requerimientos por tonelada de grano de cada uno de ellos, utilizando el valor referenciado por el Instituto Internacional de Nutrición de Plantas (García & Correndo, 2016). Se consideró que un 60% del N de la soja proviene de la fijación biológica, según lo evaluado por Salvagiotti *et al.* (2015). Para la determinación de rendimientos de los cultivos se cosechó toda la parcela.

El estudio comprendió el periodo 1999-2015/6 y se invalidó la comparación entre sitios, dado que cuando en uno de ellos se implanta maíz en el otro se implanta trigo/soja, y viceversa. Se determinó la eficiencia de uso del agua de los cultivos a partir de los promedios de rendimientos y de precipitaciones durante el ciclo de los mismos entre 1999 y 2013. Para la caracterización de las propiedades edáficas se tomó una muestra compuesta inicial en cada uno de los tratamientos en ambos experimentos y luego se continuó con el monitoreo alternativamente un año en DO y otro en LCH. A partir de 2004 en LCH y 2005 en DO, en los tratamientos más contrastantes (T, NPS, NPSr y NPSrm) se definieron tres sitios de muestreo en los que se tomó una muestra conformada por 18 sub-muestras para cada una de las siguientes profundidades 0-5, 5-10, 10-18 y 18-30 cm, para la determinación de las propiedades químicas. Las profundidades de 0-18 cm y 0-30 cm se estimaron de acuerdo a los análisis realizados y ponderando por profundidad. Para EE se extrajeron muestras de 0-10 cm y, para DA, se lo hizo cada 5 cm hasta los 25 cm de profundidad. Las variables que se determinaron fueron: rendimiento ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), Pe (Bray & Kurtz, 1945), potasio intercambiable (Ki) (Dewis & Freitas, 1970), boro con el método del fosfato monocálcico (Watson, 1998) y zinc, a través del test DPTA (Lindsay & Norvell, 1978), pH (1:2,5 suelo:agua), C orgánico total (COT) utilizando el método Walkley y Black (1934), modificado por Greweling & Peech (1960). La determinación de EE se realizó empleando el método de cambio en el diámetro medio ponderado de agregados (CDMP) (De Boodt & De Leenheer, 1967) y el resultado se expresó como milímetro de CDMP (a menor CDMP mejor EE). Para DA se utilizó el método del doble cilindro de volumen conocido (Blake & Hartge, 1986). Para el análisis de los resultados de las variables edáficas se utilizaron modelos lineales mixtos, teniendo en cuenta los efectos de tratamientos, año y la interacción. Se compararon las medias de los tratamientos con el test LSD de Fisher (5%).

Finalmente, se hizo una comparación de los promedios de rendimientos de NPSr (1999-2015) con los obtenidos en promedio en el Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms.Jz.), en base a datos de

MINAGRI “Guida Daza, INTA Marcos Juárez, com. pers.” y con los obtenidos en promedio por productores con suelo de capacidad de uso I y II sin limitaciones y con un 50% de la superficie con napas cercanas, que utilizan la secuencia maíz-trigo/soja-soja en SD, en base a información de grupos CREA Monte Buey e Inrville, Provincia de Córdoba “Peretti & Cottura, INTA Marcos Juárez-CREA, com. pers.”

Efecto sobre los rendimientos

En el experimento DO con mayor historia agrícola previa (Tabla 1), en promedio para maíz, hubo respuesta a la aplicación de S y N: los tratamientos S y N tuvieron un plus de rendimiento del 40,6% y 43,7%, respectivamente, en relación con el T. A pesar que el lote estudiado contaba con bajo contenido de P en su caracterización inicial, cuando se comparó N con NP no se apreció mayor diferencia por el agregado de P, pero se produjo un sinergismo cuando se utilizaron los tres nutrientes conjuntamente: el tratamiento NPS superó en un 29,2% a NP. Lo anterior marca la importancia de fertilizar considerando todos los nutrientes que se diagnostiquen como deficientes. Con los tratamientos de reposición, NPSr y NPSrm, se obtuvieron los mejores rendimientos superando en un 15% y 12%, respectivamente, a NPS. Algo similar ocurrió con el trigo donde se logró un 32.5% más de rendimiento en los tratamientos S y N respecto de T. En este cultivo cobró mayor importancia la aplicación de P dado que el tratamiento NP produjo en promedio un 30% más de rendimiento que N. Las menores temperaturas por la época del año en el que se desarrolla este cultivo, puede que hayan hecho cobrar mayor importancia a la aplicación de P. Según Garcia *et al* (2014) las bajas temperaturas reducen la difusión y absorción de P; por otra parte, las plantas responden a las aplicaciones de arranque en suelos fríos y húmedos, aun cuando los niveles de P en suelo sean altos (Potash & Phosphate Institute, 1997).

Tabla1: Rendimiento promedio de los cultivos (8 años trigo/soja y 9 años maíz) en el sitio Don Osvaldo en el periodo 1999-2015. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Cultivo	T	S	N	NP	NPS	NPSr	NPSrm
<i>kg.ha⁻¹</i>							
Maíz	4884	6867	7020	7173	9270	10662	10387
Trigo	1901	2520	2517	3276	4038	4495	4512
Soja	2855	3893	2373	2609	3889	3838	3746

Cuando se combinaron los tres nutrientes también se produjo aumento del rendimiento, NPS incrementó el rendimiento en un 30% respecto de NP. Al igual que en maíz los mejores rendimientos de trigo se consiguieron con las dosis de reposición que lograron en promedio un 11,5% más de rendimiento que NPS. En soja, la única respuesta que se observó fue a la aplicación de S, obteniéndose un plus de 36,4% de rendimiento al comparar S con T. Por otra parte, cuando se aplicó N se manifestó una depresión del rendimiento con los tratamientos N y NP que no ocurrió cuando se lo utilizó en el tratamiento NPS. Lo anterior indicó la marcada limitación de S del sistema, el trigo utilizó el poco S disponible induciendo a una mayor deficiencia de este nutriente en la soja posterior. Al comparar NPSrm con NPSr se puede observar que en ninguno de los tres cultivos hubo respuesta a la aplicación de micronutrientes. Los valores de zinc y boro al final de la experiencia (Figuras 5 y 6) estuvieron por encima de los considerados críticos, 1 mg.kg⁻¹ para zinc en maíz (Barbieri *et al.* 2015) y 0,6 mg.kg⁻¹ para boro (Reussi Calvo, Unidad Integrada Balcarce EEA INTA-FCA UNMP, com pers.), lo que podría explicar la falta de respuesta en los rendimientos por la aplicación de estos nutrientes.

En el sitio LCH con menor historia agrícola previa, los cultivos expresaron un mayor potencial de rendimiento (Tabla 2) debido a una mejor condición del suelo y también a la cercanía de la napa que pudo haber morigerado el déficit hídrico en años con menores precipitaciones. En maíz, al comparar los tratamientos S y T, no se observó respuesta a la aplicación de S quizás debido al mayor contenido inicial de MO de este lote. Por otra parte, se observó respuesta a N, el tratamiento N aumentó el rendimiento un 34,3% respecto de T; respuesta a P, el tratamiento NP aumentó el rendimiento un 5,2% respecto de N; en tanto que, el S cobró importancia cuando se agregó al tratamiento NP, dado que NPS mejoró el rendimiento en un 10,7% respecto de NP. Los mejores rendimientos se obtuvieron con los tratamientos NPSr y NPSrm que superaron en un 8,7% y 10,1%, respectivamente, al tratamiento NPS. Además, se observó una mejora de 0,2 t.ha⁻¹ de rendimiento por la aplicación de micronutrientes al comparar NPSr con NPSrm. Los valores de zinc y boro al final de la experiencia fueron superiores al umbral crítico, aunque habría que considerar que el rango de concentración crítica es mayor, llegando hasta 2 mg.kg⁻¹ para ambos nutrientes (Echeverría *et al.* 2014) donde es menos probable pero posible de obtener respuesta. Respecto del trigo, hubo respuesta a los tres nutrientes aplicados, obteniéndose un incremento del 11,4%, 61% y 15,8% en los rendimientos, al comparar los tratamientos S con T, N con T y NP con N, respectivamente. Los tratamientos de reposición, NPSr y NPSrm, superaron en promedio en 10% al tratamiento NPS y no hubo diferencia por la aplicación de micronutrientes entre ellos.

Tabla 2: Rendimiento promedio de los cultivos (9 años trigo/soja y 8 años maíz) en el sitio Los Chañaritos, periodo 1999-2015. T: testigo sin fertilizar; S: azufre; N: nitrógeno; NP: N+ fósforo; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Cultivo	T	S	N	NP	NPS	NPSr	NPSrm
	<i>kg.ha⁻¹</i>						
Maíz	8276	8036	11112	11692	12938	14068	14251
Trigo	2591	2887	4170	4830	5245	5783	5738
Soja	3167	3337	2749	3260	3437	3390	3400

En el cultivo de soja se apreció respuesta a la aplicación de S y de P, obteniéndose un plus de 5,4% y 18,6% de rendimiento, al comparar los tratamientos S con T y NP con N, respectivamente. La aplicación de N deprimió el rendimiento cuando se aplicó solo, pero no cuando se aplicó conjuntamente con P o con P + S. Los menores rendimientos obtenidos donde solo se aplicó N, tratamiento N, indicarían que el trigo de alto rendimiento deja el suelo con déficit de P y S a la soja posterior. Además, no se observa respuesta por la aplicación de micronutrientes al comparar NPSrm con NPSr. En la Figura 1 es posible apreciar el rendimiento relativo de los tratamientos NPS, NPSr y NPSrm respecto del tratamiento T, para cada año y cultivo en ambas experiencias y observar los factores por los cuales en algunos años los tratamientos NPSr y NPSrm no se diferenciaron del tratamiento NPS. En el sitio DO, para los cultivos gramíneas, el rendimiento de los tratamientos de reposición superó al del tratamiento NPS, excepto en dos años en que por bajas precipitaciones los rendimientos se igualaron (Figura 1a y 1b). Es necesario aclarar que en el ciclo 2012 por problemas de comercialización el productor decidió no sembrar trigo, e implantó cebada y los tratamientos de reposición no se pudieron cosechar dado el vuelco total que sufrieron (Figuras 1b). En el cultivo de soja solo se reflejó respuesta a la aplicación de S sin mayores diferencias entre los tratamientos fertilizados con este nutriente, cuyos rendimientos en 2010 cayeron por debajo del testigo debido a que las precipitaciones durante el ciclo de la soja fueron el 58% del promedio histórico, por lo que el tratamiento testigo al tener un antecesor con menor rendimiento quizás se haya beneficiado con una mayor reserva de agua inicial (Figura 1c). En el sitio LCH, para los cultivos gramíneas, el rendimiento de los tratamientos de reposición superó al tratamiento NPS, excepto en algunos años en los que por déficit hídrico (tres años en maíz y dos en trigo) y exceso de precipitaciones (un año en maíz), los rendimientos se igualaron e incluso en un año, en trigo, cayeron por debajo del logrado por NPS al ser más afectados por roya del tallo (Figuras 1d y 1e). Para el cultivo de soja, se observa que no hubo mayores diferencias entre los tratamientos de reposición y NPS. Todos se diferenciaron del T en

forma creciente en el transcurso de la experiencia, que se explicaría por el déficit de S que se acentúa con el paso del tiempo en el tratamiento sin fertilizar con este nutriente. En 2015 la soja no se cosechó dado que, por ascenso de la napa, el experimento estuvo bajo agua durante una gran parte del ciclo y se terminó perdiendo el cultivo (Figura 1f).

En síntesis, en la mayoría de los años se obtuvieron mejores rendimientos en los cultivos gramíneas cuando se utilizaron las dosis NPSr y NPSrm. En los años donde esto no ocurrió, en casi todas las situaciones, el déficit hídrico, fundamentalmente en periodos críticos de los cultivos, explicaría ese diferente comportamiento. Los pronósticos climáticos podrían ayudar a definir cuándo sería necesario reducir las dosis de reposición y cuando utilizarlas para disminuir las brechas de rendimientos. Considerando los rendimientos potenciales de secano, en la región en estudio, 12000, 5300 y 4400 kg.ha⁻¹ para maíz, trigo y soja, respectivamente (Aramburu Merlos *et al.*, 2016), en el sitio DO, sin napas cercanas, se consiguió el 76% y el 85% en trigo y 77% y 89% en maíz para las dosis NPS y NPSr, respectivamente. En el sitio LCH, con napa cercana, el tratamiento NPS logró esos rendimientos en trigo y maíz y un 85% del rendimiento potencial de soja estimado de la región, y con la reposición de nutrientes se superó ese potencial en un 9% y 17% para trigo y maíz, respectivamente, lo que indica la mayor importancia de aumentar las dosis de fertilización en ambientes donde la napa de algún modo asegura la provisión de agua para el cultivo.

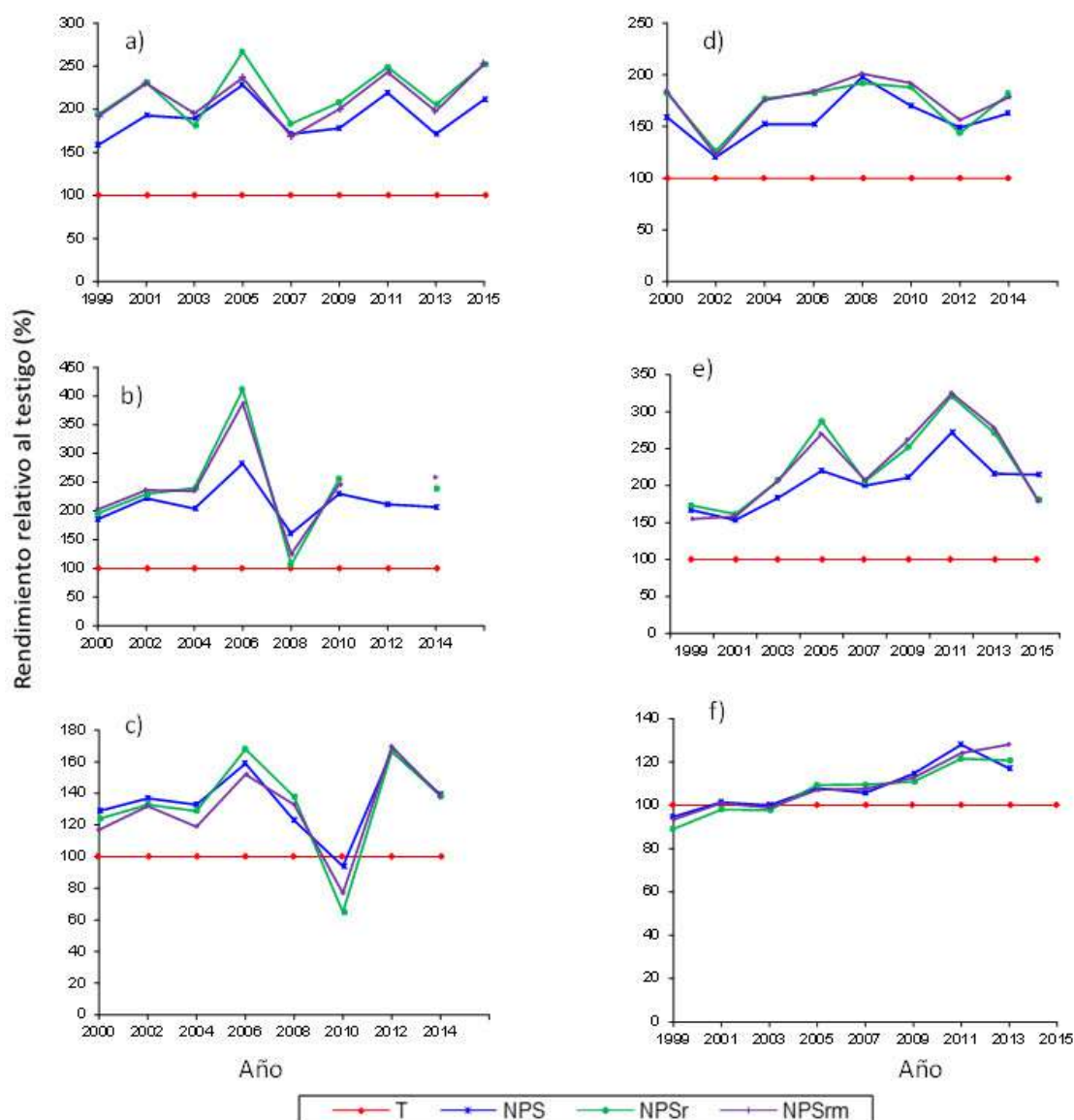


Figura 1: Evolución de los rendimientos relativos en el sitio Don Osvaldo: a) Maíz (1999-2015), b) Trigo (2000-2014) y c) Soja (2000-2014); y en el sitio Los Chañaritos: d) Maíz (2000-2014), e) Trigo (1999-2015) y f) Soja (1999-2015). T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Efecto sobre la eficiencia de uso del agua

En la Tabla 3, se presenta la estimación de la eficiencia de uso del agua de cada cultivo para los tratamientos contrastantes de DO. Se puede observar una mayor eficiencia en los tratamientos de reposición para los cultivos gramíneas a partir de los mejores rendimientos obtenidos con la misma disponibilidad de agua durante el ciclo. Para soja, la diferencia se dio sólo entre los tratamientos

fertilizados y el testigo sin fertilizar, dado que la única respuesta a la fertilización es por la aplicación de S. Obsérvese la mejor eficiencia de los cultivos de gramíneas respecto de la leguminosa, principalmente cuando se fertilizó.

Tabla 3: Eficiencia de uso del agua en el sitio Don Osvaldo, periodo 1999-2013. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Tratamientos	T	NPS	NPSr	NPSrm
Cultivos	kg de grano.mm ⁻¹ de agua disponible			
Maíz	9,6	17,5	19,7	19,3
Trigo	8,2	17,6	19,8	19,8
Soja	6,2	8,3	8,0	7,9

Balance de nutrientes

En la Tabla 4 se muestra el balance de nutrientes del periodo 1999-2015. En ambas experiencias, para los tratamientos T y NPS, el balance resultó negativo sugiriendo que buena parte del rendimiento obtenido se hizo a expensas de los nutrientes del suelo.

Tabla 4: Balance de nutrientes (kg.ha⁻¹). T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Sitio	Don Osvaldo 1999-2015				Los Chañaritos 1999-2015			
Balance	Testigo	NPS	NPSr	NPSrm	Testigo	NPS	NPSr	NPSrm
N	-1028	- 619	1239	1278	-1509	-1072	497	480
P	- 277	-170	219	232	- 390	- 259	114	111
S	- 144	- 15	173	144	- 200	- 27	98	95

En los tratamientos NPSr y NPSrm, el balance fue positivo y especialmente en DO, en que lo aplicado excedió (Tabla 4) a lo exportado con la cosecha de los granos. En este aspecto, fue determinante que, sobre todo en la segunda mitad de la experiencia, se fijaron rendimientos objetivos altos; en general, 15, 6 y 4 t.ha⁻¹ de maíz, trigo y soja, respectivamente. En LCH, los rendimientos promedio obtenidos estuvieron cercanos a ese objetivo, pero en DO fueron más bajos (Tablas 1 y 2). La presencia de napas cercanas en LCH pudo haber ayudado a conseguir ese rendimiento más próximo al objetivo establecido. Sería de mayor importancia considerar anualmente los pronósticos climáticos para definir los rendimientos objetivos, de manera de lograr un mejor ajuste de las dosis aplicadas de los nutrientes con alta movilidad, como el N que está sujeto a pérdidas con impacto ambiental. Si bien se

probó la fertilización de reposición experimentalmente, la mejora del balance de N se debería apoyar también en la utilización de leguminosas en la rotación que puedan incorporar N en forma orgánica. Respecto de ello, en una experiencia en el área de la EEA INTA Marcos Juárez, el rendimiento del cultivo de maíz sin fertilización nitrogenada implantado sobre el cultivo de vicia utilizado como cobertura, igualó el rendimiento del maíz, sobre rastrojo de soja, fertilizado con 120 kg de N, y además, el CC aportó 7500 kg de materia seca ha⁻¹ de suma importancia para contribuir al aumento del stock de C del suelo. (Gudelj, V *et al*, 2010).

Efecto sobre las propiedades químicas del suelo

Se presentan los resultados del efecto de los tratamientos contrastantes sobre: pH, Pe, Ki, boro, zinc y COT.

P extractable

En la Tabla 4 se aprecia un balance positivo de P en los tratamientos de reposición y negativo en el T y NPS. En la Figura 2 se observa el resultado de los promedios ponderados de 0-30 cm desde 1999 hasta 2013 para el sitio DO. Se observan diferencias entre tratamientos, entre años e interacción de año por tratamiento. Los tratamientos partieron de un mismo valor en 1999 y se diferenciaron significativamente en 2013. El balance de P para ese periodo, considerando lo exportado por la cosecha de los granos y lo aportado vía fertilizante, resultó negativo para el tratamiento T (-218 kg) y NPS (-114 kg), mientras que el de reposición fue positivo (+211 kg). No obstante, si bien la evolución del Pe en el tratamiento NPSr es creciente hasta alcanzar los 38 mg.kg⁻¹ en 2013, en los otros dos tratamientos con balance negativo, el Pe mantiene los mismos valores en 2013 que en 1999. El Pe incrementó en 31 mg.kg⁻¹ (valor final 38 mg.kg⁻¹ – valor inicial 7 mg.kg⁻¹). El balance fue positivo en 211 kg de P que se puede asimilar a 1055 kg de superfosfato triple. Del cociente entre 1055 kg SPT y 31 mg.kg⁻¹ Pe, resultan los 34 kg de SPT que fueron necesarios para aumentar en 1 mg.kg⁻¹ el Pe en el suelo una vez cubierta la extracción de P de los cultivos. Este valor es un poco más bajo que el obtenido en una experiencia en similar tipo de suelo, pero donde, además de la reposición de nutrientes en cada año, se aplicó un plus de P al inicio de la experiencia (Gudelj *et al*, 2016).

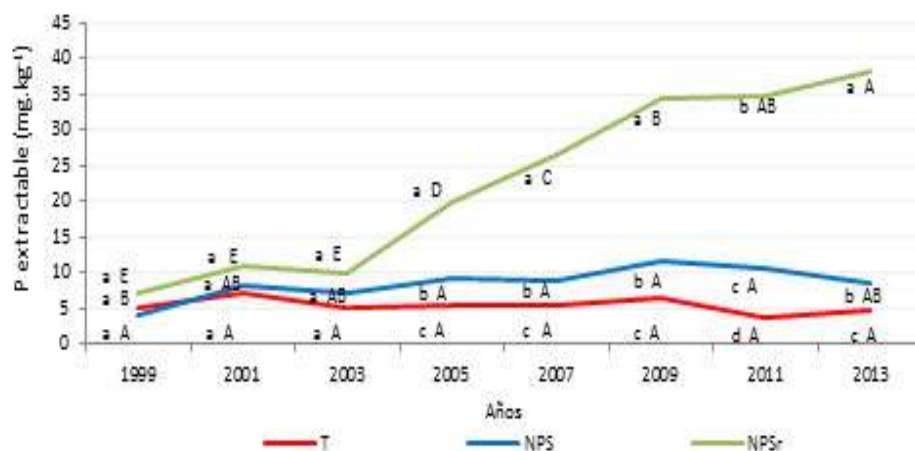


Figura 2: Evolución del P extractable a la profundidad de 0-30 cm para el sitio Don Osvaldo en el periodo 1999-2013. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas lectura vertical).

En la Figura 3 se presenta el resultado de los promedios ponderados de 0-30 cm de Pe desde 2004 hasta 2010 para el sitio LCH. Se puede observar que el T mantuvo los valores iniciales, el tratamiento NPS disminuyó y el NPSr incrementó el Pe, dicho incremento fue de menor magnitud que en el sitio DO producto de que en LCH, debido a mejores condiciones ambientales y fundamentalmente a la cercanía de la napa freática, los rendimientos obtenidos fueron más cercanos al rendimiento objetivo establecido.

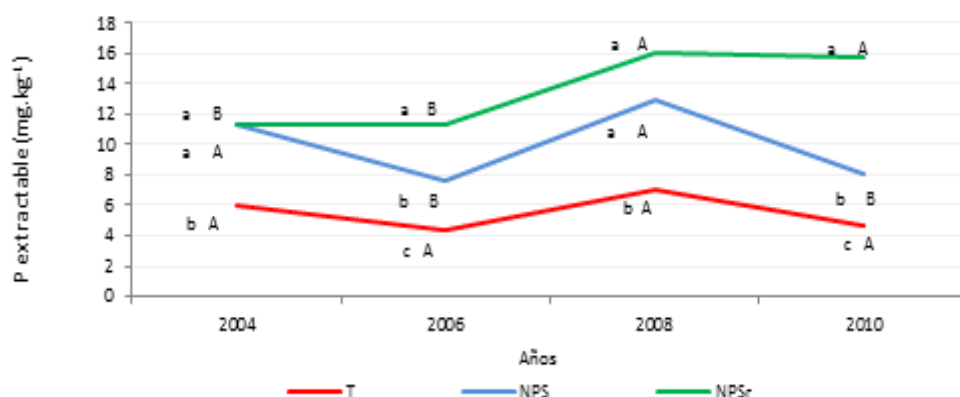


Figura 3: Evolución del Pe a la profundidad de 0-30 cm para el sitio Los Chañaritos en el periodo 2004-2010. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas lectura vertical).

Potasio

Solo se presenta la evolución del Ki en el periodo 1999-2013 para el sitio DO (Figura 4). En los tres tratamientos evaluados se observa un descenso similar del Ki a través de los años, sin diferencia entre tratamientos en 2013. El balance de K, si bien es más negativo en los tratamientos NPS (-708 kg.ha⁻¹ de K) y NPSr (-742 Kg.ha⁻¹ de K), también lo es, aunque en menor magnitud, en el tratamiento T (-472 kg.ha⁻¹ de K) dado que los rendimientos de la soja, fundamentalmente en los primeros años del experimento, no diferían mucho y es este cultivo el que más K exporta, 17 kg respecto de los 3 kg y 3,4 kg que exportan el trigo y el maíz por tonelada de grano cosechado (García & Correndo, 2016). Queda también la posibilidad que los cultivos estén tomando K de mayor profundidad y como una gran parte vuelve con los rastrojos al suelo, se podrían estar beneficiando las capas superficiales de suelo a expensas de capas más profundas, lo que podría estar enmascarando las diferencias entre tratamientos en los primeros 30 cm. Lo anterior se sustenta en mediciones realizada en el mismo tipo de suelo donde se determinó 730 mg.kg⁻¹ de Ki y 634 mg.kg⁻¹ de Ki para los espesores 30-60 cm y 60-100 cm, respectivamente "Gudelj, VJ, datos no publicados". A partir de las caídas de 215 mg.kg⁻¹ de Ki en el suelo durante el periodo de estudio y considerando la exportación de este nutriente con la cosecha de los granos de 472 kg, 708 kg y 742 kg, se estimaron balances negativos de 2,2; 2,29 y 3,45 kg de K para perder 1 mg.kg⁻¹ de ki en los tratamientos T, NPS y NPSr, respectivamente.

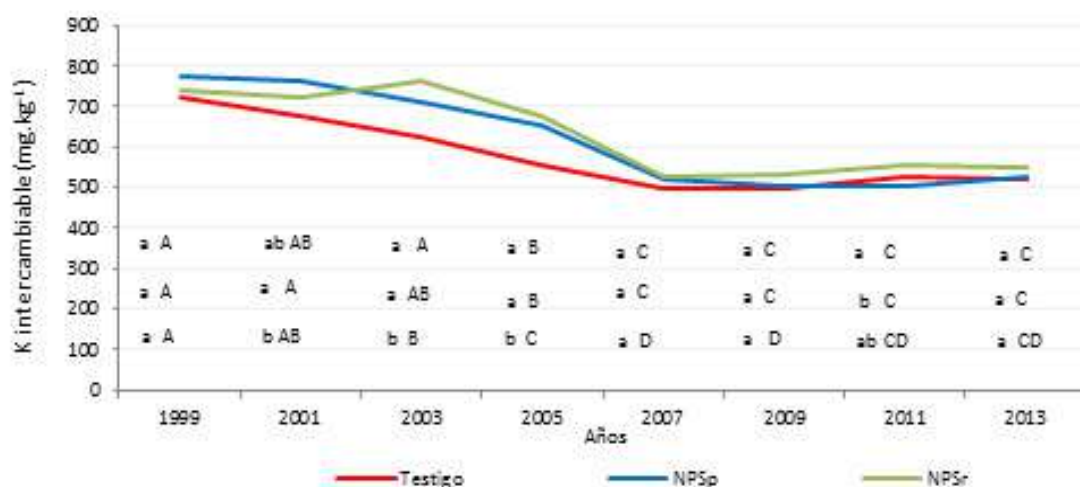


Figura 4: Evolución del K intercambiable a la profundidad de 0-30cm para el sitio Don Osvaldo en el periodo 2004-2010. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas lectura vertical).

Otros dos nutrientes que se aplicaron casi todos los años en el tratamiento NPSrm, son el zinc y el

boro. El balance de estos nutrientes en cada sitio experimental se presentan en la Tabla 5. En el inicio de la experiencia los valores de zinc disponibles estuvieron por encima de 1 mg.kg⁻¹ y 2 mg.kg⁻¹ en DO y en LCH, respectivamente, lo que indicaría el efecto de la agriculturización sobre la disponibilidad de este elemento al ser tan diferentes las historias agrícolas previas de ambos sitios. Al final de la experiencia en los tratamientos sin fertilizar con zinc, los valores se mantienen por encima de 1 mg.kg⁻¹ en el sitio DO y caen por debajo de 2 mg.kg⁻¹ en el sitio LCH. En ambos sitios, en el tratamiento fertilizado con zinc los valores crecieron y se diferenciaron significativamente de los no fertilizados (Figuras 5a y 5b).

Tabla 5: Balance de micronutrientes para los sitios Don Osvaldo en el periodo 1999-2013 y Los Chañaritos en el periodo 1999-2014. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Micro nutriente	DON OSVALDO				LOS CHAÑARITOS			
	T	NPS	NPSr	NPSrm	T	NPS	NPSr	NPSrm
	kg.ha ⁻¹							
Boro	-0,5	-0,89	-0,97	7,44	-0,76	-1,17	-1,26	11
Zinc	-1,97	-3,37	-3,67	46,9	-2,96	-4,43	-4,63	49

Para el sitio DO considerando el valor inicial y final del zinc disponible en el tratamiento donde se fertilizó con este elemento, hubo una diferencia de 5,23 mg.kg⁻¹ que reflejaron el aumento en la disponibilidad en el tratamiento NPSrm luego de la aplicación de 46,9 kg.ha⁻¹ de zinc, por encima del consumo, desde 1999 a 2013. El cociente de 46,9 kg.ha⁻¹ y 5,23 mg.kg⁻¹ indica que hicieron falta 9 kg.ha⁻¹ de zinc para aumentar 1 mg.kg⁻¹ la disponibilidad de este nutriente en el suelo. Similar resultado se obtuvo para el sitio LCH.

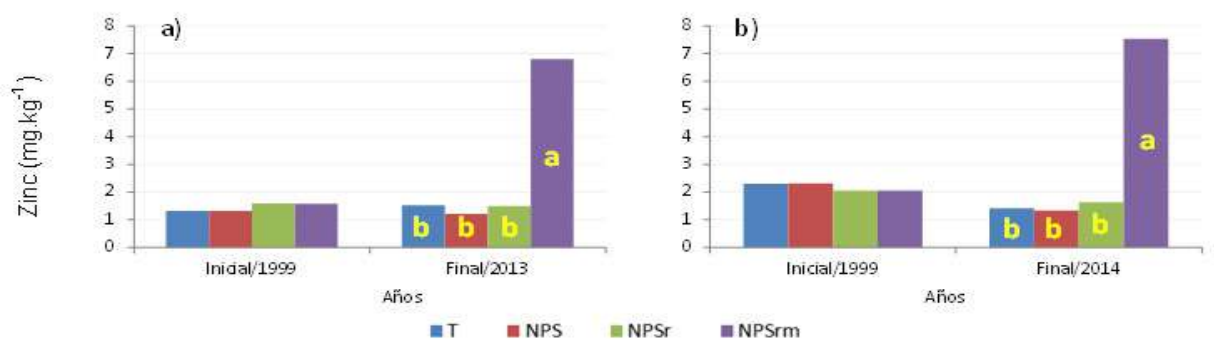


Figura 5: Evolución del zinc disponible de 0-18 cm de profundidad en los establecimientos a) Don Osvaldo y b) Los Chañaritos. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes

En general en ambos sitios, los valores iniciales de boro estuvieron por debajo de 1 mg.kg^{-1} . Los valores finales de los tratamientos sin fertilizar, en DO fueron cercanos al valor crítico ($0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$) y alrededor de $0,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ en LCH, sin diferencias significativas, en ambos casos, entre estos tratamientos. El valor final del tratamiento fertilizado con boro en ambas experiencias, se diferenció significativamente de los tratamientos no fertilizados con este elemento alcanzando el valor de $1,01 \text{ mg.kg}^{-1}$ y $1,48 \text{ mg.kg}^{-1}$, en DO y LCH, respectivamente.

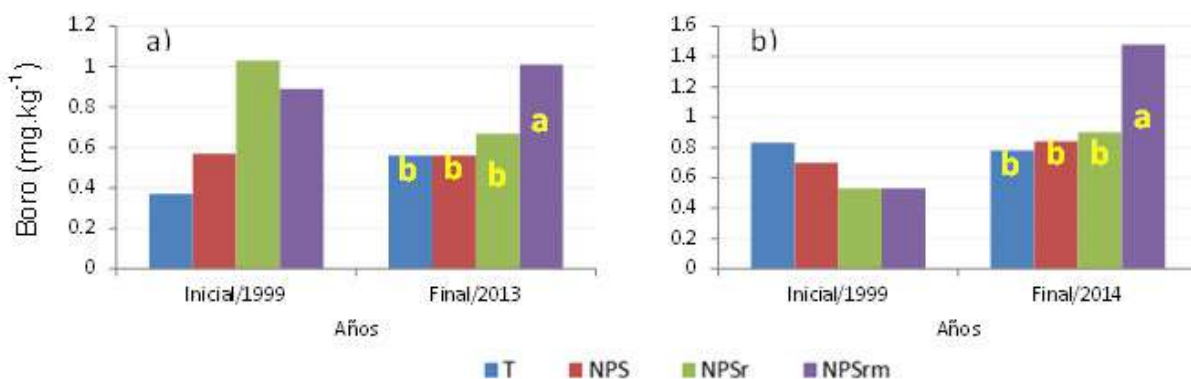


Figura 6: Evolución del boro disponible de 0-18 cm de profundidad en los establecimientos a) Don Osvaldo y b) Los Chañaritos. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Ídem NPSr + reposición de micronutrientes.

Acidez del suelo

En la Figura 7 se muestra la evolución de la acidez del suelo en ambas experiencias. Al comparar los valores de pH en los años extremos del periodo analizado, en el tratamiento T se produjo un aumento en todas las profundidades (Figuras 7 a, b, c, d y e), excepto en LCH 10-18 cm en que no se modificó (Figura 7 f). El tratamiento NPS tuvo un comportamiento diferente: en DO el valor de pH se mantuvo en las profundidades de 0-5 cm y 10-18 cm (Figuras 7 a y c) y aumentó significativamente en 5-10 cm (Figura 7 b); en tanto que en LCH, cayó significativamente en las dos primeras profundidades (Figuras 7 d y e) y se mantuvo en 10-18 cm (Figura 7 f). Algo similar ocurrió para los tratamientos NPSr y NPSrm donde en DO, en todas las profundidades, los valores de pH no difirieron significativamente al comparar el primer y último año del periodo analizado; en cambio, en LCH en ambos tratamientos se produjo una disminución significativa de los valores de pH para 0-5 cm (Figura 7 d) y también en el tratamiento NPSrm de 5-10 cm (Figura 7 e), pero se mantuvieron en la profundidad de 10-18 cm en ambos tratamientos (Figura 7 f) y en 5-10 cm en el tratamiento NPSrm (Figura 7 e). En el último año analizado de cada experiencia los valores del tratamiento T se

mantuvieron en todas las profundidades por encima del valor 6 diferenciándose significativamente de los tratamientos de reposición que alcanzaron valores alrededor de 5,5 superficialmente y 6 en la profundidad de 10-18 cm. También para este último año, en superficie, el tratamiento T tuvo valores de pH significativamente superiores a NPS que alcanzó valores alrededor de 6 en DO y de 5,7 en LCH. La mayor acidez del suelo en los tratamientos fertilizados podría deberse, además de una mayor remoción de bases por la cosecha, a que se utilizaron fuentes de fertilizantes que contienen NH_4^+ o que lo producen en su proceso de descomposición como es el caso de la urea. Cuando en el proceso de nitrificación el NH_4^+ pasa a NO_3^- se liberan iones H^+ que acidifican el suelo.

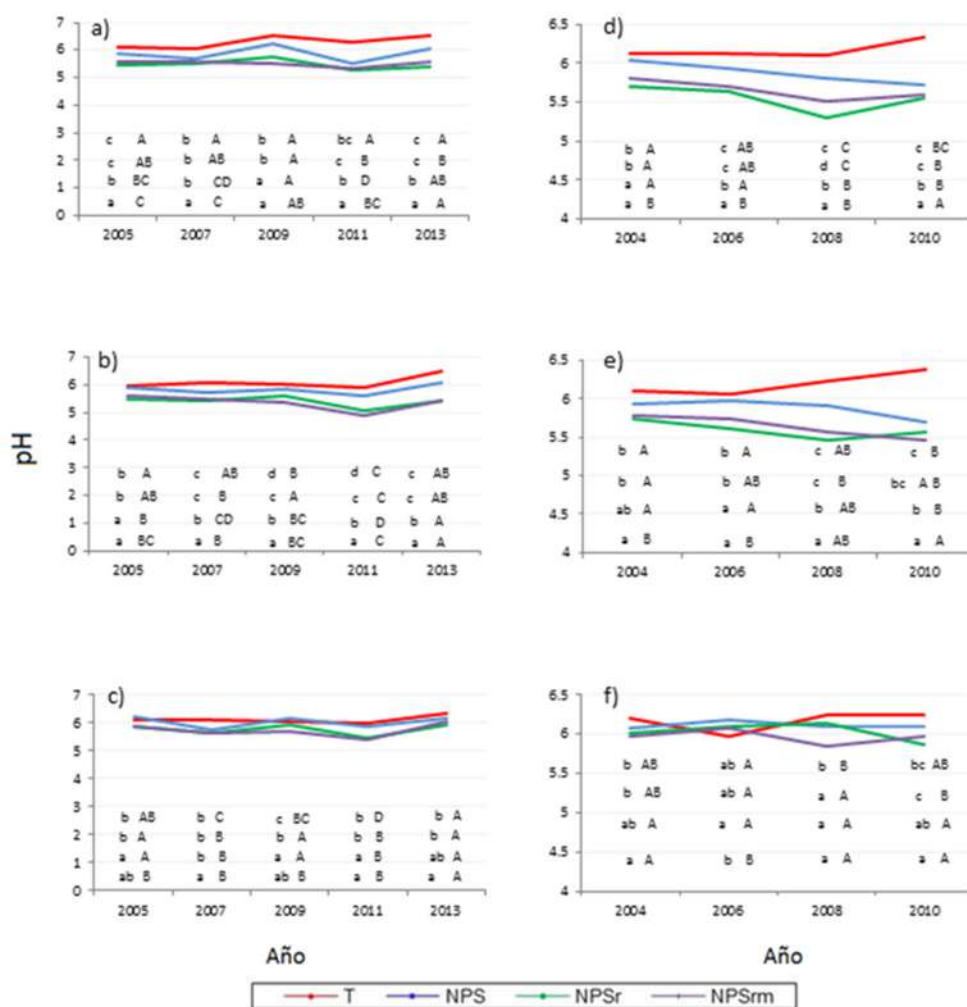


Figura 7: Evolución del pH en el sitio Don Osvaldo (2005-2013): a) 0-5cm, b) 5-10cm y c) 10-18cm; y en el sitio Los Chañaritos (2000-2014): d) 0-5cm, e) 5-10cm y f) 10-18 cm. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes. Lectura de las letras de los tratamientos de abajo hacia arriba: T, NPS, NPSr y NPSrm. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas lectura vertical).

La acidificación generada por los fertilizantes amoniacales es de mayor impacto cuando se aplican excesos de N, es decir con balances de N positivos en los tratamientos NPSr y NPSrm.

También la MO puede tener incidencia en la acidificación. Cuando el proceso de mineralización descompone la MO del suelo, el primer producto nitrogenado es el NH_4^+ que al pasar a NO_3^- libera H^+ que causa acidificación (Potash & Phosphate Institute, 1997). Esto último también podría explicar la mayor acidificación observada en el sitio LCH dado el mayor contenido de MO que tenía este lote al inicio de la experiencia en relación al sitio DO. De todos modos, en ambas experiencias, los valores de pH se mantuvieron dentro del rango en que no afectan a los cultivos. Según Picone (2014), el pH óptimo para la mayoría de los cultivos se ubica entre 5,5 y 8,3.

Carbono orgánico total

En la Figura 8 se puede observar el efecto de los tratamientos contrastantes sobre el stock de COT del suelo en las profundidades 0-5; 0-18; 18-30 y 0-30 cm. Para el sitio DO hubo diferencias entre tratamientos y entre años y, excepto en la profundidad de 18-30 cm, hubo interacción de años por tratamiento de fertilización. Superficialmente, hasta 5 cm de profundidad (Figura 8a), comparando 2005 con 2011, en NPSrm y NPS se mantuvieron los valores de COT mientras que en NPSr y T disminuyeron. A mayor profundidad, hasta los 18 cm (Figura 8b), el T fue el único tratamiento en que el COT disminuyó. Superficialmente (Figura. 8a, letras minúsculas), los tratamientos de reposición (NPSr y NPSrm) se diferenciaron significativamente de NPS y T. A mayor profundidad, hasta los 18 cm (Figura 8b), si bien los tratamientos de reposición fueron los que presentaron los valores más altos, sólo NPSrm se diferenció significativamente de los tratamientos T y NPS, sugiriendo un efecto de la aplicación de micronutrientes en este resultado. A 18-30 cm, los tratamientos T, NPSr y NPSrm lograron valores de COT significativamente mayores que NPS siendo esta diferencia más notable en 2011 que en 2005 (Figura 8c). El análisis de 0-30 cm mostró que el único tratamiento que no disminuyó en el tiempo es NPSrm (Figura 8d, letras mayúsculas), aunque comparando los tratamientos en 2011 (Figura 8d, letras minúsculas) NPSrm no se diferenció de NPSr y el tratamiento NPS fue el de menor contenido de COT. Lo anterior coincide con los resultados comentados en la introducción de este trabajo, de una experiencia en suelos de similares características, en el que, después de 16 años de SD continua, se observó que, si bien superficialmente se mantuvieron los niveles de MO, éstos cayeron en la profundidad de 18-30 cm (Gudelj *et al.*, 2002). Sin embargo en el

experimento presentado en este trabajo los valores de COT hasta los 30 cm se lograron mantener en los tratamientos de reposición de nutrientes (Figura 8d). Lo anterior estaría fundamentado principalmente por la mayor cantidad de residuos aportados por los tratamientos de reposición debido a su mayor rendimiento y a la menor relación C/N de los mismos. Los residuos para incorporarse como MO tienen que tener una relación C/N 9:1 a 12:1 (Millar, 1964). Según Paustian *et al* (1997), citado por Galarza *et al* (2008), la disponibilidad de N influye sobre los niveles de C del suelo en una gran variedad de formas. El efecto más claro es a través del incremento de los volúmenes de residuos aportados por las plantas. Según los niveles de fertilización empleados y la extracción de nutrientes producida, se modifica la velocidad de descomposición de esos restos, encontrando algunos casos con decrecimiento del CO del suelo como respuesta a adiciones bajas de N. Según Galarza *et al* (2008) los residuos con alta relación C/N (maíz = 60, trigo = 70-80) ofrecen un sustrato con gran reserva de energía metabolizable para los microorganismos del suelo. Al consumir esos residuos desprenden C hacia la atmósfera como CO₂ y reciclan el N que forma parte de sus proteínas. Al desprender parte del C del residuo, se enriquece en N y la relación C/N va disminuyendo. Al llegar a valores cercanos a 20, la emisión de CO₂ se hace muy lenta y los procesos que continúan acomplejan esos materiales en lugar de consumirlos. Es de suponer que en los tratamientos de reposición de los experimentos estudiados los residuos de cosecha tuvieron una relación C/N más baja y los microorganismos necesitaron oxidar menos MO para llegar a esas relaciones óptimas de C/N, por lo que habrían perdido menos CO₂ a la atmósfera y más C habría quedado disponible para incorporarse al suelo. Evaluaciones de rastrojo de maíz, realizadas 80 días luego de la cosecha de esta gramínea en el experimento LCH, determinaron que la relación C/N fue de 39, 38, 35 y 33 para T, NPS, NPSr y NPSrm, respectivamente (Galarza *et al.* 2008). En similar evaluación realizada para trigo/soja, 60 días después de la cosecha de la soja de segunda, la relación C/N fue de 50, 38, 30 y 31 para T, NPS, NPSr y NPSrm, respectivamente (Galarza, 2011).

Para el sitio LCH hubo diferencia entre tratamientos y entre años, y no hubo interacción de año x tratamiento en ninguna de las profundidades evaluadas. En todas las profundidades hubo disminución del COT (Figuras 8 e, f, g y h). A partir de lo mostrado, se podría decir que cuando se parte de una situación con el suelo más empobrecido como era la de DO al inicio de la experiencia, con reposición de nutrientes y altos aportes de rastrojos, producto de utilizar una secuencia intensa con dos cultivos gramíneas de los tres que la componen, sería posible mantener los niveles de COT hasta los 30 cm de profundidad.

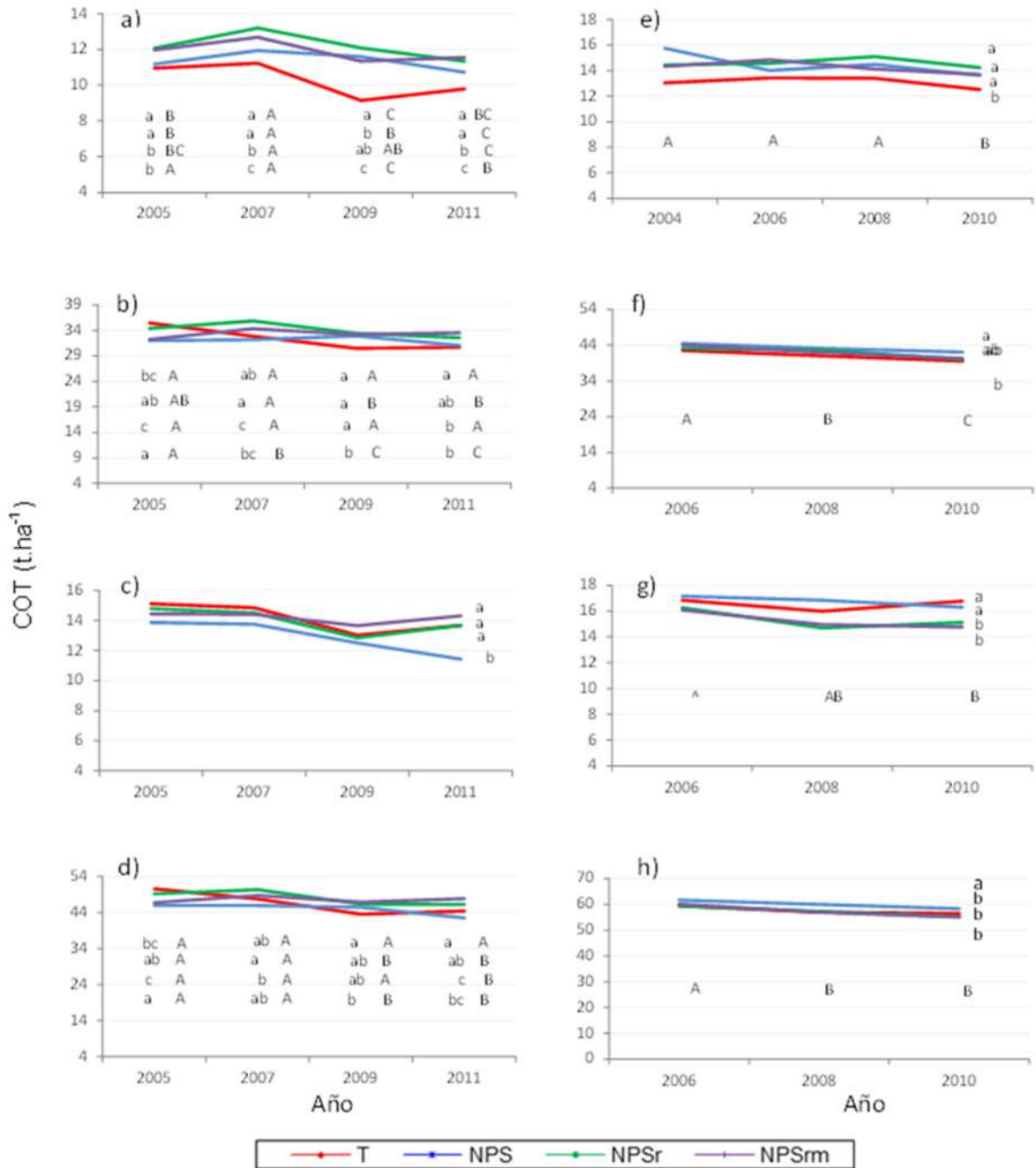


Figura 8: Evolución del contenido de COT en el sitio Don Osvaldo (2005-2011) para las profundidades: a) 0-5cm, b) 0-18cm, c) 18-30cm y d) 0-30cm; y en el sitio Los Chañaritos (2004-2010) para la profundidad: e) 0-5cm y (2006-2010) para las profundidades: f) 0-18cm, g) 18-30cm y h) 0-30cm. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes.

Por otro lado, cuando se parte de una situación con el suelo más enriquecido, como era la de LCH, no alcanzaría con lo anterior para mantener los niveles de COT. Desde el punto de vista funcional y a los efectos de conocer su dinámica y cómo manejarla, la MO del suelo puede ser caracterizada

separando “compartimentos” en función de atributos funcional-dinámicos tales como la vida media (tiempo requerido para el reciclaje del 50% de la masa de la fracción) (Quiroga & Studdert, 2015). Al caracterizar los compartimentos de la MO según su actividad, Wander (2004), citado por Quiroga & Studdert (2015), define tres fracciones: una fracción activa, cuya vida media es de unos pocos años, material parcialmente descompuesto libre no protegido, con C o N fácilmente mineralizable; una fracción lenta cuya vida media es de unos pocos años a décadas, material parcialmente descompuesto protegido en macro y microagregados; y una fracción pasiva de vida media de décadas a siglo, con componentes resistentes. En el análisis que estamos realizando es de suponer que el sitio LCH, con mayor porcentaje de MO inicial, haya tenido en el transcurso del periodo que se evaluó una mayor cantidad relativa de fracción activa y media, más susceptible a degradarse, que el sitio con mayor historia agrícola. Es decir, tuvo más para perder y los aportes residuales de los cultivos pudieron haber sido insuficientes para compensar la pérdida.

Propiedades físicas de suelo

Estabilidad Estructural

Es importante destacar que el CDMP, indicador relacionado con la estabilidad de la estructura del suelo, es uno de los parámetros físicos más sensibles para evaluar calidad de suelo (Wilson *et al.*, 2000; Aparicio & Costa, 2007; Aoki *et al.*, 2008; Campitelli *et al.*, 2010). En estudios realizados en ELD de la Estación Experimental Marcos Juárez, en un suelo Argiudol típico de textura franco limosa, este indicador se expresó como muy sensible para diferenciar situaciones de manejo de suelo, considerando sistemas de labranza, secuencia de cultivos, y formas de fertilización, entre otros (Gudelj & Masiero, 2001). En la Figura 9 se presentan los valores de EE de los distintos tratamientos estudiados desde 1999 a 2013 en el establecimiento DO. El análisis estadístico apreció interacción significativa de tratamiento por año. En el inicio de la experiencia, los tratamientos T, NPS y NPSrm fueron similares (Promedio CDMP= 1,22 mm), el NPSr presentó un índice más alto (CDMP=1,46mm) y no se separó del NPSrm. Luego, en la mayoría de los años hasta el 2011 los tratamientos fertilizados no se diferenciaron entre sí y el tratamiento T adquirió el menor valor de CDMP. A partir de 2011 y hasta 2013 tienden a definirse las diferencias, siendo en este último año, el T el que manifestó el menor índice (CDMP= 0,61 mm), luego le siguió NPS (CDMP=0,9 mm) y NPSr y NPSrm resultaron similares (CDMP=1,33 mm).

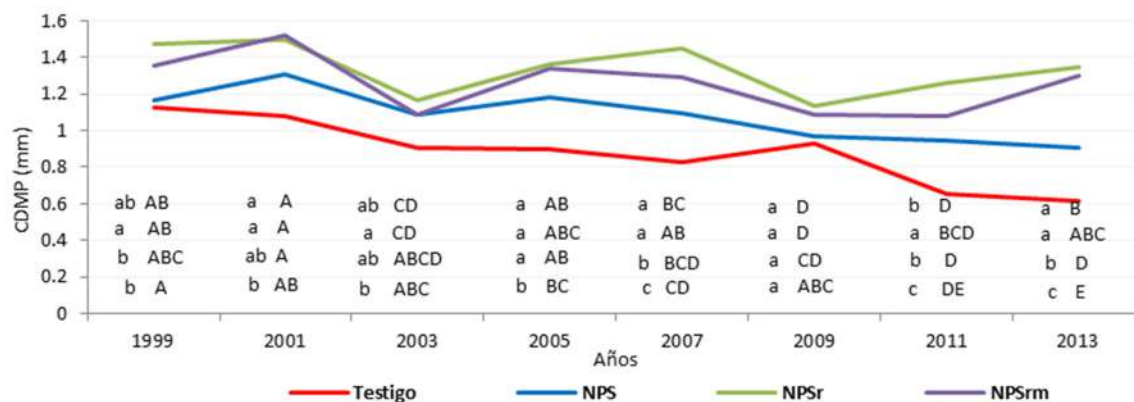


Figura 9: Evolución de la estabilidad estructural en el sitio Don Osvaldo (1999-2013) para la profundidad 0-10 cm. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes. Lectura de las letras de los tratamientos de abajo hacia arriba: T, NPS, NPSr y NPSrm. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas, lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas, lectura vertical).

Se puede observar en la Figura 9 que el Testigo y NPS mejoraron su EE a través del periodo analizado, dado que los valores de CDMP son menores a los del inicio de la experiencia apreciándose diferencias estadísticas, lo cual se evidenció a partir de 2011. En tanto que los tratamientos NPSr y NPSrm mantuvieron los valores del inicio. En la Figura 10 se presentan los valores de CDMP de las mediciones realizadas cada dos años en LCH desde 2004 a 2014.

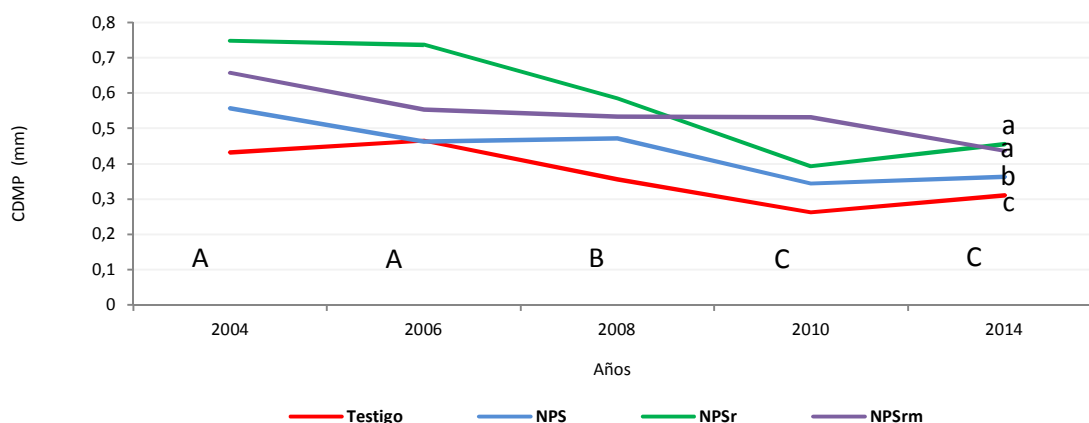


Figura 10: Evolución de la estabilidad estructural en el sitio Los Chañaritos (2004-2014) para la profundidad 0-10 cm. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los años para cada tratamiento (mayúsculas, lectura horizontal) y entre los tratamientos dentro de cada año (minúsculas, lectura vertical).

El análisis estadístico de los datos no encontró interacción significativa de los tratamientos por año. Las situaciones T y NPS se mantuvieron diferentes desde 2004 y ambos con los menores CDMP, es decir, con agregados más estables que NPSr y NPSrm, los cuales se expresaron en forma similar. A través de los años (letras mayúsculas), todos los tratamientos mejoraron su estabilidad, lo que se aprecia a partir de 2008 y 2010, condición que se mantiene en 2014, último año de medición.

Densidad Aparente

En la Tabla 6, se presentan los valores promedio de DA para todos los tratamientos y profundidades medidas en DO en 2005 y 2013. Para 0-5 cm de profundidad los valores de DA registrados fueron siempre bajos, iguales o menores que $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$, no observándose diferencias entre tratamientos en ninguno de los años medidos. De 5 a 10 cm de profundidad los valores de DA se mantuvieron cercanos al valor crítico $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$ (Griffith *et al.* 1977) mientras que de 10 a 15 cm superaron ese valor en todos los tratamientos. En la profundidad 15-20 cm los tratamientos se mantuvieron cerca del valor crítico citado y en algunos casos lo superaron, mientras que en 20-25 cm los valores de DA estuvieron por debajo de dicho valor en ambos años de medición. En estos dos últimos espesores, en 2013, el tratamiento NPS tuvo la menor densidad y se diferenció de NPSr.

Tabla 6: Densidad Aparente en el sitio Don Osvaldo en 2005 y 2013 para 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 y 20-25 cm de profundidad. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes. Letras minúsculas distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre años para cada profundidad.

Prof. (cm)	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25	
Año	2005	2013	2005	2013	2005	2013	2005	2013	2005	2013
Tratamiento	DA (g.cm^{-3})									
T	1,20a	1,01a	1,39ab	1,32 b	1,44a	1,45a	1,42a	1,43ab	1,36a	1,35ab
NPS	1,17a	1,09a	1,42a	1,40a	1,43a	1,41ab	1,37 b	1,39 b	1,32a	1,33 b
NPSr	1,09a	1,06a	1,39ab	1,36ab	1,43a	1,42ab	1,39ab	1,44a	1,34a	1,37a
NPSrm	1,12a	1,06a	1,34 b	1,35ab	1,42a	1,41 b	1,39ab	1,41ab	1,32a	1,35ab
Promedio	1,15A	1,06B	1,39A	1,36B	1,43A	1,42B	1,39B	1,42A		
Análisis de Varianza										
Efecto Trat.	no		si ($p < 0.0003$)		si ($p < 0,0475$)		si ($p < 0,0001$)		si ($p < 0,0003$)	
Efecto Año	si ($p < 0.0001$)		si ($p < 0,0015$)		si ($p < 0,0048$)		si ($p < 0,0078$)		si ($p < 0,0045$)	
Año x Trat.	no		no		no		no		si ($p < 0,0334$)	

En resumen, podemos decir que en superficie no se manifestaron problemas de compactación del suelo. Hacia los estratos inferiores se apreció una mayor densificación que se acentuó en los espesores 10-15 cm y 15-20 cm, con valores que podría afectar el normal desarrollo de los cultivos. Al comparar los tratamientos entre años, cuando no hubo interacción año x tratamiento, en promedio para cada profundidad hasta los 15 cm, los valores de DA disminuyeron significativamente: 7,8%, 2% y 0,7%, para 0-5 cm, 5-10 cm y 10-15 cm, respectivamente, aunque en el espesor 10-15 cm se mantuvieron por encima del nivel crítico. A 15-20 cm los valores de DA aumentaron ubicándose por encima del valor crítico. Gil (2015) reportó para suelos de textura media que a partir de valores de la DA cercanos a $1,4-1,5 \text{ g.cm}^{-3}$, difícilmente se encuentren valores de macroporosidad o porosidad de aireación superiores al 10-15% considerados como limitantes para un normal crecimiento de los cultivos y aireación del suelo. El aumento de la DA con la profundidad en SD ha sido informado por varios autores y atribuido a la compresión vertical por el tránsito de la maquinaria agrícola (Pidgeon & Soane, 1977; Schmidt & Amiotti, 2015). En un manejo sustentable es necesario integrar todas las prácticas que contribuyan a reducir la compactación; reducir al mínimo el pasaje sobre el suelo húmedo, uso de equipos de menor peso por eje, ordenar el movimiento de acoplados dentro del lote y utilizar neumáticos de mayor superficie de contacto para reducir la presión específica (Gerster, 2008).

En la Tabla 7, se presentan los valores promedio de DA para los años 2006 y 2014, considerando todos los tratamientos y profundidades medidas en LCH. En este sitio en 2006, los tratamientos T, NPS y NPSrm fueron significativamente más densos que los tratamientos NPSr para 0-5 cm de profundidad; y en 2014 todos los tratamientos se asimilaron entre sí, aunque al igual que para el sitio DO, los valores de DA para 0-5 cm siempre fueron bajos (menores a $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$).

Tabla 7: Densidad aparente (DA) en el sitio Los Chañaritos en 2006 y 2014 para 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 y 20-25 cm de profundidad. T: Testigo sin fertilizar; NPS: N+P+S dosis productor; NPSr: N+P+S dosis de reposición; NPSrm: Idem NPSr + reposición de micronutrientes. Letras minúsculas distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos. Letras mayúsculas distintas indican diferencias estadísticas significativas entre años para cada profundidad.

Prof. (cm)	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25	
Año	2006	2014	2006	2014	2006	2014	2006	2014	2006	2014
Tratamiento	DA (g.cm^{-3})									
T	1,11a	1,16a	1,38a	1,34ab	1,35a	1,36a	1,32a	1,32a	1,36a	1,30b
NPS	1,16a	1,15a	1,37ab	1,36a	1,36a	1,36a	1,34a	1,33a	1,36a	1,30b
NPSr	1,02b	1,11a	1,32 b	1,31ab	1,38a	1,34a	1,36a	1,34a	1,38a	1,35a
NPSrm	1,08ab	1,11a	1,36ab	1,29 b	1,36a	1,34a	1,34a	1,31a	1,37a	1,32ab
Promedio	1,09B	1,13A	1,36A	1,33B	1,36A	1,35A	1,34A	1,33B	1,37A	1,32B
Análisis de Varianza										
Efecto Trat.	si ($p < 0,0001$)		si ($p < 0,0005$)		no		no		si ($p < 0,0013$)	
Efecto Año	si ($p < 0,0221$)		si ($p < 0,0197$)		no		si ($p < 0,0387$)		si ($p < 0,0001$)	
Año x Trat.	no		no		no		no		no	

En el espesor de 5-10 cm, si bien se observaron algunas diferencias entre tratamientos dentro de cada año evaluado, los valores de DA estuvieron por debajo del valor crítico ($1,4 \text{ g.cm}^{-3}$). A 10-15 cm y 15-20 cm no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, y a 20-25 cm de profundidad, en 2006 los tratamientos no se diferenciaron entre sí pero en 2014 NPSr presentó mayor densidad que los demás tratamientos. Al analizar entre años de medición, se puede observar que en superficie se produjo un incremento significativo de la densidad, y para las demás profundidades, excepto para 10-15 cm donde los valores se mantuvieron, se produjo una disminución significativa de la DA. De todos modos, en este sitio, en ninguno de los tratamientos y años de medición evaluados se halló una densificación del suelo que podría ser crítica para el desarrollo de los cultivos.

Para ambas experiencias, se puede observar que en general no hubo ningún tratamiento evaluado que se diferencie por su efecto sobre la densificación del suelo. También, que en el sitio LCH, con menor historia agrícola, los valores se mantienen por debajo del valor crítico en todas las profundidades analizadas, quizás producto de los mayores valores de MO del lote en cuestión.

Análisis comparativos de rendimientos

En la Tabla 8 se presentan para el sitio DO y en la Tabla 9 para el sitio LCH, los promedios de rendimiento (1999-2015) de maíz, trigo y soja obtenidos en el tratamiento NPSr comparado con el promedio de cada cultivo obtenido en el mismo periodo en el Dto. Ms. Jz.; y en la Tabla 10, se presenta el rendimiento de maíz, trigo y soja del tratamiento NPSr promedio de los sitios DO y LCH, comparado con los promedios obtenidos por los productores con suelo clase I y II sin limitaciones y con un 50% de la superficie con napas cercanas. En la experiencia DO se obtuvo un 17%, 49% y 11% más de maíz, trigo y soja, respectivamente, que el promedio del Dto. Ms.Jz. (Tabla 8). Cuando la comparación se hace con los datos del sitio LCH, esas diferencias se ampliaron para maíz y trigo (48% y 90%, respectivamente) y disminuyeron en soja (6%), supuestamente porque en un ciclo la soja en LCH se perdió por inundación e influyó negativamente en el promedio (Tabla 9). También es válido aclarar que el promedio del Dto. Ms.Jz. incluye soja de primera y de segunda mientras que en los experimentos siempre fue soja de segunda. La comparación con los promedios obtenidos por los productores con suelos clase I y II sin limitaciones y con 50% de la superficie con napas cercanas, muestra que el tratamiento NPSr tiene un plus de rendimiento del 20%, 33% y 12% para maíz, trigo y soja, respectivamente (Tablas 10). Lo anterior sugiere que existe una parte importante de la brecha de rendimientos que se podría disminuir mejorando el manejo de la fertilización.

Tabla 8: Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr Don Osvaldo vs. promedio del Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms.Jz.), periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

Sitio	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)		
	Maíz	Trigo	Soja
NPSr Don Osvaldo	10662	4495	3838
Dto. Ms.Jz.	9102	3020	3468
Relación NPSr/Dto. Ms.Jz.	117	149	111

Tabla 9: Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr en el sitio Los Chañaritos vs. promedio del Departamento Marcos Juárez, periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

Sitio	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)		
	Maíz	Trigo	Soja
NPSr Los Chañaritos	14068	5805	3425
Dto. Ms.Jz.	9489	3063	3241
Relación NPSr/Dto. Ms.Jz.	148	190	106

Tabla 10: Análisis comparativo de rendimiento promedio NPSr promedio de los sitios Don Osvaldo-Los Chañaritos vs. productores Departamento Marcos Juárez (Dto. Ms.Jz.) sin limitantes, periodo 1999/2000-2015/16. NPSr: N+P+S dosis de reposición.

Sitio	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)		
	Maíz	Trigo	Soja
Promedio NPSr Don Osvaldo-Los Chañaritos	12365	5150	3631
Productores Suelos Cl-C2 Sin limitantes, 50 % con napas cercana. Dto. Ms.Jz.	10289	3884	3235
Relación NPSr/ Dto. Ms.Jz.	120	133	112

Consideraciones finales

En trigo y maíz los mejores rendimientos se alcanzaron cuando se utilizó la fertilización de reposición. Con este tratamiento en el sitio con mayor historia agrícola y sin napas cercanas, se alcanzó un 85% y 89% de los rendimientos potenciales de secano en la región de estudio para trigo y maíz, respectivamente. En el sitio con menor historia agrícola y napas cercanas se superó dicho potencial en 9% y 17% para trigo y maíz, respectivamente, lo que puso de manifiesto la mayor importancia de aumentar las dosis de fertilización en este tipo de ambientes. En soja, los mejores rendimientos se lograron cuando se fertilizó con S o con S combinado con otros nutrientes. Los resultados mostraron que si se dejara de fertilizar, en lotes con muchos años de agricultura continúa, los rendimientos de trigo y maíz se reducirían un 50% y los de soja un 27% aproximadamente.

En el periodo analizado no hubo una incidencia importante por la aplicación de micronutrientes en los rendimientos promedios obtenidos, excepto en el sitio con menor historia agrícola y napas cercanas, donde en promedio se consiguió un mejor rendimiento en el cultivo de maíz. Puntualmente hubo un plus de rendimiento cuando se aplicaron micronutrientes en algunos de los últimos ciclos evaluados, lo que sugiere que posiblemente de aquí en adelante los mismos cobren mayor importancia en la definición de los rendimientos.

Los tratamientos de reposición, en el sitio con mayor historia agrícola y sin napas cercanas, respecto de NPS, mejoraron en un 11,4% la eficiencia de uso del agua en trigo y maíz, mientras que para el cultivo de soja esa mejora fue del 28% al comparar con el tratamiento T.

Con la aplicación de reposición aumentaron los niveles de P en el suelo producto de que lo aplicado superó a lo exportado por los granos. En el sitio de mayor historia agrícola y sin napas cercanas,

fueron necesarios 34 kg.ha^{-1} de superfosfato triple para aumentar 1 mg.kg^{-1} la disponibilidad de P en el suelo, una vez cubierta la extracción de P de los cultivos.

A partir del balance de K en el periodo de estudio y de los valores iniciales y finales de K_i se determinaron balances negativos de 2,2; 2,29 y 3,45 kg de K para perder 1 mg.kg^{-1} de K_i en los tratamientos T, NPS y NPSr, respectivamente.

En ambos experimentos fueron necesarios 9 kg.ha^{-1} de zinc para aumentar 1 mg.kg^{-1} la disponibilidad de este nutriente en el suelo.

En el sitio de mayor historia agrícola y sin napas cercanas, con los tratamientos fertilizados, se logró mantener los valores de COT en los primeros 18 cm de suelo, y hasta los 30 cm cuando se utilizó reposición de nutrientes + micronutrientes. En la situación de menor historia agrícola y napas cercanas, todos los tratamientos disminuyeron el contenido de COT, sugiriendo mayor dificultad para mantener los valores del mismo cuando se hace agricultura continua en lotes con alto contenido de MO, que relativamente tendrían un porcentaje más alto de fracciones lábiles expuesta a pérdidas.

En los tratamientos fertilizados se acidificó el suelo, siendo más importante este efecto cuando se utilizó reposición de nutrientes, donde superficialmente los valores de pH llegaron a 5,5.

En el sitio, de mayor historia agrícola y sin napa cercanas, con bajo contenido de COT, la mayor DA se observó para 10-15 cm y 15-20 cm de profundidad, con valores que en la mayoría de los casos superaron al considerado crítico para este tipo de suelo; mientras que en el sitio de menor historia agrícola y napas cercanas, con mayor contenido de COT, los valores de densidad del suelo se mantuvieron por debajo del valor crítico.

En el sitio con mayor historia agrícola y sin napas cercanas, el tratamiento sin fertilizar y, en menor medida el tratamiento en el que se utilizó la dosis del productor medio, mejoraron la EE, y los tratamientos de reposición mantuvieron los valores iniciales del periodo evaluado. En el sitio con menor historia agrícola y napas cercanas todos los tratamientos mejoraron la EE a través del periodo evaluado. En ambas experiencias, la EE del último año analizado, se expresó en el siguiente orden: T mejor que NPS y éste mejor que los tratamientos de reposición.

Algunos aspectos de la hipótesis planteada al inicio de la experiencia, como la mejora de los rendimientos, mantenimiento de la estructura del suelo y, en forma parcial, los valores de CO, se cumplieron. Otros, como la acidificación y la compactación del suelo, aparecen como temas a resolver. El encalado, considerar las necesidades específicas del lote y/o ambiente y los pronósticos

climáticos para lograr un mejor ajuste de la fertilización, aplicación de fuentes nitrogenadas menos acidificantes y la utilización de CC, podrían ser estrategias a experimentar para tratar de solucionar la problemática planteada. Además deberían considerarse los CC para contribuir a un mayor aporte de C al sistema, de N orgánico y de reciclado de los nutrientes. Si bien se probó experimentalmente la fertilización nitrogenada como reposición, la forma de mejorar los balances de N se debería apoyar también en el aporte de leguminosas en la rotación que puedan incorporar N en forma orgánica. Al ser un nutriente de alta movilidad y sujeto a pérdidas, la utilización de fertilización nitrogenada con criterio de reposición podría ser riesgosa desde el punto de vista ambiental, por lo que se enfatiza la necesidad de ajustar la dosis de N según las necesidades específicas del lote o ambiente y los pronósticos climáticos, a fin de lograr un balance neutro de este nutriente.

Bibliografía

- Aoki, AM; P Campitelli; O Gudelj; CI Vettorello; G Esmoriz & R Sereno. 2008. Efectos de diferentes sistemas de cultivos y labranzas sobre propiedades indicadoras de calidad de suelo. XXI C.A.C.S., Potrero de los Funes (San Luis). Resumen pág.47, trabajo en CD-ROM.
- Aparicio, V & JL Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96:155-165.
- Aramburu Merlos, F; J Monzon; F Andrade & P Grassini. 2016. Rendimientos potenciales y brechas de rendimientos en Argentina. XXIV Congreso Nacional de Siembra Directa. Aapresid. Rosario-Santa Fe.
- Barbieri, PA; HR Sainz Rozas; HE Echeverría; F Salvagiotti; P Barbagelata; M Barraco; JC Colazo; G Ferraris; HS Sánchez; RH Cáceres Díaz; NI Reussi Calvo; G Esposito; M Eyherabide & B Larsen. 2015. ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz? IPNI, Información Agronómica de Hispanoamérica N°19.
- Blake, GR & KH Hartage. 1986. Bulk Density. In: A Klute (ed.). *Methods of soil analysis, Part I.* 2nd. Ed. American Society of Agronomy, Madison, *Agronomy* 9: 363-375.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available form of phosphorus in soil. *Soil Sci* (59), 360-361.
- Campitelli, Paola; Aoki, Antonio; Gudelj, Olga; Rubenacker, Andrea & Roberto Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo*. vol.28, n.2.
- De Boodt, M & L De Leenheer. 1967. Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *West-European Methods for Soil Structure Determinations*. State Faculty Agricultural Sciences, Ghent, Belgium. 60-62.
- Dewis, J & F Freitas. 1970. Métodos físicos y químicos de análisis de suelos y aguas. Boletín sobre suelos N°10. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. Roma.

- Echeverría, H.E; HR Sainz Rozas & PA Barbieri. 2014. Maíz y sorgo. Pp 435-478. En HE Echeverría y FO García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Galarza, C; P Vallone; V Gudelj; C Cazorla & T Baigorria. 2008. Caracterización de rastrojos en sistemas agrícolas estabilizados. Trigo Informe de Actualización Técnica N°8. EEA INTA Marcos Juárez. Pp 5-11.
- Galarza, CM. 2011. Importancia de los rastrojos como aporte al balance de carbono. Maíz Informe de Actualización Técnica N°19. EEA INTA Marcos Juárez. Pp 73-81.
- García, FO; LI Picone & IA Cianpitti. 2015. Fósforo. Pp 229-264. En HE Echeverría y FO García (eds). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina.
- García, FO & AA Correndo. 2016. Cálculo de requerimientos nutricionales. Disponible en <http://lacs.ipni.net/article/LACS-1024>
- Gerster, G. 2008. Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico. Tesis para optar al grado de Magíster en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrarias. UNR.
- Gil, R. 2015. El uso del agua en una agricultura sustentable. En Capítulo 3: El agua en la producción agropecuaria. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo I. 1ª ed. – Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación Ciencia, Educación y Cultura. FECIC.
- Greweling T & M Peech. 1960. Chemical soil test. Cornell Univ. Agric. Exp. Stn. Bull. N° 960
- Griffith, DR; JV Mannering & WC Moldenhauer. 1977. Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. Journal of Soil and Water Conservation, 32:20-28.
- Gudelj O. & B Masiero. 2001. Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. Informe técnico del área Suelos y Producción Vegetal. N°128. EEA Marcos Juárez, pp.31-43.
- Gudelj, V; C Galarza; G Espoturno; P Vallone; O Gudelj; B Masiero & H Ghio. 2002. 16 años de Experiencias de fertilización en SD. Actas del X Congreso Nacional de AAPRESID. Rosario-Santa Fe.
- Gudelj, V; P Vallone; C Galarza; O Gudelj & B Masiero. 2010. Efecto de la utilización de vicia como cobertura y de la fertilización nitrogenada sobre el cultivo de maíz. IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio Nacional de Sorgo. Rosario. Santa Fe.
- Gudelj VJ; H Ghio; C Lorenzon; O Gudelj; C Galarza; P Vallone; B Conde; P Tamburrini; F García & A Berardo. 2016. Evolución del fósforo disponible luego de la aplicación de diferentes dosis de fertilizante fosfatado. Actas XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- INTA. 1985. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363 – 23. Corral de Bustos.
- Lattanzi, AR. 1989. Secuencias de cultivos y sistemas de labranzas conservacionistas para la producción de soja. IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Actas tomo IV. Buenos Aires, Argentina.
- Lattanzi, A; J Arce; HJ Marelli; C Lorenzon & T Baigorria. 2005. Efecto de largo plazo de la SD y de rotaciones de cultivos sobre los rendimientos, el carbono y nitrógeno orgánico en un suelo Argiudol típico en Marcos Juárez. En CD y actas de Seminario internacional: Indicadores de Calidad de suelo. Marcos Juárez - Córdoba- Argentina.

- Leiva, P & O Hansen. 1984. Sistemas de labranza en la rotación trigo-soja-maíz. La resistencia mecánica de los suelos y el desarrollo radicular del cultivo de maíz. III Congreso Nacional de Maíz. Noviembre 1984. Volumen 27 N° 3. Pergamino (Bs. As)
- Lindsay, WL & WA Norvell. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42:421-428.
- Marelli, HJ & JM Arce. 1989. Siembra directa de soja sobre trigo. IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Actas tomo II. Buenos Aires, Argentina.
- Marelli, HJ; JM Arce; A Lattanzi; C Lorenzon & P Marelli. 2006. Evaluación del carbono y nitrógeno orgánico del suelo en ensayos de larga duración en la EEA de Marcos Juárez, Córdoba. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. I Reunión de suelos de la región Andina. Salta-Jujuy. Argentina. En CD.
- Millar, CE. 1964. Fertilidad de Suelo. Editorial Salvat. Barcelona, España.
- Paustian, K; H Collins & E Paul. 1997. Managements Controls on Soil Carbon, in Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems, by CRC Press Inc.
- Picone, LI. 2014. El ambiente físico-químico del suelo relacionado con la fertilidad. Capítulo 1. En: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Editores Hernan E. Echeverría, Fernando O. García. 2^{da} ed. Buenos Aires: Ediciones INTA:
- Pidgeon, JD & BD Soane. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley mono-culture system. J. Agric. Sci. 88: 431-442.
- Potash & Phosphate Institute. 1997. Fósforo. Capítulo 4. Pp. 1-15. En: Manual internacional de Fertilidad de Suelos.
- Quiroga AR & GA Studdert. 2015. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica. Pp: 73-100. En HE Echeverría y FO García (eds.). Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Salvagiotti, F; DJ Collino; A Perticari; C Piccinetti; G Ovando; S Urquiaga & RW Racca. 2015. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 20-Diciembre - Versión Cono Sur.
- Schmidt, ES & NM Amiotti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ciencia del Suelo*. Vol 33(1) Julio.
- Walkley, A. & IA Black. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37:29-38.
- Wander, MM. 2004. Soil Organic Matter fractions end their relevance to soil function. P. 67-102. In F. Magdoff y RR Weil (eds.). soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Watson ME. 1998. Chapter 10: Boron. Recommended chemical soil test procedures for the north central region. Missouri Agricultural Experiment Station SB 1001, NCR Research Publication N°. 221.
- Wilson, MG; CE Quintero; NG Boschetti; RA Benavides & WA Mancuso. 2000. Evaluación de atributos del suelo para su utilización como indicadores de calidad y sostenibilidad en Entre Ríos. *Rev. Fac. Agr. UNER* 20 (1): 23-30.

Ensayos de larga duración en el Sudeste de Córdoba: rotaciones, labranzas, fertilización y cultivos de cobertura

Carlos M Galarza, Tomas Baigorria, Monica F Boccolini, Cristian R Cazorla y Valeria S Faggioli

INTA EEA Marcos Juárez.

Descripción regional

En el departamento Marcos Juárez ubicado al sudeste de la provincia de Córdoba el 95 % de la superficie se implanta con cultivos agrícolas (Agroindustria, 2017) en su mayor parte bajo el sistema de siembra directa (SD). En el período 2000 – 2015, la superficie sembrada con soja (*Glycine max* (L) Merr.), trigo (*Triticum aestivum* L) y maíz (*Zea mays* L.) fue de 582000, 103000, 110000 ha, respectivamente (Agroindustria, 2017). Considerando la superficie sembrada con soja de primera y segunda época de siembra, el cultivo ocupa un 83 % de la superficie agrícola, lo que representa una alta proporción de soja en la rotación.

El clima de la zona presenta un invierno relativamente seco y precipitaciones que se concentran especialmente en los meses estivales, aunque en dicho período ocurre déficit hídrico debido a la gran demanda de evaporación del ambiente (INTA, 1978). Las precipitaciones medias para el período 1910 – 2008 fueron de 815 mm, concentrados en el período estival, con una media de 627 mm para el mismo período (SIGA2, 2017). Estos suelos tienen una capacidad promedio de almacenar 150 mm de agua útil hasta el metro de profundidad.

Los suelos predominantes de la región sudeste de la provincia de Córdoba pertenecen a la serie Marcos Juárez, identificados como Argiudoles típicos que poseen capacidad de uso I. Son suelos oscuros, profundos y bien drenados de lomas casi planas, desarrollados sobre un sedimento loésico de textura franco limosa, con altos contenidos de materia orgánica (MOS) en el horizonte superficial y la presencia de un horizonte argílico con acumulación de arcilla de origen iluvial (Bt). El horizonte C comienza a los 95 cm de profundidad (INTA, 1978). Los Argiudoles típicos franco limosos son bien estructurados y de buena fertilidad. Sin embargo la predominancia de limos los hace susceptibles al planchado por lluvia y a erosión, aún en sectores con pendientes suaves.

Tradicionalmente, los sistemas de producción se basaban en sistemas mixtos con la utilización de labranzas para la implantación y labores culturales. La región se caracterizó por ser importante en la

producción del cultivo de trigo y a mediados de 1970 la difusión del cultivo de soja luego de la cosecha del trigo, permitió el ingreso del sistema de labranza cero o siembra directa (SD) (Ghera *et al.*, 1998) y, con ella, una disminución de la erosión y degradación (Marelli & Arce, 1989). Para el año 2002 se estimaba que 15,6 millones de hectáreas se encontraban bajo ese sistema de labranza (INDEC, 2002).

Los sistemas de labranza tienen impacto en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. La SD en estos suelos provoca un desarrollo de estructura superficial en forma laminar (Bonel *et al.*, 2005) y una disposición horizontal de macro-poros superficiales (Sasal *et al.*, 2005). La ausencia de laboreo provoca procesos de endurecimiento por el aumento de la cohesión (Kemper & Rosenau, 1986), motivo por el cual se reportan incrementos en la densidad aparente y en la resistencia a la penetración (Taboada *et al.*, 1998) con efectos adversos en el crecimiento de raíces y la velocidad de infiltración del agua (Cosentino & Pecorari, 2002). También se reportan fragilidad de la estructura, tendencia a la compactación y pérdida de la estabilidad estructural (Urricarriet & Lavado, 1999). Además, presentan baja macro-porosidad, incluso en situaciones prístinas (Taboada *et al.*, 1998) y una escasa capacidad de regenerar la estructura (Barbosa *et al.*, 1997).

Con respecto a las propiedades biológicas, los sistemas de labranza afectan a los organismos del suelo y sus funciones. Los hongos y bacterias son los microorganismos predominantes y participan en procesos clave tales como la descomposición de rastrojos, el mantenimiento de C, la mineralización de nutrientes y la regulación de patógenos de suelo. Entre la microbiota edáfica se destacan los hongos formadores de micorrizas arbusculares los cuales sólo pueden vivir en presencia de raíces que le suministren hidratos de C a cambio de nutrientes esenciales. Establecen una simbiosis que no solo favorece a la planta en la adquisición de P y micronutrientes sino además en la tolerancia a enfermedades y sequía y al sinergismo con bacterias fijadoras de N. Sumado a los beneficios directos sobre las plantas, también se han reportado mejoras en las propiedades físicas gracias a secreciones micorrícicas que contribuyen a aglutinar las partículas de suelo (Smith & Read, 2008).

Una de las ventajas más relevantes atribuidas a la microbiota del suelo es que al ser organismos vivos tienen más sensibilidad que otras variables edáficas para reflejar disturbios que pueden atentar contra la sustentabilidad. Se ha demostrado que las propiedades más dinámicas del suelo tales como la biomasa microbiana, la actividad enzimática y la respiración responden más rápidamente al manejo del suelo que la MOS y la disponibilidad de nutrientes (Dick 1992; Doran *et al.* 1996). También se sabe que el exceso de fertilización es perjudicial para el establecimiento de la simbiosis

micorrízica (Covacevich *et al.*, 2007), al igual que las labranzas y ausencia de CC invernal (Faggioli *et al.*, 2008b, 2012). Es por ello, que el seguimiento de la calidad del suelo debe incluir un conjunto de propiedades biológicas como complemento de los diagnósticos físico-químicos tradicionales.

Problema a estudiar

El ensayo fue implementado considerando que la SD era un sistema que podía aportar algunos elementos necesarios para evitar o revertir los problemas físicos del suelo. La SD se planteaba como el sistema que solucionaría la degradación de los suelos pampeanos y debía ser desarrollada. Para demostrar esta hipótesis debía contemplarse un tratamiento testigo con las labranzas mínimas recomendadas en esa época, una remoción profunda con cincel antes de cultivos de soja y maíz, y una labranza superficial antes de trigo. Todos los tratamientos a comparar con ese testigo en labranza convencional (LC) serían en SD continua.

Como todo establecimiento agrícola tiene una etapa extractiva de nutrientes, necesitaría ser complementada con ingresos de insumos externos para equilibrar los balances negativos. Para comprobar esta hipótesis se planteó la fertilización con productos de síntesis que debía asegurar altos niveles productivos y un efecto residual que asegurara un ciclo de nutrientes y C lo suficientemente completo y estable para mantener o aumentar las fracciones lábiles de la MOS. Sólo con este equilibrio (inestable pero subsidiado con insumos externos) parecía posible mantener los balances nutricionales del sistema en niveles apropiados a la producción y conservación del ambiente. La fertilización propuesta coincidía con la de criterios empresariales: necesaria para llegar a niveles máximos de respuesta físico-económica.

Con el tiempo transcurrido, la estabilización del sistema y el aumento de la eficiencia de uso del agua obtenido, fue necesario incrementar los niveles iniciales de fertilización para que los aportes de N y P no dependieran parcialmente del suelo y la extracción con los granos fuera repuesta totalmente. Surgieron así nuevos tratamientos que tendieron a incorporar al sistema todo el N, P y S extraído en las cosechas. Quedaron así definidos tres niveles de fertilización: un testigo absoluto sin fertilización (SF), una fertilización que coincide con niveles óptimos económicos según función de respuesta y considera los nutrientes presentes en el suelo, denominada fertilización de diagnóstico (FD) y fertilización a reposición (FR) que repone niveles similares a los extraídos por los granos cada año.

Por último se planteó la necesidad de incrementar la cantidad de residuos en el sistema mediante cultivos de cobertura invernal (CC). Inicialmente sólo se incluyeron en tratamientos sin fertilización y con la fertilización de criterio económico. Pasado un tiempo de estabilización y crecimiento de los rendimientos, se incorporó el tratamiento de CC con FR.

Los principales aspectos considerados se relacionaron a la conservación de la porosidad estable lograda con la exploración radicular de las plantas, el mantenimiento permanente de la cobertura superficial de residuos, la reposición de los macronutrientes extraídos por las cosechas, y el aporte de todo el C que el sistema sea capaz de metabolizar a través de la biomasa microbiana. La pastura se tomó como ambiente de referencia y comparación. Si bien no forma parte del ensayo (por cuestiones operativas y de diseño estadístico) permitiría evaluar con el tiempo, la evolución del suelo en los diferentes manejos.

Tratamientos estudiados

Para evaluar el efecto de la fertilización y de los cultivos de cobertura sobre los sistemas agrícolas continuos, se trabajó en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Marcos Juárez sobre un ensayo iniciado en 1993 con una rotación maíz – trigo / soja de segunda (soja 2da) – soja de primera (soja 1ra) bajo SD. El diseño experimental del ensayo fue en parcelas divididas donde el factor principal fue el cultivo en las diferentes fases de la rotación y tuvo tres niveles: trigo/soja 2da – soja 1ra y maíz. En las sub-parcelas se aleatorizaron diferentes estrategias de fertilización, tipo de labranza (LC y SD) y utilización de CC. El tamaño de las parcelas fue de 9 x 50 metros con tres repeticiones.

Las estrategias de fertilización fueron tres: SF, FD y FR. La FR es un criterio de aplicación de la totalidad de los nutrientes que extrae el cultivo para un rendimiento esperado, con el propósito de aumentar o mantener los niveles de fertilidad del suelo (Melgar, 1997). La FD tiene en cuenta el aporte de nutrientes del suelo y el máximo retorno económico, como así también la capacidad de respuesta del cultivo al agregado de fertilizantes (Melgar, 1997). En el ensayo se consideró siempre la dosis de fertilizante a aplicar en el tratamiento FD como la mitad del tratamiento FR. En trigo el tratamiento FR tiene aplicaciones de 160, 26 y 26 kg ha⁻¹ de N, P y S, respectivamente para un rendimiento objetivo de 6 Mg ha⁻¹. En maíz el tratamiento FR tiene aplicaciones de 180, 40 y 40 kg ha⁻¹ de N, P y S, respectivamente para un rendimiento objetivo de 12 Mg ha⁻¹. Por último, en soja 1ra

y 2da el tratamiento FR tiene aplicaciones de 12, 22 y 22 kg ha⁻¹ de N, P y S, respectivamente para un rendimiento objetivo de 5 Mg ha⁻¹. El Nitrógeno (N) se aplica bajo la forma de urea, mientras que en soja se lo aplica como fosfato mono amónico. El azufre se aplica en todos los cultivos bajo la forma de sulfato de calcio.

Los CC son coberturas vegetales vivas que cubren el suelo y pueden ser temporales o permanentes y generalmente se intercalan entre los cultivos de cosecha (Kiff *et al.*, 1996). La utilización de CC tuvo como objetivo incrementar los aportes de C provenientes de residuos al suelo para incrementar los contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) y los niveles de cobertura del suelo. La siembra de los CC se realizó siempre en el mes de Mayo de cada año y se les interrumpió el ciclo mediante la aplicación de herbicidas durante el mes de Septiembre de cada año, previo a la siembra de los cultivos de soja 1ra y maíz. Debido a que los CC son siempre invernales, son antecesores de los cultivos de soja 1ra y maíz en este ensayo, por lo que los tratamientos que tienen CC tienen una rotación CC/maíz – CC/soja – trigo/soja, mientras que los tratamientos sin CC tienen una rotación barbecho/maíz – barbecho/soja – trigo/soja.

Los CC antecesores de soja 1ra siempre fueron gramíneas, desde el año 1993 hasta el año 2007 se utilizó avena (*Avena sativa* L.), luego se utilizó trigo en el año 2008 y 2009 y finalmente en el año 2010 se utilizó triticale (*xTriticosecale Wittmack ex A.Camus*). En el caso de los CC antecesores de maíz se utilizó lupino en los años 1993, 1994 y 1995, y vicia (*Vicia sativa* L.) en los años 1996 y 1997. Desde el año 1998 se utilizó avena hasta el año 2007 mientras que en 2008, 2009 y 2010 el antecesor fue trigo. A partir del año 2011 se utilizó vicia villosa (*Vicia villosa* Roth). A partir del año 2012 se incluyó el tratamiento CC con FR.

Al inicio del ensayo, los contenidos de MOS fueron de 27,7 y 24,5 g kg⁻¹ en las profundidades 0 – 5 y 5 – 18 cm, respectivamente. La fracción mineral contiene 251 g kg⁻¹ de arcilla, 689 g kg⁻¹ de limo y 54 g kg⁻¹ de arenas muy finas (< a 100 µm) (INTA, 1978). El contenido de fósforo (P) Bray y Kurtz de este horizonte fue de 24 mg kg⁻¹ al inicio del ensayo.

Interpretación y recomendación en base a los resultados

Efectos de los sistemas de labranza sobre el rendimiento de los cultivos

El rendimiento de maíz fue modificado por efecto de la fertilización (2987 kg ha⁻¹ de incremento en FD), mientras que no fue afectado por el sistema de labranza. Se observó una interacción significativa

entre fertilización y sistema de labranza. El mayor rendimiento se observó en SD FD, mientras que el menor fue en SD SF. La respuesta a la fertilización fue de 2486 kg ha^{-1} en LC mientras que en SD fue de 3488 kg ha^{-1} (Figura 1). En el cultivo de trigo, no se observaron diferencias en los rendimientos provocadas por la fertilización, mientras que no se modificaron por efecto de los sistemas de labranza y la interacción fertilización x labranza. El incremento en rendimiento debido a la fertilización fue superior a 1000 kg ha^{-1} (Figura 1). En soja 1ra se observó que los rendimientos fueron modificados por la fertilización, mientras que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de labranza e interacción labranza por fertilización. Los rendimientos aumentaron 180 kg ha^{-1} por efecto de la fertilización (Figura 1). En soja 2da los rendimientos no fueron modificados por los sistemas de labranza, fertilización y la interacción sistema de labranza x fertilización. En conclusión, los sistemas de labranza no modificaron los rendimientos mientras que hubo respuesta a la fertilización en la mayoría de los cultivos.

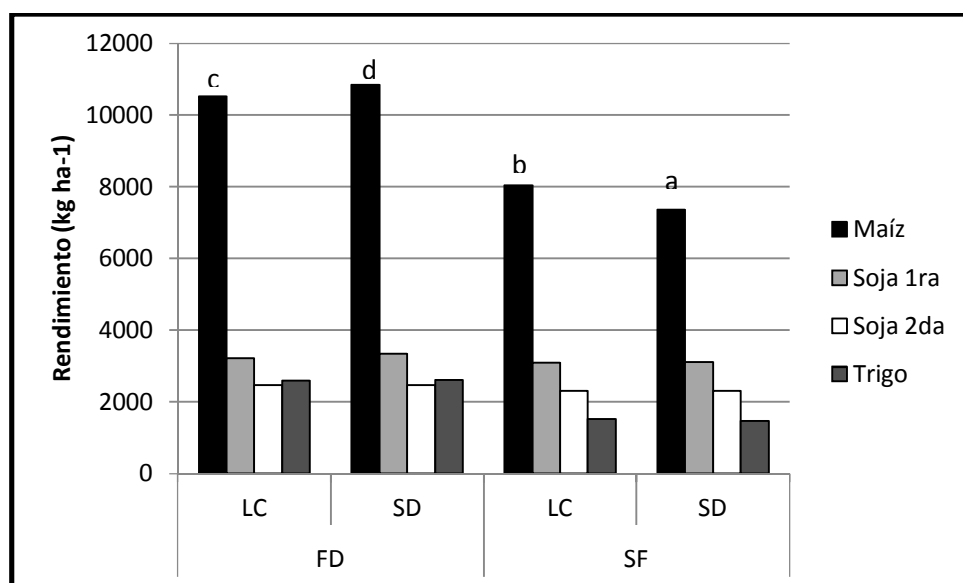


Figura 1: Rendimientos de maíz, soja 1ra, soja 2da y trigo en sistemas de labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con fertilización de diagnóstico (FD) y sin fertilización (SF). $n = 23$.

Letras distintas indican diferencias significativas en la interacción fertilización por sistema de labranza ($p < 0,05$) según LSD Fisher.

Los sistemas de labranza provocaron cambios en los niveles de COS. En un estudio llevado a cabo en el año 2001, luego de 8 años de iniciado el experimento, se observó que el contenido de COS fue mayor en SD que en LC, pero sólo en la profundidad 0 – 5 cm, sin diferencias en otras profundidades

(Tabla 1). El contenido de COS total fue similar entre sistemas de labranza a la profundidad 0 – 20 cm. En el mismo estudio se evaluó la tasa de liberación microbiana de C del suelo bajo SD y LC a campo. Se observó que bajo SD, la liberación de C era significativamente inferior que bajo labranza. Esto estuvo relacionado a los menores niveles de COS observado en 0-5 cm, tanto en presembrado como en poscosecha (Tabla 1). También se observaron cambios en la Dap del suelo determinada a la siembra, floración y poscosecha de maíz. Los valores de Dap siempre fueron menores bajo LC en 0-5 y 5-10 cm, sin cambios en las profundidades 10-20 y 0-20 cm (Tabla 1) como consecuencia de la remoción del suelo. Sin embargo, los mayores valores de Dap observados en SD no fueron un factor limitante para el crecimiento de las raíces, ya que en la mayoría de los casos estuvieron por debajo del umbral crítico para el desarrollo de las raíces de 1,45 Mg m⁻³.

Tabla 1: Densidad aparente y carbono orgánico del suelo (COS) en tres momentos del ciclo de maíz en el año 2001 para diferentes profundidades.

Etapa de maíz	Labranza	Profundidad (cm)							
		Densidad aparente (Mg m ⁻³)				Contenido de COS (Mg ha ⁻¹)			
		0-5	5-10	10-20	0-20	0-5	5-10	10-20	0-20
Pre-siembra	LC	1,11 b	1,14 b	1,33 a	1,23 a	7,3 b	6,7 a	13,1 a	27,1 a
	SD	1,24 a	1,29 a	1,26 a	1,26 a	8,8 a	7,1 a	12,0 a	28,0 a
Floración	LC	1,12 b	1,18 b	1,33 a	1,24 a	6,5 a	6,3 a	11,2 a	24,0 a
	SD	1,28 a	1,31 a	1,27 a	1,28 a	8,4 a	6,5 a	10,4 a	25,3 a
Post-cosecha	LC	1,07 b	1,20 b	1,33 a	1,23 a	7,2 b	8,3 a	13,2 a	28,7 a
	SD	1,13 a	1,28 a	1,26 a	1,23 a	9,8 a	7,5 a	13,1 a	30,4 a

LC, labranza convencional; SD, siembra directa. Letras diferentes muestran diferencias entre sistemas de labranza dentro de cada profundidad y momento de muestreo (test de Tukey <0,05).

Fuente: Costantini *et al.*, (2006).

En otro estudio se cuantificaron la cantidad de raíces colonizadas por micorrizas en soja, maíz y trigo en el ensayo de larga duración. Los resultados demostraron que están presentes incluso desde la etapa de implantación de estos cultivos (Figura 2). En general, LC fue poco favorable para el establecimiento de la simbiosis, mientras que la presencia de CC representó el mejor escenario para la formación de micorrizas (Concetti, 2012; Faggioli *et al.*, 2008a, b). Se observó que a dosis bajas de fertilización (FD) favorecieron la micorrización, especialmente en trigo y soja (Figura 2). En promedio,

durante la etapa de implantación, el 22, 35 y 40 % de trigo, soja y maíz, respectivamente, estuvieron colonizadas por hongos formadores de micorrizas. Estos valores se correlacionaron con la absorción de P de las plantas y variaron a lo largo de los ciclos de cada cultivo (Concetti, 2012; Faggioli *et al.*, 2008a, b). Los resultados obtenidos permitieron corroborar la presencia e importancia de estos componentes de la biota del suelo y su sensibilidad a las prácticas agrícolas.

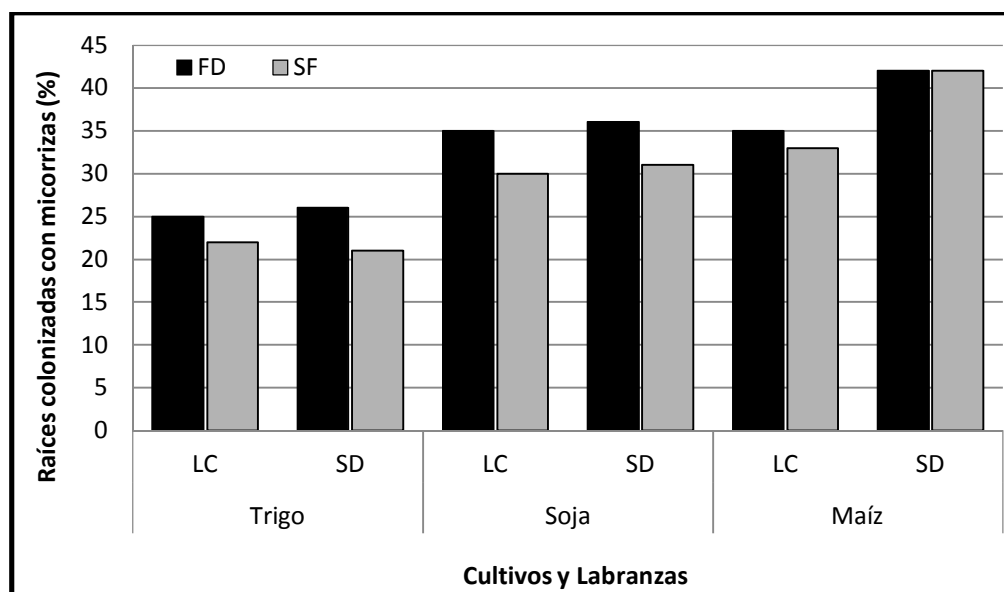


Figura 2: Porcentajes de raíces colonizadas con hongos formadores de micorrizas de trigo, soja y maíz durante el período de implantación (2 a 4 hojas totalmente expandidas) (adaptado de Concetti, 2012; Faggioli *et al.*, 2008a, b) en sistemas de labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con fertilización de diagnóstico (FD) y sin fertilización (SF). n= 23.

Efectos de estrategias de fertilización sobre el rendimiento de los cultivos.

El rendimiento del cultivo de trigo presentó diferencias significativas entre campañas ($p < 0,01$), entre estrategias de fertilización ($p < 0,01$) (Figura 3) e interacción entre campañas y estrategias de fertilización ($p < 0,01$). El menor rendimiento se registró durante la campaña 2008/2009, donde las precipitaciones desde abril hasta octubre fueron de 96 mm. El mayor rendimiento se produjo durante la campaña 2013/2014, donde las precipitaciones en el mismo período fueron de 310 mm (SIGA 2, 2017). En todas las campañas evaluadas el tratamiento SF tuvo rendimientos inferiores a los tratamientos fertilizados (excepto en las campañas 2008 y 2014). El rendimiento medio de SF fue superado en 1152 y 1708 kg ha⁻¹ por las estrategias FD y FR, respectivamente (Figura 3). Al considerarse todos los años evaluados la FR superó a la FD en 556 kg ha⁻¹ de producción promedio,

con diferencias significativas entre estos en algunas campañas (2004, 2006, 2010, 2011). En los primeros 6 años del ensayo sólo hubo dos niveles de fertilización (SF y FD) y el rendimiento fue mayor en el tratamiento FD en los años 1993 y 1994.

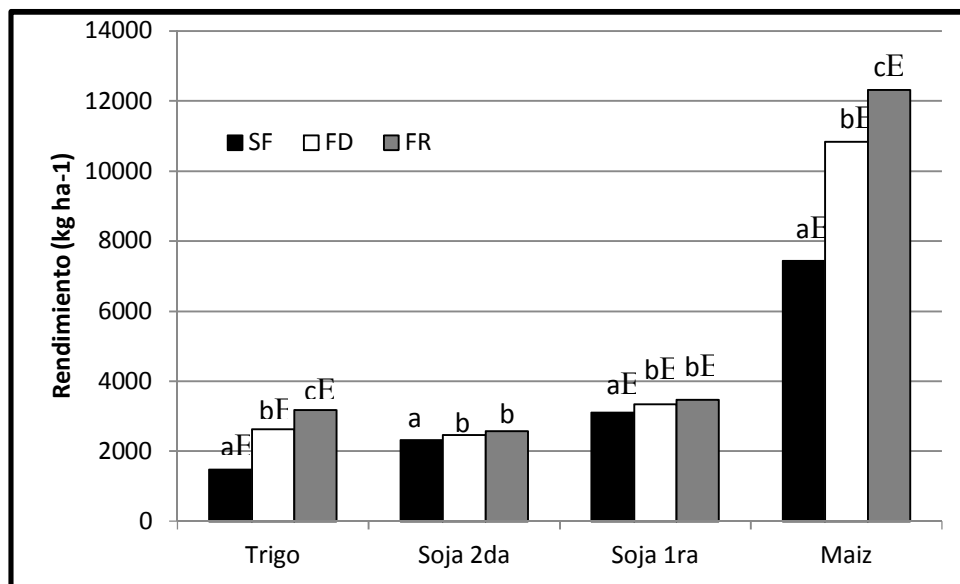


Figura 3: Rendimientos de trigo, soja 2da, soja 1ra y maíz con diferentes estrategias de fertilización.

SF: Sin fertilizar (n=63), FD: fertilización diagnóstico (n=63), FR: fertilización de reposición (n=48).

Letras distintas indican diferencias significativas entre estrategias de fertilización ($p < 0,05$).

En maíz se encontraron diferencias significativas entre campañas ($p < 0,01$), entre estrategias de fertilización ($p < 0,01$) e interacción entre campañas y estrategias de fertilización ($p < 0,01$). Se observaron rendimientos medios mínimos de 5788 kg ha^{-1} (campaña 1996/1997) y máximos de 14485 kg ha^{-1} (campaña 2010/2011). En todas las campañas evaluadas el tratamiento SF obtuvo un rendimiento inferior a los tratamientos fertilizados (excepto en las campañas 2012/2013 y 2013/2014). El rendimiento de SF (promedio de todos los años evaluados) fue superado en 3401 y 4881 kg ha^{-1} por las estrategias FD y FR, respectivamente (Figura 3). Al considerarse todos los años evaluados la FR superó a la FD en 1480 kg ha^{-1} de producción promedio, con diferencias significativas entre éstos sólo en dos campañas (2000/2001 y 2004/2005). En los primeros 6 años del ensayo sólo hubo dos niveles de fertilización (SF y FD). En ese periodo, el tratamiento FD presentó mayores rendimientos que SF en las campañas 1993/1994, 1997/1998 y 1998/1999.

En soja 1ra se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, campañas evaluadas e interacción entre éstas ($p < 0,05$). Se observaron rendimientos medios mínimos de 1811 kg ha^{-1} (campaña 1996/1997) y máximos de 4208 kg ha^{-1} (campaña 2005/2006). El rendimiento de SF (promedio de todos los años evaluados) fue 233 y 351 kg ha^{-1} menos que las estrategias FD y FR, respectivamente (Figura 3). El rendimiento de soja fue mayor en los tratamientos fertilizados en dos campañas (2001/2002 y 2007/2008), mientras que en el resto de los años no se observaron diferencias significativas entre estrategias de fertilización. En los primeros 6 años del ensayo sólo hubo dos niveles de fertilización (SF y FD). En ese periodo, el tratamiento FD presentó mayor rendimiento que SF sólo en la campaña 1998/1999.

En soja 2da se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, campañas evaluadas e interacción entre éstas ($p < 0,05$). Se obtuvieron rendimientos medios mínimos de 1426 kg ha^{-1} (campaña 2011/2012) y medios máximos de 3727 kg ha^{-1} (campaña 2000/2001). El rendimiento de SF fue 152 y 253 kg ha^{-1} menos que las estrategias FD y FR, respectivamente (Figura 3). El rendimiento de soja fue mayor en los tratamientos fertilizados en cuatro campañas (2005/2006, 2006/2007, 2007/2008, 2010/2011), mientras que en el resto de los años no se observaron diferencias significativas entre estrategias de fertilización. La FR presentó mayor rendimiento que FD sólo en la campaña 2010/2011. En los primeros 6 años del ensayo sólo hubo dos niveles de fertilización, SF y FD. En ese periodo, el tratamiento FD presentó mayor rendimiento que SF sólo en la campaña 1996/1997. En soja las respuestas a la fertilización fueron bajas, debido principalmente al buen nivel de Pe del suelo donde se encuentra instalado el ensayo y la capacidad del cultivo de captar y utilizar N atmosférico.

Efecto de la fertilización sobre variables de suelo

En octubre del año 2006, se evaluaron los contenidos de COS, carbono orgánico particulado (COP) y carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA) en la profundidad 0-18 cm. Se observó que el contenido de COS y COP ($2000 - 53 \mu\text{m}$) fue mayor en el tratamiento FR, mientras que no se observaron diferencias en la fracción COA ($< 53 \mu\text{m}$) entre tratamientos de fertilización (Figura 4). Estos resultados demostraron la utilidad de evaluar el COP, que responde más rápidamente a los cambios generados por las prácticas de manejo que la fracción COA. Por otro lado, la FR que presentó los mayores rendimientos de los cultivos de trigo, soja y maíz, presentó mayores aportes de

biomasa aérea y radicular. Esto se reflejó en los mayores contenidos de COS y COP observados en ese estudio.

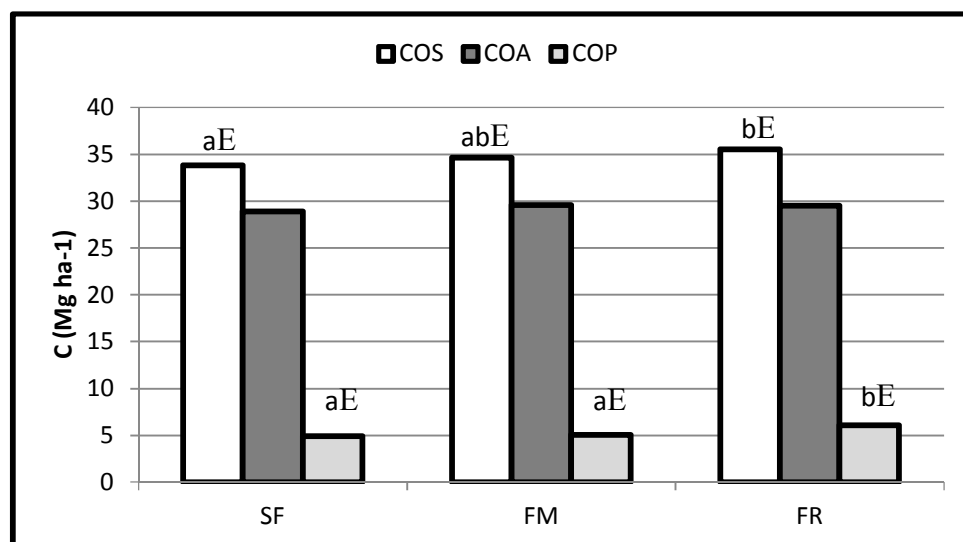


Figura 4: Contenidos de Carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA) y carbono orgánico particulado (COP) en la profundidad 0 – 18 cm. SF: Sin fertilizar, FD: fertilización diagnóstico y FR: fertilización de reposición.

Letras distintas indican diferencias significativas entre estrategias de fertilización ($p < 0,05$). (adaptado de Cazorla *et al.*, 2017).

En cuanto al pH del suelo, en los tratamientos fertilizados se produjo una acidificación de la capa superficial, siendo la FR la situación que presentó menores valores en la profundidad 0-5 y 0-10 cm en 2 años evaluados (Tabla 2). Según la clasificación en intervalos de acidez-alcalinidad ambas profundidades estudiadas de los tratamientos SF y FD, pueden catalogarse como moderadamente ácidos, y FR como fuertemente ácido de (Thomas, 1996). En otros ensayos de larga duración sobre suelos alfisoles y molisoles también se reportaron disminuciones del pH del suelo desde la superficie hasta los 15 cm de profundidad debidos a la aplicación de fertilizantes nitrogenados (Malhi *et al.*, 2011).

Tabla 2: Valor de pH (1:2,5) y fósforo extractable (Pe) según profundidad de muestreo y estrategia de fertilización en el mes de Octubre del 2009.

pH				
Año	Profundidad (cm)	FR	FD	SF
2009	0 - 5	5,17 a	5,83 b	6,20 b
	0 - 20	5,47 a	5,67 b	5,93 c
2012	0 - 10	5,16 a	5,43 b	5,83 c
Pe (mg kg ⁻¹)				
2009	0 - 5	181 b	121 b	40 a
	0 - 20	86 c	47 b	24 a

SF: Sin fertilizar, FD: fertilización diagnóstico, FR: fertilización de reposición).

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas entre estrategias de fertilización para cada profundidad evaluada dentro de cada año ($p < 0,05$) según LSD Fisher.

Las estrategias de fertilización modificaron los contenidos de fósforo extractable (Pe) en el horizonte superficial. En una evaluación realizada en el año 2009 previo a la siembra de los cultivos de verano se observaron diferencias significativas entre tratamientos, en las profundidades 0-5 y 0-20 cm (Tabla 2). En la profundidad de 0 a 5 cm los tratamientos FR y FD presentaron valores 350 y 200 % más de Pe que el tratamiento SF, respectivamente. En la profundidad 0-20 cm la FR y FD presentaron 258 y 96 % más de Pe que el tratamiento SF. Estas diferencias entre profundidades muestran la estratificación del Pe que se produce con fertilización de largo plazo en SD. El tratamiento SF no presentó disminuciones en los contenidos de Pe a pesar de que no tuvo aportes de P por parte de fertilizantes durante 16. En este ensayo Lardone *et al.*, (2012) reportaron que el tratamiento SF tuvo un balance negativo de P a través de los años. Este comportamiento pudo deberse a que el suelo aporta Pe a través de la mineralización de fuentes orgánicas e inorgánicas. En ensayos sobre suelos Argiudoles se reportó la capacidad de mineralizar P a partir de diferentes fuentes (Giuffrè *et al.*, 1998). Estos autores también reportaron que sería necesaria la inclusión de otras fracciones del P del suelo para complementar la medida de Pe. Los valores de Pe encontrados en superficie en este estudio, son para tener en cuenta, ya que se podrían transformar en una fuente de contaminación si se generan escurrimientos con arrastre de partículas de suelo en superficie.

Las metodologías basadas en la biología molecular permitieron profundizar los estudios sobre el impacto de prácticas agrícolas sobre la biota del suelo. Boccolini *et al.* (2016) estudiaron el efecto acumulado de la fertilización con urea sobre las comunidades de bacterias oxidantes del amoníaco (BOA), encargadas de la mineralización del N. El tratamiento FR produjo efectos positivos sobre la comunidad de un grupo de bacterias. Las BOA respondieron con cambios en la abundancia (Tabla 3) actividad y diversidad, demostrando su sensibilidad como indicadoras de calidad de suelo. A pesar de la disminución en el pH observada en este tratamiento, no afectó negativamente a las BOA.

Tabla 3. Valores medios y error estándar de abundancia, diversidad (H') de las bacterias oxidantes del amoníaco (BOA) y potencial de nitrificación de suelo (PNS) en los diferentes tratamientos de fertilización.

Tratamiento	Abundancia	PNS	H'
	(log ₁₀ n° bact.g ⁻¹)	(mg. N-NO ₃ ⁻ kg ⁻¹ d)	-
SF	2,65 ± 0,09 b	7,64 ± 1,56	2,74 ± 0,06 b
FD	3,01 ± 0,09 a	6,52 ± 0,9	2,84 ± 0,04 a
FR	2,96 ± 0,09 a	6,12 ± 0,72	2,83 ± 0,04 a
<i>P valor</i>	<0,0001	NS	<0,0001

SF: Sin fertilizar, FD: Fertilización de diagnóstico; FR: fertilización de reposición.

Letras distintas diferencias significativas (P< 0,0001) según LSD de Fisher.

Fuente: Boccolini *et al.*, (2016).

La densidad aparente (Dap) no fue modificada por estrategias de fertilización en ninguna de las profundidades evaluadas para las situaciones bajo SD (Tabla 4). Se observaron incrementos de Dap con la profundidad con valores fueron cercanos a 1,45 Mg m⁻³, reportados como la máxima Dap que estos suelos pueden alcanzar (Gerster, 2008; Ferreras *et al.*, 2007). La Dap presentó una relación lineal negativa y significativa (R²= 0.91; p<0,0001) con el contenido de COS (Cazorla *et al.*, 2017) similar a la observada en otros estudios (Franzluebbers, 2002). Los valores de Dap en siembra directa en el año 2006 en la profundidad 10-20 cm fueron superiores (1,38 a 1,41 Mg m⁻³) a los observados en SD en el año 2001 (1,23 a 1,41 m⁻³) por Costantini *et al.*, (2006) (Tabla 1).

Tabla 4: Estabilidad de agregados (EA) en tratamientos de fertilización en siembra directa para las profundidades 0 – 5, 5 – 10 y 10 – 18 cm evaluada con dos pre-tratamientos de la muestra, humedecimiento lento (HL) y humedecimiento rápido (HR).

Profundidad	Tratamiento	EA HL	EA HR	Dap (g cm ⁻³)
0 – 5 cm	SF	2,70 a	0,56	1,12
	FD	2,75 a	0,5	1,06
	FR	3,10 b	0,49	1,18
5 – 10 cm	SF	3,04 b	0,45 c	1,34
	FD	3,06 b	0,38 ab	1,32
	FR	2,77 a	0,36 a	1,34
10 – 18 cm	SF	2,42	0,4	1,41
	FD	2,68	0,34	1,38
	FR	2,65	0,35	1,41

SF: Sin fertilizar; FD: Fertilización de diagnóstico; FR: Fertilización de reposición.

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según LSD Fisher.

Adaptado de Cazorla *et al.*, (2017).

La estabilidad de agregados (EA) se modificó por efecto de los tratamientos de fertilización en SD. La EA se evaluó con dos pre-tratamientos: humedecimiento lento (HL) y humedecimiento rápido (HR) según la metodología propuesta por Le Bissonais (1996) en el año 2006. El valor de EA se obtuvo a través del diámetro medio ponderado de los agregados resultantes del tamizado. La EA HL fue mayor en los tratamientos FR y FD + CC para la profundidad 0–5, mientras que fue menor en el tratamiento FR en la profundidad 5–10 cm, y no hubo diferencias entre tratamientos en la profundidad 10–18 cm. La EA HL presentó una correlación positiva y significativa con el COA de la fracción $< 53 \mu\text{m}$. Esta correlación pudo deberse a que la EA en condiciones de suelo húmedo depende de agentes de unión persistentes tales como compuestos organo-minerales (Tisdall & Oades, 1982) que forman entre el 85 y el 90 % del COS en suelos franco limosos.

La EA HR fue mayor en SF con respecto a FD y FR en la profundidad 5 – 10 cm, sin cambios en el resto de las profundidades (Tabla 4). La EA en condiciones de HR presentó correlaciones positivas y significativas con COP 2000-212 μm ($R^2 = 0,44$; $p < 0,001$) y COA $< 53 \mu\text{m}$ ($R^2 = 0,58$; $p < 0,001$). A diferencia de la EA en suelo húmedo, la EA en HR presentó una correlación positiva con la fracción más joven del COS. Los contenidos de COP incrementan la hidrofobicidad de los agregados y su

cohesión interna por lo que es mayor la resistencia de los agregados frente a las fuerzas que podrían provocar estallido (Chenu *et al.*, 2000). La menor resistencia de los agregados al estallido conduce a una mayor oclusión del espacio poroso del suelo disminuyendo la entrada de agua dentro de los agregados (Caron *et al.*, 1996). Estas relaciones han sido reportadas por diferentes estudios (Angers & Mehuys, 1993) y ponen de manifiesto la importancia del COP en mantener la fertilidad física de los suelos en sistemas agrícolas continuos. La EA HL es mayor que en HR y esto se debió a que dependen de diferentes fracciones del COS. Mientras la primera depende de constituyentes estables que son predominantes en este tipo de suelos, la segunda depende de la fracción joven, que fue la más afectada por el manejo agrícola.

Efectos de los cultivos de cobertura y la fertilización sobre el rendimiento de los cultivos.

El efecto de los CC se evaluó en el ensayo en dos periodos. El primero abarcó desde el año 1993 hasta el año 2011 (Figura 5 a y b) y los tratamientos evaluados fueron barbecho (B) y CC con dos niveles fertilización (SF y FD). A partir del año 2012 (Figuras 6 a, b, c y d), se incorporó un nivel más de fertilización (SF, FD y FR).

Cuando se utilizaron CC leguminosas (1993 a 1997) se observaron disminuciones significativas en el rendimiento de maíz en 2 de las 5 campañas evaluadas (Figura 5 a). En cambio cuando el antecesor CC fue gramínea provocó una disminución significativa en los rendimientos de maíz en 9 de las 14 campañas evaluadas (Figura 5 a). Cosentino *et al.*, (2008) reportaron menores contenidos de agua útil a la siembra de maíz en los tratamientos con CC en el mismo presente ensayo. Otros trabajos reportan una disminución en los contenidos de nitratos del perfil a la siembra del maíz (Restovich *et al.*, 2012; Cazorla *et al.*, 2013). Estas causas podrían explicar la disminución significativa en los rendimientos en la mayoría de los años cuando se incluye un CC gramínea como antecesor de maíz de siembra temprana. En un meta análisis realizado sobre el efecto de los CC en el rendimiento de maíz en la región pampeana Argentina, se reportó una disminución en los rendimientos de maíz cuando el CC antecesor fue gramínea, mientras que esta disminución no ocurrió cuando el CC antecesor fue leguminosa (Alvarez *et al.*, 2017).

Se observaron disminuciones significativas en el rendimiento medio de soja 1ra sólo en 2 de las 14 campañas analizadas (1996/1997 y 1998/1999) cuando se incluyó un CC gramínea (Figura 5 b). El efecto de la inclusión de CC antecesor de soja fue menor al observado en maíz. Esto pudo deberse a

que el cultivo de soja se siembra más tarde que el cultivo de maíz en la región y por lo tanto es más probable una recarga de agua disponible en el suelo por parte de las precipitaciones. Otro aspecto a tener en cuenta es que la disminución en el contenido de nitratos en el suelo provocada por los CC no afecta el rendimiento de cultivos leguminosas como soja (Alvarez *et al.*, 2017). El rendimiento de trigo en los tratamientos que tuvieron CC en los años anteriores fue mayor que en los tratamientos sin CC en 3 de los 14 años evaluados (2000, 2006 y 2011) y también fue mayor en soja 2da en 1 de los 14 años evaluados (1995) (datos no mostrados).

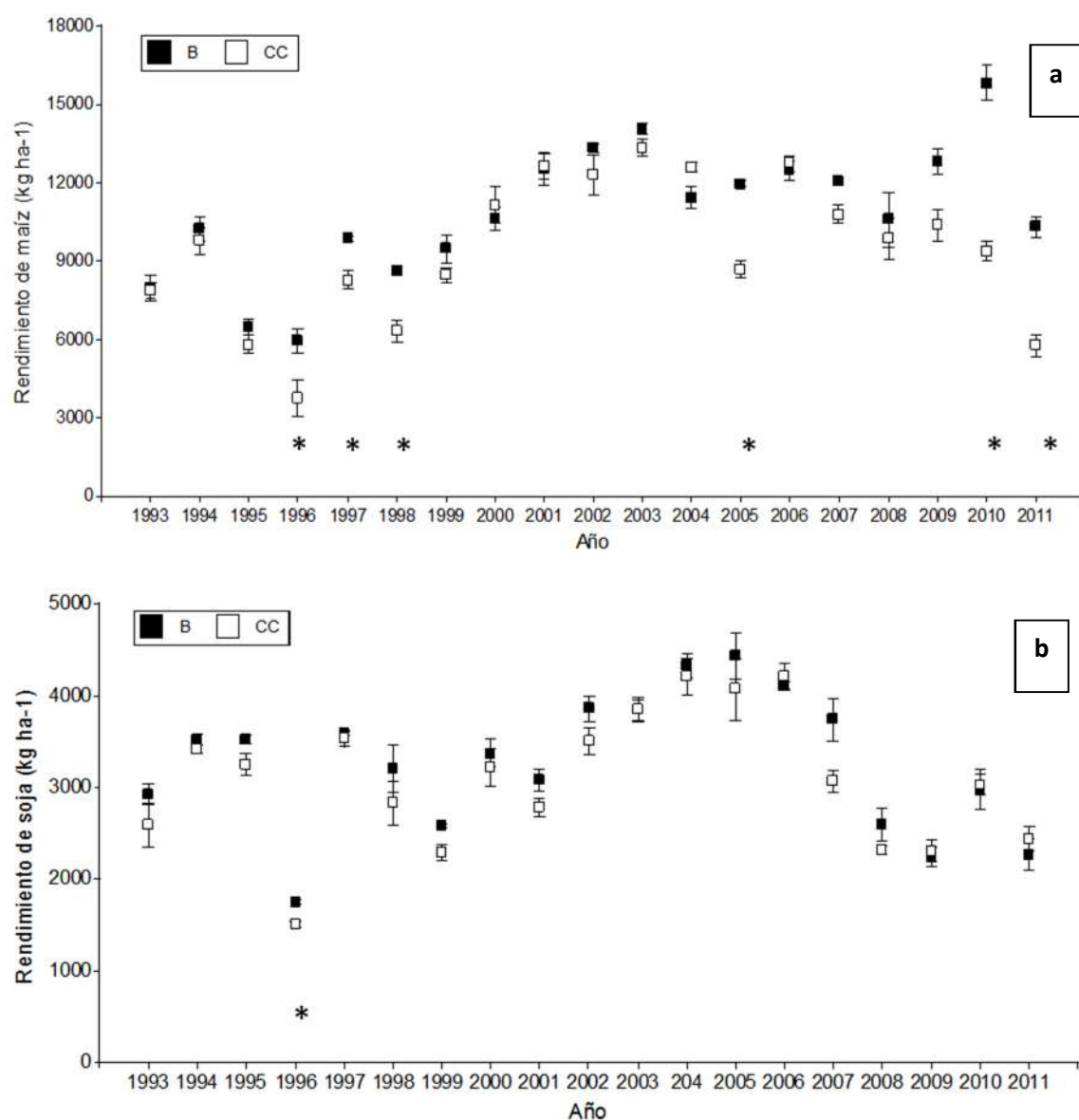


Figura 5: Rendimientos de maíz (a) y soja 1ra (b) en los tratamientos barbecho (B) y cultivos de cobertura (CC). Asteriscos indican diferencias significativas entre tratamientos. ($p < 0,05$).

La inclusión de CC como antecesor del maíz en diferentes estrategias de fertilización en las campañas 2012/2013 al 2015/2016 no generó una disminución significativa en los rendimientos con respecto a B (Figura 6 a). Sí se observó un efecto positivo de la fertilización sobre el rendimiento del maíz, ya que FD y FR superaron al tratamiento SF, sin diferencias entre ellos. En esta etapa del ensayo, el antecesor CC utilizado fue vicia, y tiene como características que es una leguminosa invernal que aporta N y tiene un residuo de baja relación C/N que no inmoviliza el N del suelo (Capurro et al., 2012).

En el cultivo de soja 1ra se pudo observar que no hubo diferencias de rendimiento entre los antecesores B y CC gramíneas y sí las hubo entre estrategias de fertilización. Para ambos antecesores, los rendimientos fueron mayores con FD y FR, con respecto a SF, sin diferencias entre ellos (Figura 6 c). En el cultivo de trigo se observaron diferencias significativas de rendimiento en los tratamientos con CC en la rotación (Figura 6 b). Los mayores rendimientos fueron observados en FD, sin diferencias entre CC y B. En cambio en SF y FR, los rendimientos de trigo fueron mayores en las situaciones B, con respecto a CC. En el cultivo de soja 2da, no se observaron diferencias en los rendimientos entre tratamientos con o sin CC en la rotación, entre dosis de fertilización o la interacción entre ambos (Figura 6 d).

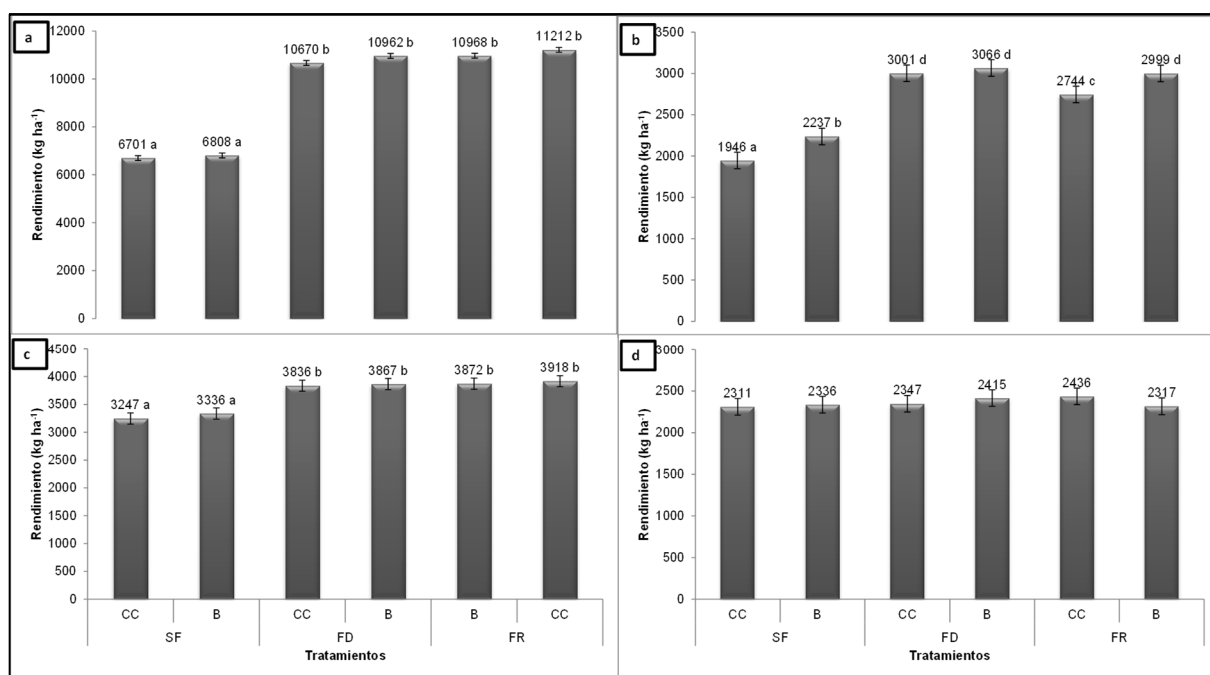


Figura 6: Rendimientos de maíz (a), trigo (b) soja 1ra (c) y soja 2da (d) con diferentes estrategias de antecesores y niveles de fertilización. CC: antecesor cultivo de cobertura; B: antecesor barbecho; SF: sin fertilizar; FD: fertilización de diagnóstico. FR: fertilización de reposición (n=9). Letras distintas indican diferencias significativas entre estrategias de fertilización y antecesores barbecho o CC. (p<0,05).

El aporte de biomasa aérea y radicular de los CC tiene efectos positivos en la calidad del suelo. Se observaron incrementos en los valores de COS y COP por la inclusión de CC, debido a mayores aportes de biomasa aérea y radicular (Tabla 5). También se observó un incremento de la infiltración acumulada de agua en el suelo y en la EA en condiciones de humedecimiento lento, mientras que los valores de Dap no fueron modificados. Las propiedades biológicas del suelo también marcaron un efecto positivo de los CC. Por ejemplo, Ferreras *et al.* (2009), midieron enzimas implicadas en los ciclos del fósforo (fosfatasa) y del nitrógeno (ureasa), debido a su estrecha relación con la mineralización de nutrientes esenciales para los cultivos. La actividad de las fosfatasas fue incrementada por la presencia de CC en comparación con SD con B y LC (Tabla 5). Este resultado podría implicar mejoras en el aprovechamiento de las fuentes orgánicas de P del suelo gracias a la inclusión de CC.

Tabla 5: Parámetros bioquímicos en los tratamientos con y sin CC. Carbono biomasa microbiana (CBM), actividad respiratoria microbiana (ARM), cociente metabólico (qCO_2), carbono orgánico del suelo (COS), carbono orgánico particulado (COP), densidad aparente (Dap), estabilidad de agregados (EA) en humedecimiento lento (HL) y humedecimiento rápido (HR).

Variable	B	CC	Profundidad	Referencia
CBM ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1}$)	149,73 b	216,55 a		
ARM ($\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ día}^{-1}$)	43,49	54,19		
qCO_2	0,33	0,27	0 - 7.5 cm	Ferreras et al., 2009
Fosfatasa ($\mu\text{g PNP h}^{-1} \text{ g}^{-1}$)	512,34 b	567,22 a		
Deshidrogenasa ($\mu\text{g TFP h}^{-1} \text{ g}^{-1}$)	6,90 b	8,97 a		
Ureasa ($\mu\text{g NH}_4^+ \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1}$)	40,75 b	65,76 a		
COS (Mg ha^{-1})	34,7 b	36,7 a	0 - 18 cm	
COP (Mg ha^{-1})	5,04 b	6,29 a		
Dap (Mg m^{-3})	1,06	1,1		Cazorla et al., 2017
EA HL	2,75 b	3,18 a	0 - 5 cm	
EA HR	0,5	0,57		
Infiltración (mm hora^{-1})	80,4 b	107,6 a		Alvarez et al., 2016

B: Barbecho; CC: Cultivo de cobertura. Letras distintas indican diferencias significativas entre estrategias de fertilización ($p < 0,05$) según LSD Fisher. Letras distintas indican diferencias significativas. LSD Fisher ($p < 0,05$).

Conclusión

La SD es el sistema de labranza que presentó mayores rendimientos, contenidos de carbono y mejora en propiedades biológicas.

La fertilización con reposición de nutrientes presentó los mayores rendimientos en los cultivos de trigo y maíz, sin diferencias en los cultivos de soja 1ra y soja 2da. Esto estuvo asociado a mayores aportes de C al suelo, con incrementos en los contenidos de COS y COP en el horizonte superficial. Sin embargo se observó una acidificación y estratificación superficial del Pe.

La utilización de CC gramínea deprimió los rendimientos de maíz, mientras que no ocurrió lo mismo cuando el CC fue leguminosa. Los rendimientos no se modificaron en soja 1ra por efecto de los CC. Los CC aumentaron los contenidos de COS con mejoras en propiedades físicas y biológicas.

Acciones a futuro

A partir de los resultados obtenidos en los sistemas de labranza, se considera necesario mantener los tratamientos de labranza convencional (a pesar de que el sistema de siembra directa es el predominante en la zona en estudio) para validar a más largo plazo los resultados obtenidos. La fertilización de reposición de nutrientes es una práctica adecuada desde el punto de vista de la productividad, pero es necesario profundizar evaluando aspectos ambientales, ya que se observó una acidificación superficial y acumulación de fósforo extractable. La evaluación conjunta de la fertilización de reposición de nutrientes y el uso de cultivos de cobertura es nueva en el ensayo y es necesario medir variables de suelo y cultivo a través del tiempo. En la mayoría de los años que se incluyó un CC como antecesor de maíz temprano, se observaron disminuciones en el rendimiento, por lo tanto se debería considerar modificar este tratamiento eliminando el CC en esta fase de la rotación o retrasar la fecha de siembra del maíz. Es necesario realizar evaluaciones de impacto ambiental de estas prácticas (utilización de herbicidas y fertilizantes) integrar los resultados con aspectos económicos, para evaluar de manera integral la sustentabilidad de estos agro ecosistemas.

Bibliografía

- Agroindustria. 2017. Estimaciones de producción, datos abiertos de [Subsecretaría de Agricultura](https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones), Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos. <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> Último acceso junio de 2017.
- Alvarez, C; M Barraco, C Cazorla, JC Colazo, J De Dios Herrero, A Lardone, P Girón, S Restovich & S Rillo. 2016. Mejora de propiedades edáficas con inclusión de cultivos de cobertura en agroecosistemas pampeanos. Proceedings of XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

- Alvarez, R; HS Steinbach & JL De Paepe. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil & Tillage Research* 170: 53-65.
- Angers, DA & GR Mehuys. 1993. Aggregate stability to water. In: Carter, M.R. (Ed.), *Manual on Soil Sampling and Methods of Analysis*. Chapter 61, CRC Press, Boca Ratón, Florida, pp. 651-658.
- Barbosa, O; M Taboada, M Rodríguez & D Cosentino. 1997. Regeneración de la estructura en diferentes fases de degradación de un suelo franco limoso de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 15: 81-86.
- Bertolla, A; T Baigorria, D Gómez, C Cazorla, M Cagliero, A Lardone, M Bojanich, B Aimetta. Efecto de la fertilización sobre la eficiencia del uso del agua de especies invernales utilizadas como cultivos de cobertura. C. Alvarez, A. Quiroga, D. Santos, M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción*, Ediciones INTA, La Pampa, Argentina (2013), pp. 138-147.
- Boccolini, MF, LA Basile, CR Cazorla, CM Galarza, B Conde & ELM Figuerola. 2016. Impacto de la aplicación prolongada de urea sobre bacterias nitrificantes de un Argiudol típico, Argentina. *Ciencia del suelo* 34: 21-31.
- Bonel, BA, HJM Morrás, & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23: 1-12.
- Capurro, J; MJ Dickie, D Ninfi, A Zazzarini, E Tosi & MC González. 2012. Vicia y avena como cultivos de cobertura en maíz. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 6: 20-22.
- Caron, J., CR Espinolda, & DA Angers. 1996. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. *Soil Science Society of American Journal* 60: 901-908.
- Cazorla, C; JM Cisneros, I Moreno & CM Galarza. 2017. Mejora en el carbono del suelo y propiedades físicas por fertilización y cultivos de cobertura. *Ciencia del suelo* 35 (2): 301-314.
- Chenu, C., Y Le Bissonnais & Arrouays, D. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society American Journal* 64: 1479-1486.
- Concetti, D. 2012. Efecto de diferentes sistemas de manejo del suelo sobre su infectividad potencial y micorrización de soja y trigo. Tesis para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Villa María.
- Cosentino, D & C Pecorari, C. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Cosentino, DJ, AO Costantini & C Galarza. 2008. Efectos del cultivo de cobertura y la fertilización sobre algunas propiedades de un argiudol pampeano y el rendimiento del cultivo de maíz." *XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Luis. Argentina.
- Costantini, A; H De-Polli, C Galarza, RP Rossiello & R Romaniuk. 2006. Total and mineralizable soil carbon as affected by tillage in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 88: 274-278.
- Covacevich, F, HE Echeverría & LA Aguirrezabal. 2007. Soil available phosphorus status determines indigenous mycorrhizal colonization of field and glasshouse-grown spring wheat from Argentina. *Applied Soil Ecology* 35(1): 1-9.
- Dick RP. 1992. A review: long-term effects of agricultural systems on soils biochemical and microbial parameters. *Agricultural Ecosystem Environmental* 40: 25-36.
- Doran JW, M Sarrantonio & MA Liebig. 1996. Soil health and sustainability. *Advance in Agronomy* 56:1-54.

- Faggioli, VS. 2012. Micorizas en soja: beneficios y manejo de suelos para su conservación. Jornada de Actualización técnica de soja. INTA EEA Marcos Juárez. Disponible en: https://micored.files.wordpress.com/2013/03/micorizas-y-soja-inta_sojamicorizas12.pdf
- Faggioli, VS; GS Freytes y C Galarza. 2008a. Micorizas en trigo y su efecto en la absorción de fósforo del suelo. Trigo: Jornada de Actualización Técnica para profesionales 2008. Actas, junio de 2008
- Faggioli, VS; GS Freytes y C Galarza. 2008b. Micorrización natural en maíz y su relación con la absorción de fósforo del suelo en diferentes sistemas de labranza y fertilización. Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis, mayo de 2008
- Ferreras, L; G Magra, P Besson, E Kovalevski & F 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; S Toresani, B Bonel, E Fernández, S Bacigaluppo, V Faggioli & C Beltrán. 2009. Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo* 27: 103-114.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research* 66: 197 – 205.
- Gerster, G. 2008. Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico. Tesis de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Universidad Nacional de Rosario. 109 pp.
- Ghera, CM; MA Martinez Ghera, & RJC León. 1998. Cambios en el paisaje pampeano y sus efectos sobre los sistemas de soporte de la vida. En: Hacia una agricultura productiva y sostenible en la pampa. Pp. 38-68. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.
- Giuffré, L; MS Zubillaga, OS Heredia & F Missart. 1998. Mineralización de fósforo en molisoles pampeanos. *Ciencia del Suelo* 16: 99-102.
- INDEC. 2002. Censo Nacional Agropecuario año 2002. Cuadro 17. Superficie implantada en siembra directa, por cultivo según provincia. Total del país. Año 2002. http://www.indec.gob.ar/cna_index.asp. último acceso Agosto de 2018.
- INTA. 1978. Secretaría de Agricultura y Ganadería de la Nación. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3363 – 17. Marcos Juárez.
- Kemper, W & R Rosenau. 1986. Aggregate stability and size distribution. En Klute A. (ed.) Methods of soil analysis. Vol.1. 2nd ed. Pp. 425-442. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA.
- Kiff, L; B Pound & R Holdsworth. 1996. Covercrops: A review and database for field users. Natural Resources Institute, Chatham, UK, pp. 180.
- Lardone, AV; CR Cazorla & CM Galarza. 2012. Fertilización en el sud-este de Córdoba: rendimientos y efectos sobre algunas propiedades edáficas. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, 16 al 20 de abril de 2012.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science* 47, 425–437.
- Malhi, SS; N Nyborg; T Goddard & D Puurveen. 2011. Long-term tillage, straw and N rate effects on some chemical properties in two contrasting soil types in Western Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 90: 133-146.
- Marelli, H & J Arce. 1989. Siembra directa de soja sobre trigo. En: IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Tomo II. Buenos Aires, Argentina, pp. 604-614.
- Melgar, R. 1997. El diagnóstico de la necesidad de fertilización. En: Melgar, R y Díaz Zorita, M (Eds.) La fertilización de Cultivos y Pasturas. Pp. 125-138. Ed. Hemisferio Sur, Buenos Aires.

-
- Silvina B. Restovich, Adrián E. Andriulo, Silvina I. Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research* 128: 62-70.
- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2005. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research* 87: 9-18.
- SIGA2. 2017. – Sistema de Información y Gestión Agro meteorológico. Estación Meteorológica Convencional - EEA INTA Marcos Juárez. <http://siga2.inta.gov.ar/en/datoshistoricos/> Ultimo acceso junio de 2017.
- Smith SE & DJ Read. 2008. Mycorrhizal Symbiosis. Accademic Press. 3rd Edition. 787 páginas
- Taboada, MA; FG Micucci, DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils. *Soil & Tillage Research* 49, 57-63.
- Thomas, GW. 1996. Soil pH and soil acidity. Methods of Soil Analysis Part 3: Chemical Methods. 475-490.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.
- Urricarriet, S & RS Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17: 37-44.

Rotaciones con arroz y parámetros de calidad de suelo en el Centro de Entre Ríos

Juan Jose De Battista J¹, M Benintende², Silvia Benintende², Marcelo Wilson²³, Norma Arias¹, Hector Rodríguez⁴, Jorge Cerana² & H Muller⁵

¹ INTA EEA C. del Uruguay; ² Facultad Ciencias Agrarias –UNER; ³ INTA EEA Paraná; ⁴ INTA AER San Salvador; ⁵ Actividad privada

Descripción regional

En Entre Ríos el arroz se cultiva principalmente en el este de la provincia entre los ríos Gualeguay y Uruguay. El clima es templado húmedo de llanura (Rojas y Saluso, 1987) con una temperatura media anual de 18°C, precipitación anual entre 1000 y 1200 mm. El balance hídrico decádico muestra alta frecuencia de valores de evapotranspiración (ET_o) ligeramente superiores a los de precipitaciones, este déficit es más marcado en los meses de diciembre y enero, el período con riesgo de heladas se extiende de mayo a septiembre (Brizuela 2006).

Los suelos predominantes pertenecen al orden de los Vertisoles que se ubican en un paisaje de peniplanicie muy suavemente ondulada, con pendientes suaves (0,5 – 2,5 %). generalmente largas. En las zonas altas más planas, sobre la cuchilla Grande, se encuentran Argiacuoles vérticos y Peludertes argiacuólicos, en las medias lomas éstos y Peludertes argiudólicos y en las zonas bajas en las costas de arroyos Argiudoles ácuicos (De Petre y Boschetti 2006)

Los sistemas productivos predominantes en la zona arrocería del centro- este de Entre Ríos hasta los 90 fueron predominantemente ganaderos- agrícolas. Tradicionalmente el cultivo de arroz se realizó 2 o 3 años en el mismo lote y cuando los rendimientos descendían por pérdida de fertilidad o enmalezamiento se dejaba en descanso durante 4 - 7 años para luego volver nuevamente al arroz. En el período de descanso se regeneraba una vegetación dominada por gramíneas estivales utilizada para ganadería de cría.

En la década de los 80, se difundió la siembra aérea de pasturas sobre el rastrojo de arroz lo que permitió la realización de invernada en empresas de cría y mejoró la recuperación de los suelos para el arroz por la mayor productividad de la pastura respecto a la comunidad seral.

Problemática de estudio

La expansión de la agricultura a partir de la década de los 90 impulsada por los precios de los granos produjo cambios importantes en los sistemas productivos de Entre Ríos, en especial en las zonas arroceras del este y norte de la provincia. En una primera etapa, hasta 1998, se incrementó la proporción de arroz en la rotación pasando de uno o dos cultivos de arroz seguidos por cinco o más años de campo natural y rotaciones de un año de arroz y cuatro años de pastura polifítica a dos o más años de arroz seguidos de arroz-raigrás-arroz. A partir del 2000 el cultivo de soja se difundió a las zonas tradicionalmente ganaderas-arroceras predominando la secuencia arroz-soja (De Battista et al., 2001). En los últimos años se profundizó el proceso con la expansión del cultivo de soja tanto por los productores locales como de empresas de otras regiones que alquilan campos en la zona lo que provocó una importante disminución, y en muchos casos la desaparición de las pasturas de la rotación. Este nuevo escenario planteó interrogantes sobre la sustentabilidad ecológica, económica y social de los sistemas productivos basados en cultivos regionales como el arroz.

Ante esta situación la Fundación Proarroz y la EEA INTA C. del Uruguay implementaron un ensayo de larga duración para evaluar diferentes rotaciones con arroz en San Salvador, la zona núcleo de producción arroceras de Entre Ríos. La Fundación Proarroz financió durante 8 años los trabajos en el campo y las mediciones llevadas a cabo por un equipo de investigadores de INTA y la FCA-UNER, pasantes y tesistas con el fin de contar con referencias locales sobre las modificaciones en las propiedades de los suelos bajo distintas secuencias de cultivos. Se elaboró un proyecto a largo plazo con el objetivo de estudiar la evolución de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo con diferentes rotaciones, seleccionar indicadores de calidad de suelo y elaborar criterios de manejo con el fin planificar un uso sustentable del mismo. Este trabajo es una revisión y actualización de De Battista et al (2008) en el que se presenta la evolución de parámetros químicos y biológicos del suelo luego de dos ciclos de rotaciones iniciadas en la campaña 1999-00 y finalizadas en 2007-08 y las evaluaciones físicas al término del primer ciclo de rotaciones.

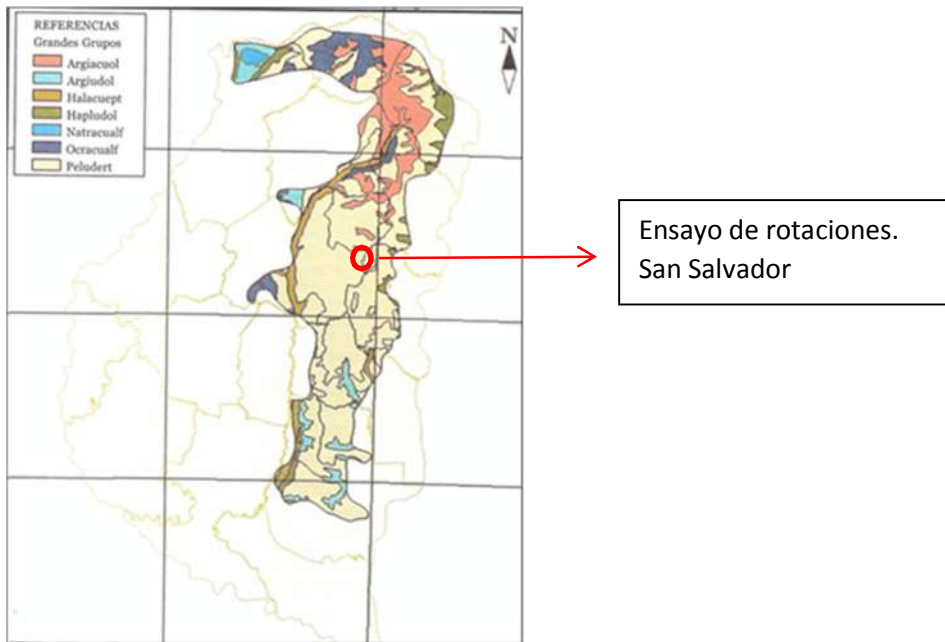


Figura 1. Suelos arroceros de Entre Ríos (De Petre y Boschetti 2006)

Características del experimento

El campo experimental de rotaciones se implementó en un lote típico de la zona de 29 has en el que predomina la serie de suelos Don Guillermo (Peluderte árgico) con escaso uso agrícola y que permaneció como campo natural los quince años previos al primer cultivo de arroz en la campaña 1999/00 en toda la superficie, luego se dividió en cuatro lotes de aproximadamente 7 has cada uno implementándose las siguientes rotaciones: Arroz, Soja (Ar-Sj), Arroz, Maíz, Soja (Ar-Mz-Sj), Monocultivo de arroz (Ar-Ar), y Rotación Pradera durante tres años-Arroz (Ar-PP) (Tabla 1)

Tabla 1 – Secuencia de cultivos para cada tratamiento de rotación.

Campaña	Lote 1 (Ar-Sj)	Lote 2 (Ar-Mz-Sj)	Lote 3 (Ar-Ar)	Lote 4 (Ar-PP)
1999-00	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz
2000-01	Soja	Soja	Arroz	Moha-Pradera
2001-02	Arroz	Maíz	Arroz	Pradera
2002-03	Soja	Soja	Arroz	Pradera
2003-04	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz
2004-05	Soja	Soja	Arroz	Pradera
2005-06	Arroz	Maíz	Arroz	Pradera
2006-07	Soja	Soja	Arroz	Pradera
2007-08	Arroz	Arroz	Arroz	Arroz

En el invierno siguiente a cada campaña de cultivo se tomaron 4 muestras compuestas del horizonte superficial (0-15 cm) y se analizaron algunos parámetros químicos: contenido de materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), fósforo disponible (P), sodio intercambiable (Na), potasio intercambiable (K), y pH. Al final de cada ciclo de rotación, cada cuatro años, se realizaron evaluaciones físicas: estabilidad de agregados, porosidad y resistencia a la penetración, y biológicas: nitrógeno potencialmente mineralizable (NPM), carbono (CBM) y nitrógeno (NBM) de la biomasa microbiana.

Las labranzas y siembras se realizaron con equipos de contratistas, las rotaciones agrícolas se laborearon casi anualmente, aunque la idea fue reducirlas al mínimo, sólo dos años se logró sembrar el arroz sobre el rastrojo de soja laboreando solo la zona de construcción de taipas (bordos o camellones de 30-40 cm de altura y 2 m de ancho contruidos en curvas de nivel para retener el agua). En el monocultivo de arroz el laboreo fue más intenso que en los otros ya que luego del cultivo de arroz se requieren varias labores para eliminar las taipas y huellas, emparejar el microrrelieve y preparar una correcta cama de siembra. Normalmente se utilizó una rastra de discos pesada, dos pasadas de rastra de discos liviana, rastrón, y el taipero para la construcción de taipas. Cuando fue necesario labrear luego de soja o maíz por haber dejado huellas durante la cosecha se realizó una sola pasada de rastra de discos liviana y rastrón. En el lote 2 el maíz 2005 se realizó en siembra directa sobre soja. La fertilización de los cultivos se realizó de acuerdo con las pautas regionales. Se aplicaron entre 9 y 15 kg de Pha^{-1} a todos los cultivos, y entre 40 y 60 kg de Nha^{-1} en arroz y maíz; la pastura solo recibió fertilización fosfatada en la implantación y no se fertilizó con nitrógeno. En el

invierno 2007 se laboreó toda la superficie del ensayo, se construyeron las taipas para el cultivo de arroz y se realizó el muestreo de suelos.

El diseño utilizado fue completamente aleatorizado con 4 repeticiones. Se realizó un ANOVA para cada campaña y las medias se compararon mediante el test de DMS de Fisher

Resultados

Materia orgánica

Al iniciarse el uso agrícola del lote se produjo una brusca disminución en el contenido de MO. Las rotaciones Ar-PP y Ar-Sj mostraron similar comportamiento hasta el 2004 con valores estables cercanos a 4.2%. A partir de 2005 en la rotación Ar-PP aumentó el contenido de MO llegando en el 2006 al valor inicial, 4.7%.

En 2007 todos los tratamientos mostraron una disminución asociada al efecto del laboreo para la preparación del suelo para arroz. (Figura 1). Luego de dos ciclos, las rotaciones agrícolas mostraron un contenido significativamente menor de MO que la rotación arroz-pastura ($p < 0,01$). En promedio las rotaciones agrícolas presentaron un contenido de MO 20% inferior al de de arroz-pastura (3,61% vs. 4,53%), lo que significa 8,8 ton de carbono menos en el horizonte superficial (Tabla 2).

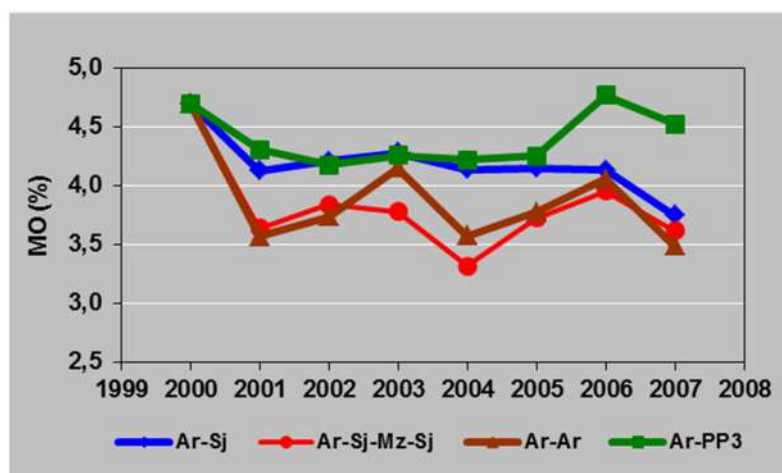


Figura 2. Evolución de la Materia Orgánica en las diferentes rotaciones.

Los aportes de rastrojo en las rotaciones agrícolas fueron en promedio 6,08; 4,39 y 4,08 ton (ha año)¹ para Ar-Ar, Ar-Sj y Ar-Sj-Mz-Sj. respectivamente. El bajo aporte de la rotación con maíz se debe a

que en los dos años en que se realizó este cultivo el crecimiento estuvo muy limitado por déficit hídrico, principalmente en la campaña 2005-06 en que no se llegó a cosechar, exportando la mayor parte de la biomasa producida como rollos para reserva de forraje. Se estimó un aporte de solo 2.8 ton ha⁻¹ de rastrojo de ese cultivo.

Tabla 2. Resultados del análisis del suelo en las diferentes rotaciones en 2007.

Variable	Ar-PP	Ar-Sj	Ar-Sj-Mz-Sj	Ar-Ar
MO (%)	4,53 a	3,75 b	3,62 b	3.49 b
N total (%)	0.223 a	0.195 b	0.191 b	0.171 b
P disp (ppm)	5,5 c	12,8 a	10,1 ab	9,4 b
K intercb (mg)	25,6 bc	28,6 a	23,5 c	6,55 a
Na intercb (mg)	17,0 c	27,5 b	18,8 c	50.1 a
pH	5,85 b	6,55 a	6,03 b	6,73 a

En filas, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$)

El contenido de MO en el lote con monocultivo de arroz resultó el más bajo luego de 8 años, a pesar de ser la rotación agrícola con mayor aporte de rastrojo debido al efecto de la intensidad de laboreo que exige este sistema de producción lo que favorece la mineralización de los residuos de cosecha.

Nitrógeno total

Al principio del ensayo se observó un comportamiento similar al del contenido de MO, pero a partir de 2004, en el monocultivo de arroz, el Nt continuó disminuyendo mientras que en las otras rotaciones agrícolas tendió a estabilizarse y en Ar-PP a aumentar por efecto acumulativo de la nueva pastura (Figura 2).

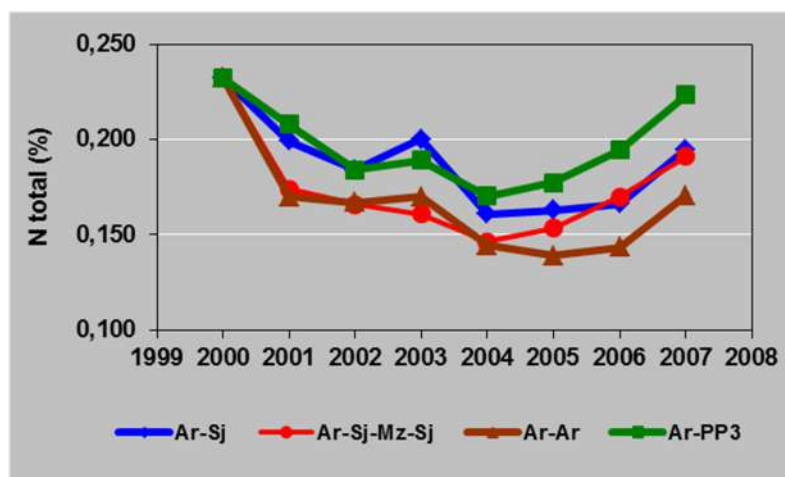


Figura 3. Evolución del Nitrógeno total en las diferentes rotaciones.

Al cabo de ocho años se encontraron diferencias significativas ($p < 0.01$) en el contenido de Nt entre las secuencias agrícolas y arroz-pastura. En la rotación Ar-Ar la disminución es del 23% respecto a Ar-PP y de 13 y 14% para las rotaciones Ar-Sj y Ar-Sj-Mz-Sj, respectivamente (Tabla 2).

Fósforo disponible

Los dos primeros años se observó una leve caída en el P disponible pero luego cambió la tendencia en las rotaciones agrícolas con los años de cultivo mientras que en la rotación con pastura se mantuvo relativamente estable y en niveles bajos (Figura 3).

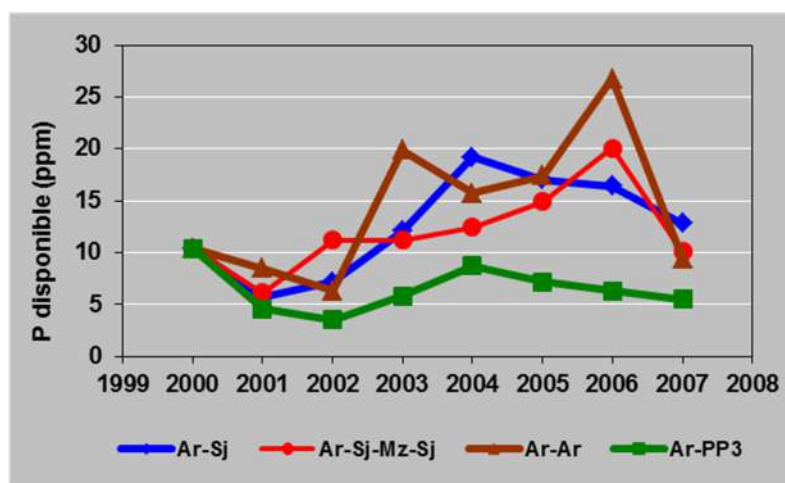


Figura 4. Evolución del fósforo disponible en las diferentes rotaciones.

Esta evolución está asociada a la historia de fertilización y a la dinámica del P disponible en las diferentes rotaciones. Las rotaciones agrícolas recibieron entre 9 y 15 kg de P ha⁻¹ según el cultivo mientras que en la rotación Ar-PP se fertilizó el cultivo de arroz y la pastura solo a la implantación.

En el cuarto año del ensayo, Befani et al. (2005) estudiaron las fracciones del P en las 4 rotaciones. Mostraron que existe una relación negativa entre el P total, el P orgánico y el P residual con la proporción en que el arroz participa en la rotación. Es decir, que el incremento en el pool inorgánico lábil en monocultivo de arroz, producido por procesos de mineralización y aumento de la disponibilidad bajo condiciones de anaerobiosis, es logrado a expensas de una alteración permanente de la reserva del nutriente con disminución de las formas orgánicas y residuales, y el consiguiente agotamiento del suelo, aun cuando el arroz fue fertilizado. La rotación Ar-PP aparece como la más sustentable desde el punto de vista del P dados los altos valores de las fracciones orgánica y residual que mantienen al P total dentro del sistema sin pérdidas importantes.

En el 2007 el contenido de P disponible fue significativamente diferente ($p < 0.05$) entre las rotaciones (Tabla 2). Las rotaciones Ar-Sj y Ar-Sj-Mz-Sj mostraron valores superiores a Ar-Ar y este a Ar-PP.

Potasio intercambiable

Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el contenido de K intercambiable entre las diferentes rotaciones. Con variaciones interanuales, la tendencia en todas las rotaciones es de una consistente disminución (Figura 4). En ocho años de ensayo, el valor medio de K intercambiable pasó de 37,5 a 26,1mg/100g lo que representa una pérdida cercana a los 190 kg K ha⁻¹. Si bien la disponibilidad promedio de K es aún elevada, suficiente para los cultivos, es probable que en un futuro sea necesario fertilizar con este elemento si se mantiene esta tendencia de extracción.

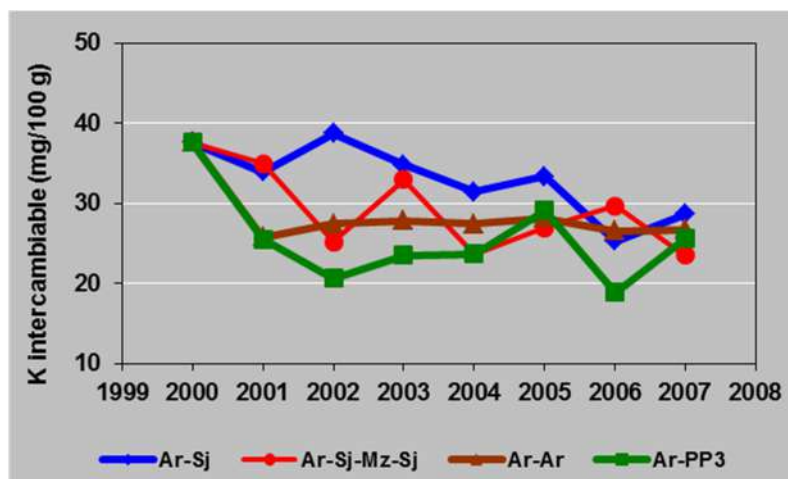


Figura 5. Evolución del K intercambiable en las diferentes rotaciones.

Sodio intercambiable

La evolución del sodio intercambiable muestra que en la rotación Ar-Ar se mantuvo por encima del valor inicial mostrando variaciones interanuales asociadas a la cantidad de agua de riego aplicada y a las precipitaciones fuera del período de riego que producen lavado del sodio (Figura 5).

Luego de la campaña 2004 en que todas rotaciones incluyeron arroz, la tendencia fue de disminución en las rotaciones Ar-PP y Ar-Sj-Mz-Sj y de aumento en la rotación Ar-Ar. En la rotación Ar-Sj el sodio aumentó los años con arroz y disminuyó en los años con soja. El contenido de sodio intercambiable en el monocultivo de arroz pasóa de $28 \text{ mg (100 g)}^{-1}$, al inicio del ensayo, a valores cercanos a $50 \text{ mg (100 g)}^{-1}$ en los últimos cuatro años.

En el 2007 se encontraron diferencias significativas ($p < 0.001$) entre las diferentes rotaciones asociadas a la frecuencia de arroz en la rotación (Tabla 2).

El aumento en el contenido de sodio intercambiable en el suelo se debe al riego con agua bicarbonatada sódica. Esta presenta una RAS ajustada superior a 6, y es característica de las aguas subterráneas de la zona arrocerá central (Wilson et al., 2002)). Este aumento en el sodio provoca deterioro de la estructura del suelo, afectando el K de percolación y la estabilidad estructural (Wilson et al., 2001; Cerana et al., 2006).

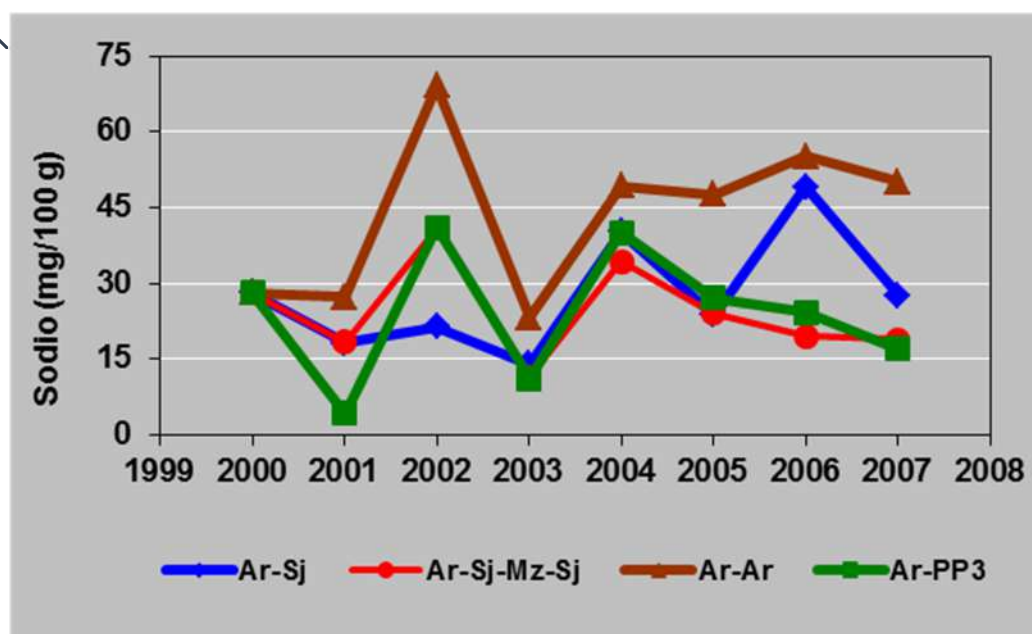


Figura 6. Evolución del sodio intercambiable en las diferentes rotaciones.

Reacción del suelo

El pH del suelo mostró una tendencia similar al contenido de sodio (datos no presentados), dado que la variación en las otras bases (Ca y Mg), no fue importante entre las rotaciones ensayadas. En 2007 se encontraron diferencias significativas entre las rotaciones ($p < 0,01$).

Indicadores biológicos

El carbono y el nitrógeno de la biomasa microbiana son estimadores del tamaño y composición de un compartimento pequeño de la materia orgánica total, pero que marca el efecto del uso y manejo del suelo por lo que son utilizados como indicadores de calidad en múltiples trabajos (Doran y Parkin, 1996; Astier-Calderon et al., 2002). El N potencialmente mineralizable en incubaciones anaeróbicas (NPM) da cuenta de un pool de N de fácil descomposición y se utiliza para predecir la provisión de N por el suelo para diagnóstico de fertilización y como indicador de calidad de suelo (Morón, 2005; Benintende et al., 2006; Benintende et al., 2008).

Tabla 3. Indicadores biológicos en diferentes rotaciones. Muestreo año 2007.

Indicador	Ar-PP3	Ar-Sj	Ar-Sj-Mz-Sj	Ar-Ar
CBM (ppm)	258 a	180 b	258 a	190 b
NBM (ppm)	68,9 a	61,4 a	48,3 b	44,9 b
NPM (ppm)	36,2 a	23,3 b	24,8 b	22,7 b

Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según test DMS.

Al final del primer ciclo de rotaciones el CBM, NBM y NPM fueron los indicadores que mejor diferenciaron las rotaciones (Benitende et al., 2008). En 2007, al final del segundo ciclo de rotaciones, el CBM muestra que las rotaciones con pastura y con maíz presentaron valores un 30% superiores a los de arroz-soja y arroz continuo. El NBM en cambio está más relacionado a la composición de los residuos orgánicos y se marcan claras diferencias entre las rotaciones Ar-PP y Ar-Sj con 31% más de N que la rotación que incluye maíz y el monocultivo de arroz. El N potencialmente mineralizable en incubaciones anaeróbicas diferencia a la rotación con pastura de las rotaciones agrícolas (Tabla 3).

Propiedades físicas

En el cultivo de arroz las labranzas primarias que se realizan con rastras de discos excéntricas pesadas ($120 \text{ kg disco}^{-1}$) con tractores pesados y el emparejado del microrrelieve con rabastos pesados o niveladoras de arrastre, aumentan los riesgos de deterioro del estado físico del suelo. Por otra parte, la cosecha generalmente se realiza bajo condiciones de alto contenido hídrico del perfil ejerciendo altas presiones (superiores a 1 kg cm^{-2}) que sumado al tránsito de los carros tolveros de un solo eje con cargas de alrededor de 3 Mg resulta en el huelleado de aproximadamente el 30 % de la superficie (Pózzolo et al., 2001).

Perfiles culturales realizados luego de la cosecha del arroz muestran pérdida de porosidad estructural (estado CD) en un 25% del perfil (De Battista, 2004), y elevada resistencia mecánica a la penetración en la huella por debajo de los 40 cm de profundidad (Cerana et al., 2002).

La degradación de la estructura superficial por un mayor uso arrocero fue puesta de manifiesto por Wilson (2003), utilizando los índices de Hénin). El índice de inestabilidad aumentó, es decir que disminuyó la estabilidad estructural, con la disminución en el contenido de materia orgánica y el la percolación disminuyó con el aumento del contenido de sodio de intercambio. Estos índices dan cuenta de dos procesos de degradación de la estructura: por una parte la pérdida de estabilidad de

los agregados debido a la oxidación de la materia orgánica por los múltiples laboreos asociados al cultivo de arroz y por otro la acción dispersante de los coloides que provoca el aumento del sodio aportado por el agua de riego que se traduce en una reducción del K de percolación.

Al final del primer ciclo de rotaciones el índice de inestabilidad marcó diferencias entre rotaciones (Figura 6) mostrando a la rotación arroz-pastura con mejor estabilidad de agregados y al monocultivo de arroz como la situación más degradada (De Battista, 2004).

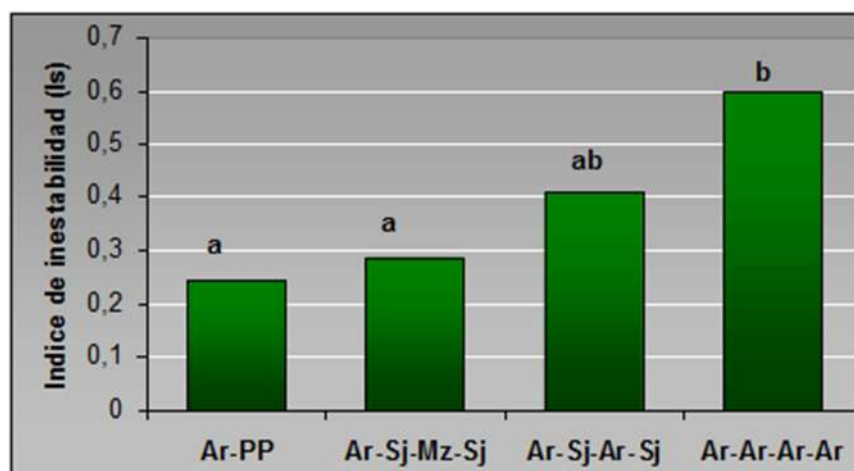


Figura 7. Índice de Inestabilidad de Henin en las rotaciones al final del primer ciclo. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) según test DMS.

Este efecto negativo sobre la estructura asociado a la intensidad del cultivo de arroz en la rotación fue ratificado en un relevamiento de suelos arroceros del este de Entre Ríos por Cerana et al. (2006).

Recomendaciones surgidas de los resultados

En las rotaciones agrícolas el contenido de materia orgánica luego de una brusca caída llegó a un equilibrio mientras que bajo pradera se mantuvo en valores cercanos al inicial.

El nitrógeno total mostró una tendencia a la disminución en las rotaciones agrícolas, siendo más marcada en el monocultivo de arroz asociado a la alta relación C:N del rastrojo aportado.

Los contenidos de fósforo disponible aumentaron en forma considerable en los lotes bajo agricultura que recibieron fertilizaciones anuales, mientras que permaneció muy bajo en la pastura que solo se fertiliza a la siembra.

El contenido de sodio intercambiable aumentó con la intensidad del cultivo de arroz, duplicando el valor inicial luego de ocho campañas de monocultivo. Por su influencia en las propiedades físicas se considera un importante indicador para los suelos bajo riego con aguas subterráneas

La estabilidad de agregados expresada como el Índice de Inestabilidad de Hénin fue un indicador sensible para diferenciar las rotaciones.

Los indicadores biológicos mostraron buena sensibilidad para marcar diferencias entre las rotaciones por lo que hay que considerarlos para realizar diagnósticos del estado del suelo.

Estos resultados muestran que solo la rotación arroz – pastura permite mantener la calidad del suelo como lo muestra la evolución del contenido de M.O. e indicadores físicos y biológicos.

La rotación arroz-soja difundida en la zona no resulta sustentable por insuficiente aporte de C y los efectos negativos sobre la estructura por efecto del sodio aportado con el agua de riego. Para mejorar esta situación habría que minimizar el laboreo e incorporar en la rotación alguna gramínea con alto aporte de rastrojo y volumen de raíces.

Bibliografía

- Astier-Calderón, M., M. Maass-Moreno y J. Etchevers-Barra 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36(5):605-620.
- Befani M., Quintero C., Boschetti G., y De Battista J. 2005. Efecto de las rotaciones de cultivos y pasturas con arroz sobre las fracciones de fósforo en el suelo. *RCA* 9(1) 33-37
- Benintende, M., Benintende, S. y De Battista, J. 2006 Incubación anaeróbica del suelo como indicador de la capacidad de aporte de N al cultivo de arroz. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta
- Benintende M.C., Benintende S., De Battista J 2008 Capacidad de aporte de N del suelo al cultivo de arroz. *Actas XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes. San Luis.
- Benintende S.; Benintende M.; Sterren A. & De Battista J. 2008. Soil microbiological indicators of soil quality in four rice rotations systems *Ecological Indicators* 8:704-708.
- Brizuela A.B. 2006. Síntesis climática de Entre Ríos. Descripción y efectos. *En: El arroz: su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos*. René Benavidez (editor) Capítulo II, pp:185-204. UNER - UNL ISBN 950-698-198-X.
- Cerana J., De Battista J., Pozzolo O., Rivarola S., Arias N., Wilson M., y Benavidez R. 2002. El perfil cultural de suelos arroceros. *En: CD-ROM XVII CACS Puerto Madryn*. Chubut. 16 al 19 abril 2002.

- Cerana J., M. Wilson, J. De Battista, J. Noir y C. Quintero 2006. Estabilidad estructural de los Vertisoles en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. *Revista de Investigaciones Agropecuarias. INTA. RIA* 35 (1): 87-106
- De Battista, J., Arias, N., Pozzolo, O., Pitter, E., Wilson M., Cerana, J. Benintende, M.; Benintende, S.; Díaz, E., Duarte, O. Valenti, R.; Lenzi, L.; Villón, C. y Muller, H. 2001. Rotaciones en suelos arroceros. En: PROARROZ Resultados Experimentales 2000-2001 vol X pp27-33.
- De Battista J, 2004. Manejo de Vertisoles en Entre Ríos. *RCA* 8 (1)37-43. N° Especial II Simposio Nacional de Suelos Vertisolicos. FCA-UNER.
- De Battista J., M. Benintende, S. Benintende, N. Arias, M. Wilson, J. Cerana, H. Rodríguez y H. Muller 2008. Efecto de rotaciones sobre la calidad de suelos arroceros de Entre Ríos. 2008. *Agricultura Sustentable. Actualización Técnica. Serie Extensión* N° 51 p:31-35. INTA EEA Paraná
- De Petre A. A. y Boschetti N. A. 2006. Características de los suelos cultivados con arroz en la provincia de Entre Ríos. En: René Benavidez (ed) *El arroz: su cultivo y sustentabilidad en Entre Ríos. Capítulo II* pp: 205-219. UNER – UNL ISBN 950-698-198-X
- Doran J.W. and Parkin T.B. 1996. Quantitative indicators of soil quality: A minimal data set. In: J.W. Doran and A.J. Jones (Eds) *Soil Sci. Soc. Am. Special Publication* N° 49. Madison, Wisconsin, USA pp. 25-37
- Morón A. 2005. Indicadores para el diagnóstico de la calidad de suelos en sistemas agropecuarios. En: Marelli H.J. (Ed) *Indicadores de Calidad de Suelo. Seminario Internacional. Marcos Juárez, Argentina.*
- Pozzolo O, Wilson M, De Battista J y Cerana J 2001. Tránsito de maquinaria en suelos inundados. Efectos sobre la impedancia en el perfil edáfico. *Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. Chillan, Chile* 143-146.
- Wilson M., Cerana J., Valenti R., Días E., De Battista J., Rivarola S. y Benavidez R. 2002. Evaluación de la calidad del agua para riego en el área arrocerera de Entre Ríos. *Cuadernos del CURIHAM* 8(1):31-39.
- Wilson M. 2003. Efecto del sistema de producción de arroz sobre la calidad del suelo en Entre Ríos. *Tesis Maestría en Ciencias Agropecuarias mención Manejo de Tierras. UNRC.* pp 88.

Reservas de materia orgánica en la Pampa Ondulada: efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza en el largo plazo

Alicia Irizar & Adrián Andriulo

INTA EEA Pergamino

En nuestro país y, particularmente, en la región Pampa Ondulada, los sistemas de producción registraron cambios importantes durante la década del '70 del siglo XX: los ciclos de agricultura que tradicionalmente se alternaban con ciclos de pasturas, comenzaron a transformarse en agricultura continua. En efecto, la relación superficie cultivada/superficie con pasturas decreció a razón de 4% anual (Senigaglia & Ferrari, 1993). En el mismo período, se introdujo la soja (*Glycine max* L.) como único cultivo anual o acompañando al trigo (*Triticum aestivum* L.) en el mismo año, y se intensificó el trabajo del suelo. A principio de la década de los '90, los suelos de la Pampa Ondulada ya habían perdido el 27% de la materia orgánica del suelo (MOS) de la capa arable (Milesi *et al.*, 2013). A mediados de la década de los '90 se produjeron nuevos cambios tecnológicos: aumento exponencial en la adopción de siembra directa (SD), fertilización generalizada de los cultivos de gramíneas, mejoramiento genético de los cultivos e introducción de variedades e híbridos transgénicos, pérdida de cultivos en la rotación e incremento en el uso de productos fitosanitarios. En esta segunda etapa de cambios los suelos perdieron el 13% de su MOS (Milesi *et al.*, 2013). En la actualidad, en esta región, el sistema de producción predominante es la agricultura continua bajo SD, con especies de ciclo primavero-estival, fundamentalmente soja y secundariamente maíz (*Zea mays* L.), ocupando aproximadamente 70 y 15% de la superficie agrícola, respectivamente (SAGPyA, 2006).

Todos estos cambios fueron masivamente adoptados sin una evaluación previa de su posible impacto sobre el estado orgánico del suelo, la calidad del ambiente y la productividad de los cultivos en el largo plazo. Sin embargo, el INTA ha sido precursor de este proceso, comenzando con los primeros estudios hacia fines de la década del '70. A comienzos de los 70' la Estación Experimental Agropecuaria de Pergamino inició un convenio con el INRA de Francia para mejorar el manejo del agua en zonas de secano. Los investigadores locales vislumbraron que se podían utilizar métodos de cultivo menos agresivos que los utilizados por los productores en aquellos momentos (se introdujeron el arado de cincel y otros implementos de corte vertical). En 1979, dos investigadores de la EEA Pergamino iniciaron experimentos de largo plazo para evaluar el efecto de distintas

intensidades de laboreo, incluyendo la SD, bajo diferentes secuencias de cultivo sobre los rendimientos de los cultivos y algunas propiedades del suelo, retomando las experiencias iniciadas por el Ing. Faggioli en 1969 (Ekboir, 2001). En la actualidad, estos ensayos de largo plazo son fuente de conocimiento indispensables y vitales para el entendimiento, el monitoreo y la prueba de los cambios surgidos por el uso de diferentes prácticas de manejo de suelo. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de largo plazo de cuatro secuencias de cultivo y dos sistemas de labranza sobre el estado orgánico del suelo en un Argiudol típico de la Pampa Ondulada.

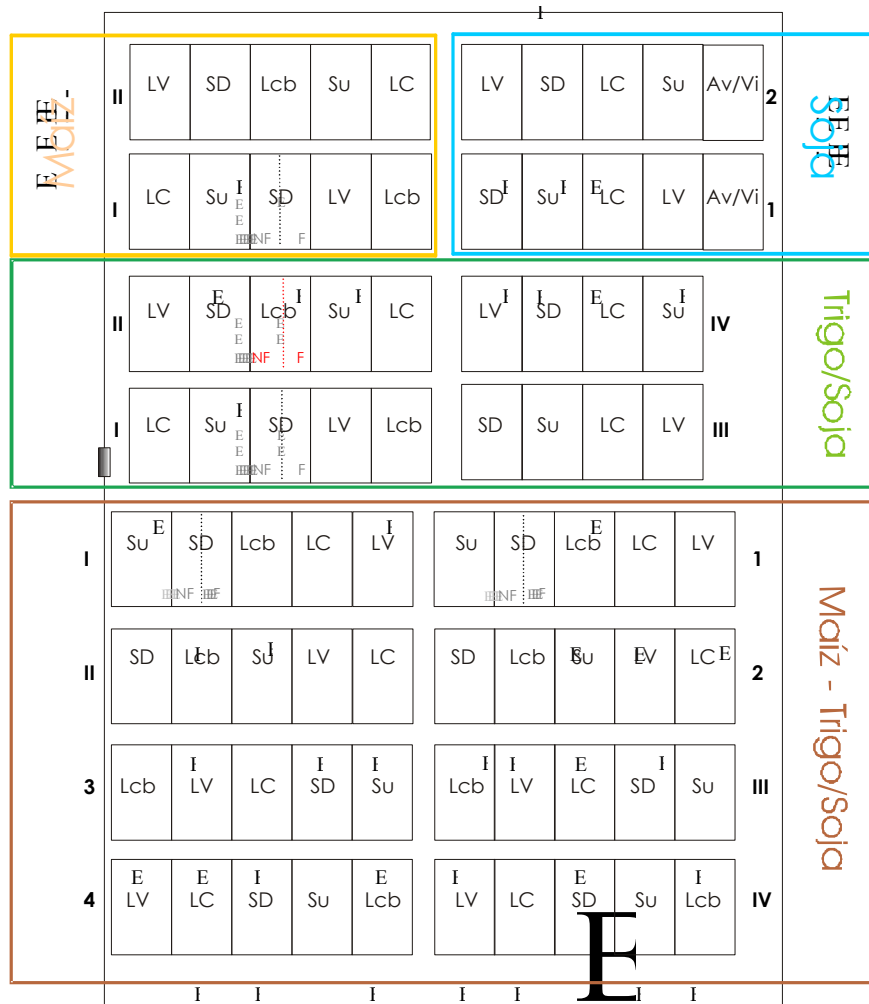
Materiales y métodos

Caracterización edafoclimática de la región y descripción de los experimentos

Los experimentos de larga duración se encuentran localizados a 33° 57' de latitud sur y 60° 33' de longitud oeste dentro de la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino de INTA. El clima es templado húmedo, siendo la precipitación media anual del período 1910-2015 de 988 mm y la temperatura media anual del período 1967-2015 de 16,5 °C (Base de datos de la EEA Pergamino de INTA). El suelo corresponde a un Argiudol típico de textura franco limosa serie Pergamino sin fases por erosión con pendiente < 0,5%. La textura del horizonte A es franco limosa con 23% de arcilla y 64% de limo (INTA, 1972).

En un lote de 9 ha se instalaron cuatro ensayos de secuencias de cultivo escalonados en el tiempo (Figura 1). En 1979 se inició la rotación maíz seguido por el doble cultivo trigo/soja (M-T/S). Luego, en 1983, se agregó el doble cultivo trigo/soja (T/S) y en 1987 se incorporaron los monocultivos de soja (S) y de maíz (M). Desde el inicio hasta la actualidad, para cada secuencia de cultivo transcurrieron 37, 33 y 29 años para M-T/S, T/S, S y M, respectivamente. Cada secuencia presenta un diseño de bloques completos aleatorizados. La dimensión de la parcela principal es de 14 m de ancho y 45 m de largo. En las parcelas principales se encuentran aleatorizados los sistemas de labranza: SD (el control de malezas se realiza químicamente), labranza convencional con arado de reja y vertedera (LC), labranza vertical con arado de cincel (LV), labranza superficial con rastra de discos (Su) y labranza combinada (LC para maíz y trigo y SD para soja de 2º), que a partir de 2002 se transformó en SD. A su vez, las parcelas principales se dividieron en subparcelas, en las que se aplicaron dos dosis de fertilizante nitrogenado: 0 kg N ha⁻¹ (NF) y 90 y 100 kg N ha⁻¹ (F) en promedio, para trigo y maíz,

respectivamente. Además, los cultivos de maíz, trigo y soja de 1º se fertilizan a la siembra con 12 kg P ha⁻¹.



Bloques I, II, III y IV en Maíz-Trigo/Soja y III y IV en Trigo/Soja tuvieron pastura desde 1994 hasta 2002. Maíz: monocultivo de maíz; Soja: monocultivo de soja; Trigo/Soja: doble cultivo trigo/soja; Maíz-Trigo/Soja: maíz - doble cultivo trigo/soja; LV: labranza vertical (arado de cincel); SD: siembra directa; Su: labranza superficial con rastra de disco; LC: labranza convencional con arado de reja y vertedera; Lcb: labranza combinada; NF: sin fertilización nitrogenada; F: con fertilización nitrogenada.

Figura 1. Plano de los ensayos de secuencias de cultivo y sistemas de labranza de largo plazo ubicados en la EEA Pergamino de INTA.

En el presente trabajo se analizaron solamente dos sistemas de labranza: SD y LV con aplicación de fertilizante nitrogenado, en todas las secuencias de cultivo con historia agrícola continua. En junio de 2004 se tomaron muestras compuestas de suelo a tres profundidades (0-5, 5-10 y 10-20 cm) en

cuatro sitios seleccionados al azar dentro de cada parcela. Las propiedades de suelo estudiadas fueron:

- *Carbono orgánico (COS) y nitrógeno orgánico (NOS) del suelo*: determinados por combustión seca.
- *C y N orgánico particulado (COP y NOP, respectivamente)*: determinados por tamizado en húmedo por el método de Cambardella & Elliot (1992) modificado y medidos por combustión seca.
- *C y N asociados a la fracción mineral (CAM y NAM, respectivamente)*: se obtuvieron por diferencia entre COS y COP y entre NOS y NOP.
- *Índice de estabilidad de agregados (IEA)*: determinado por tamizado en agua con el método de Douglas & Goss (1982) modificado. La valoración del IEA fue: < 20%: inestable; entre 20 y 40%: moderadamente estable y > 40%: estable.
- *pH en agua*: determinado potenciométricamente, utilizando la relación suelo: agua 1:2,5.
- *Densidad aparente (dap)*: determinada por el método del cilindro (Burke *et al.*, 1986).

Los contenidos de COS, NOS y sus fracciones fueron expresados en Mg ha^{-1} para una masa de horizonte A de $2500 \text{ Mg suelo ha}^{-1}$ porque existieron diferencias significativas en dap para el espesor 5-10 cm entre SD y LV.

Además, se midió el C y N de los rastrojos sobre *la superficie del suelo* y los rendimientos históricos promedio de los cultivos. A partir de los rendimientos se calculó el aporte de C y N por los residuos de los cultivos utilizando índices de cosecha de 0,50, 0,34 y 0,38 para maíz, trigo y soja, respectivamente (Alvarez & Steinbach, 2006), asumiendo que la biomasa radical, incluyendo rizodepósitos, fue de 30% en relación a la biomasa aérea total (Bolinder *et al.*, 2007), que los residuos contienen 40% de C y que la relación C/N de maíz, trigo y soja es de 57, 64 y 41, respectivamente.

Para evaluar el efecto de las secuencias de cultivo y los sistemas de labranza sobre la MOS y sus fracciones granulométricas se utilizó el procedimiento Proc Mixed de SAS (SAS, 2001; Liebig *et al.*, 2002). Éste permite analizar series de experimentos distintos que no presentan varianzas homogéneas entre sí y que responden al mismo diseño experimental.

Resultados y discusión

Efecto del sistema de labranza

Las diferencias de largo plazo entre sistemas de labranza variaron entre 2,4 y 4,3 Mg COS ha⁻¹ (entre 5 y 10%) y entre 0,2 y 0,45 Mg NOS ha⁻¹ (entre 6 y 11%) (Figura 2 A y B). Estas diferencias, expresadas como promedio anual, fueron de 10 y 17 g C m⁻² año⁻¹ y de 0,8 y 1,8 g N m⁻² año⁻¹ y se encuentran dentro del intervalo reportado por la bibliografía internacional para suelos de clima templado: 31 ± 75 g C m⁻² año⁻¹ y 2,8 ± 7,0 g N m⁻² año⁻¹ (Franzluebbers, 2004). Debido a que no existieron diferencias de rendimiento de cultivo entre sistemas de labranza para todas las secuencias evaluadas, el retorno de C y N no constituyó un factor causante de las diferencias de stocks encontradas (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza sobre los rendimientos históricos promedio, expresados en materia seca.

Secuencia de cultivo			M-T/S		T/S		M		S	
Cultivo	Labranza		SD	LV	SD	LV	SD	LV	SD	LV
	SD	LV								
Maíz	6838a ^(*)	7085a	7014a ^(**)				6909a			
Trigo	2893a	2802a	2762a		2933a					
Soja de 2º	2451a	2338a	2514a		2275a					
Soja de 1º								2965a		3072a

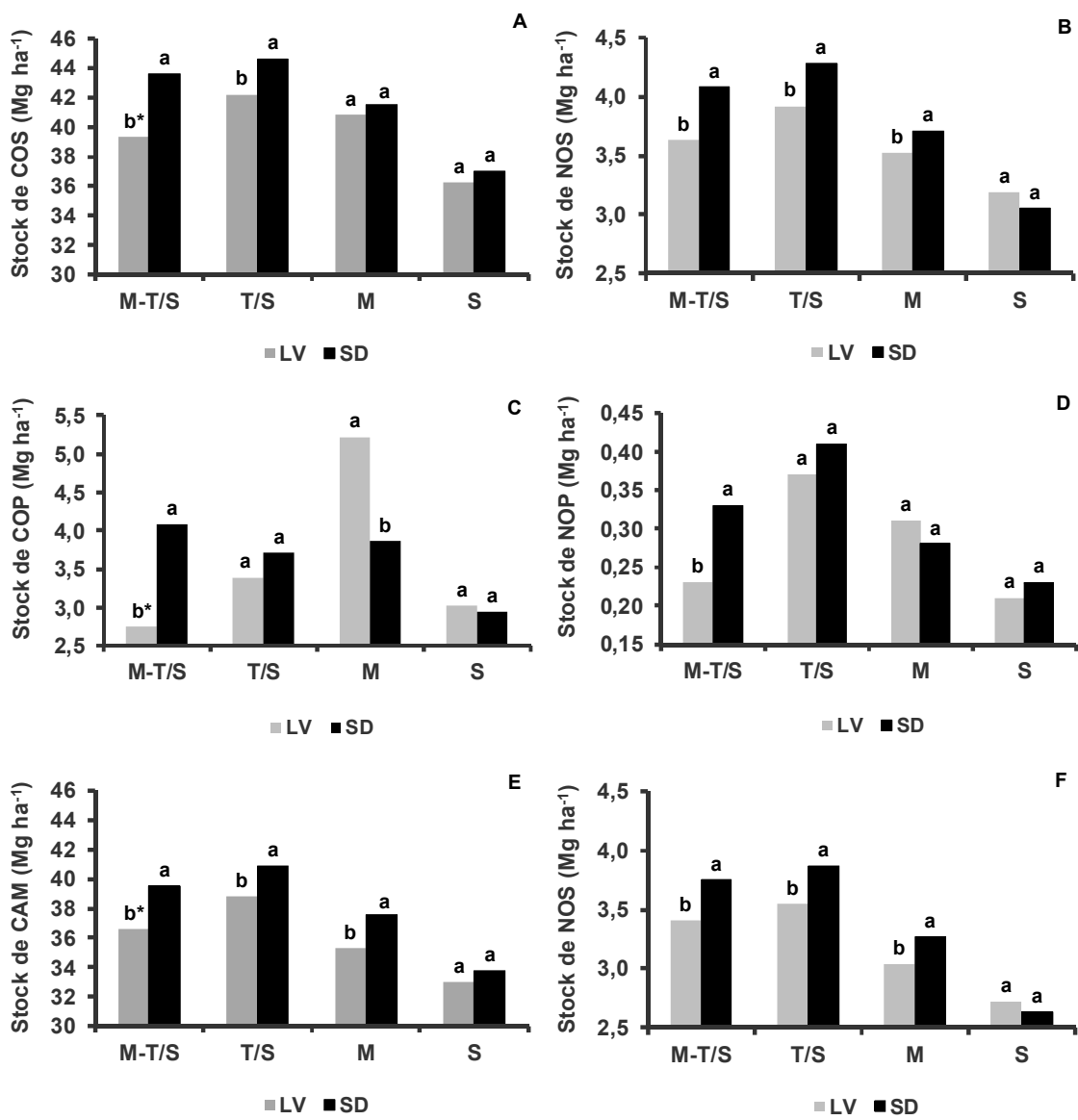
M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa.

(*) letras diferentes en negrita indican diferencias significativas entre sistemas de labranza (p<0,05).

(**) letras diferentes sin negrita indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo (p<0,05).

La SD aumentó las reservas de COS y NOS en relación a LV en las rotaciones, presentando M-T/S la mayor diferencia entre sistemas de labranza (Figura 2 A y B). Estos resultados muestran que cuanto mayor es la diversidad de cultivos (en cantidad y calidad) mayor sería la biomasa microbiana y la tasa de descomposición de MOS en los tratamientos laboreados, produciéndose una marcada disminución de las reservas de COS (Luo *et al.*, 2010) y, por ende, un aumento en la diferencia entre sistemas de labranza. No se encontraron diferencias en COS entre sistemas de labranzas en los monocultivos. Resultados similares a estos últimos fueron encontrados por Huggins *et al.* (2007) luego

de 14 años de experimento con monocultivos de maíz y de soja. La misma tendencia se observó para NOS, aunque en el monocultivo de maíz, éste fue ligeramente superior bajo SD que bajo LV.



M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral.

* letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo (p<0,05).

Figura 2. Efecto del sistema de labranza en diferentes secuencias de cultivo sobre las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas, expresadas en stock a 2500 Mg suelo ha⁻¹.

Normalmente, los factores que explican las diferencias en MOS entre sistemas de labranza se resumen en: a) la disrupción periódica de la estructura del suelo, b) la incorporación de la MOS dentro de la matriz del suelo y c) las modificaciones en el clima del suelo (Balesdent *et al.*, 2000). La estabilidad de la estructura fue mayor bajo SD que bajo LV. Esta diferencia fue de entre dos y tres veces para el IEA en el espesor 0-5 cm. En el espesor 5-20 cm, aunque inestable, el IEA resultó un 43% superior bajo SD en todas las secuencias de cultivo (Tabla 2). Bajo SD, el IEA en el espesor 0-5 cm, resultó inestable (< 20%) en el monocultivo de soja, moderadamente estable (20-40%) en el monocultivo de maíz y T/S y estable (> 40%) en M-T/S. Evidentemente, en el monocultivo de soja, la baja estabilidad de los macroagregados bajo SD no permitió proteger la MOS de la biodegradación.

A su vez, la mayor biomasa de residuos sobre el suelo bajo SD favorece la agregación y su estabilidad en los primeros centímetros, dado que los agregados están mejor protegidos del impacto de la gota de lluvia. En este estudio el C y el N de la biomasa de rastrojos fueron 70 y 40% superiores bajo SD, respectivamente (Tabla 2). Adicionalmente, esta mayor cobertura bajo SD condujo a una menor temperatura media en M-T/S, T/S y M y a un mayor contenido de humedad en M (datos no mostrados) que bajo LV. Estas diferencias de humedad y temperatura encontradas en los monocultivos podrían haber provocado una mayor mineralización de la MOS, reduciendo las diferencias entre los sistemas de labranza en estas dos secuencias.

Además, bajo SD el COP y el NOP resultaron más elevados que en LV para la secuencia M-T/S; lo inverso ocurrió en el monocultivo de maíz para el COP solamente y no hubo diferencias entre sistemas de labranza en T/S y en el monocultivo de soja (Figura 2 C y D). La ausencia de labranzas puede provocar un cambio en la distribución relativa de las fracciones de la MOS. La protección física de la MOS por la estructura del suelo representa una contribución muy importante en la disminución de la mineralización de la MOS bajo SD (Oorts *et al.*, 2007). Normalmente, los agregados estables se forman alrededor de materia orgánica de incorporación reciente y de la fracción particulada (Puget *et al.*, 1995, 1999). Cuando el IEA fue estable (M-T/S bajo SD), los stocks de COP y NOP fueron más altos. Sin embargo, en el monocultivo de maíz, la SD condujo a un menor stock de COP e igual stock de NOP que LV (Figura 2 C y D). Esto puede deberse a que los residuos de maíz presentan una elevada relación C/N y bajo SD quedan en pie luego de la cosecha, retrasando su ingreso al suelo y resultando en un compartimento de C lábil de tamaño inferior. En cambio, bajo LV, los residuos ingresan al suelo con las operaciones de labranza, enriqueciendo el compartimento particulado con fracciones de menor grado de transformación. La relación COP/NOP bajo LV fue 18,6 y bajo SD fue

12,6, ésta menor calidad de la fracción particulada bajo LV podría explicar su elevado valor medio, a pesar de la baja protección física dentro de los agregados del suelo (IEA inestable).

Tabla 2. Efecto de la secuencia de cultivo y del sistema de labranza sobre algunas propiedades del suelo y el carbono y nitrógeno de los rastrojos.

Sistema de labranza		Secuencia de cultivo			
		M-T/S	T/S	M	S
IEA (%) – 0-5 cm					
LV		15,22 b ^(*) a ^(**)	10,02 b a	15,70 b a	8,31 b a
SD		41,08 a a	21,87 a bc	28,85 a b	16,23 a c
IEA (%) – 5-20 cm					
LV	12,06 b ^(*)	17,58 a ^(†)	16,17 a	14,79 a	10,21 b
SD	17,32 a				
pH – 0-5 cm					
LV	5,96 a	5,63 b	5,64 b	5,83 b	6,35 a
SD	5,77 a				
pH – 5-10 cm					
LV	5,86 a	5,76 a	5,74 a	5,84 a	5,88 a
SD	5,75 a				
pH – 10-20 cm					
LV	5,90 a	5,92 a	5,84 a	6,00 a	5,87 a
SD	5,91 a				
C rastrojos (Mg ha⁻¹)					
LV	2,32 b	3,43 a	2,99 ab	3,51 a	2,60 b
SD	3,95 a				
N rastrojos (Mg ha⁻¹)					
LV	0,05 b	0,08 a	0,07 a	0,04 b	0,05 b
SD	0,07 a				

M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa. IEA: índice de estabilidad de agregados; pH: acidez del suelo; C rastrojos: carbono presente en los rastrojos; N rastrojos: nitrógeno presente en los rastrojos.

☐ **Interacción significativa entre secuencias de cultivo y sistemas de labranza:**

^(*) letras diferentes en negrita indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo ($p < 0,05$).

^(**) letras diferentes sin negrita indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo dentro de un mismo sistema de labranza ($p < 0,05$).

☐ **Interacción no significativa entre secuencias de cultivo y sistemas de labranza:**

^(*) letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza ($p < 0,05$).

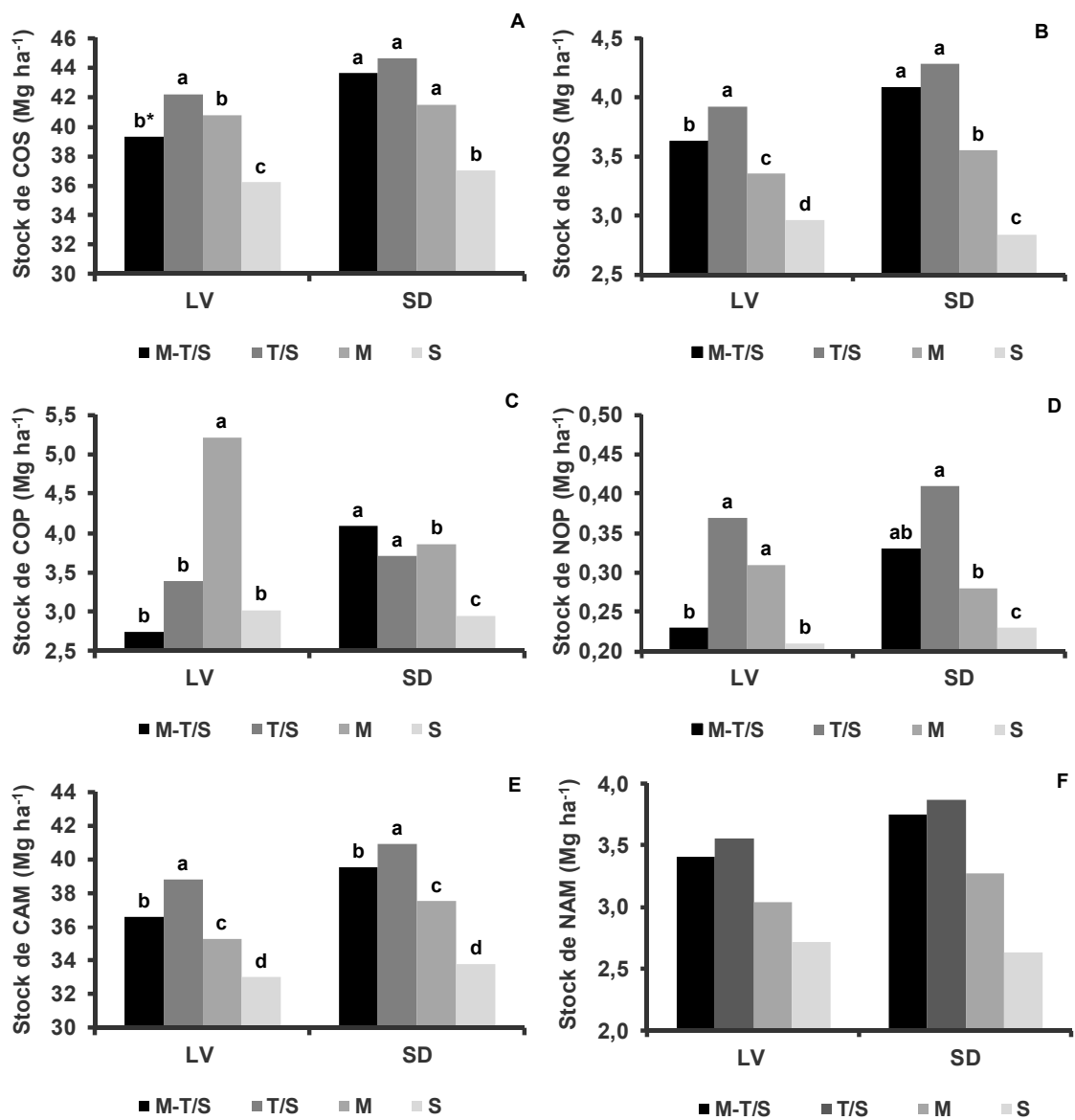
^(†) letras diferentes indican diferencias significativas entre secuencias de cultivo ($p < 0,05$).

Por otro lado, bajo SD hubo en promedio 2,4 Mg ha⁻¹ más de CAM y 0,3 Mg ha⁻¹ más de NAM en todas las secuencias de cultivo, excepto en el monocultivo de soja, que bajo LV (Figura 2 E y F). Los mayores valores de CAM y NAM obtenidos estarían indicando menor biodisponibilidad de la MOS asociada al complejo órgano mineral bajo SD en las rotaciones y el monocultivo de maíz debido a la formación de metabolitos microbianos y residuos que se estabilizan y acumulan en limos y arcillas por adsorción protectora o irreversible (Hedges & Oades, 1997). En el monocultivo de maíz, si bien hubo un mayor stock de CAM y de NAM bajo SD con respecto a LV, éste no se reflejó sobre el stock de COS, pero sí lo hizo sobre el de NOS. Las diferencias encontradas entre sistemas de labranza en las fracciones más humificadas fueron proporcionalmente menos importantes que las encontradas para las fracciones particuladas: 7 y 9% para CAM y NAM, respectivamente, 48 y 35 % para COP en M-T/S y M, respectivamente y 30% para NOP en M-T/S. Resultados similares fueron reportados por Oorts *et al.* (2006) y Domínguez *et al.* (2009).

Efecto de la secuencia de cultivo

Las diferencias encontradas entre secuencias de cultivo para COS fueron 3 y 6 Mg ha⁻¹ y 4 y 8 Mg ha⁻¹ bajo LV y SD, respectivamente y en NOS fueron de 0,3 y 0,7 Mg ha⁻¹ y 0,7 y 1,2 Mg ha⁻¹, bajo LV y SD, respectivamente (Figura 3 A y B). Estas diferencias se encontraron dentro del intervalo reportado por West & Post (2002) para COS y por Doyle *et al.* (2005) para COS y NOS.

Los factores que explican las diferencias de MOS entre secuencias de cultivo se resumen en: a) cantidad, calidad y periodicidad del aporte de C y N proveniente de los residuos de cultivo retornados al suelo y b) modificaciones de las condiciones ambientales del suelo, a medida que los recursos (agua y nutrientes) son consumidos y que los residuos y raíces son degradados por los microorganismos de suelo, como humedad, temperatura, pH, estabilidad de agregados, entre los más importantes (Huggins *et al.*, 2007).



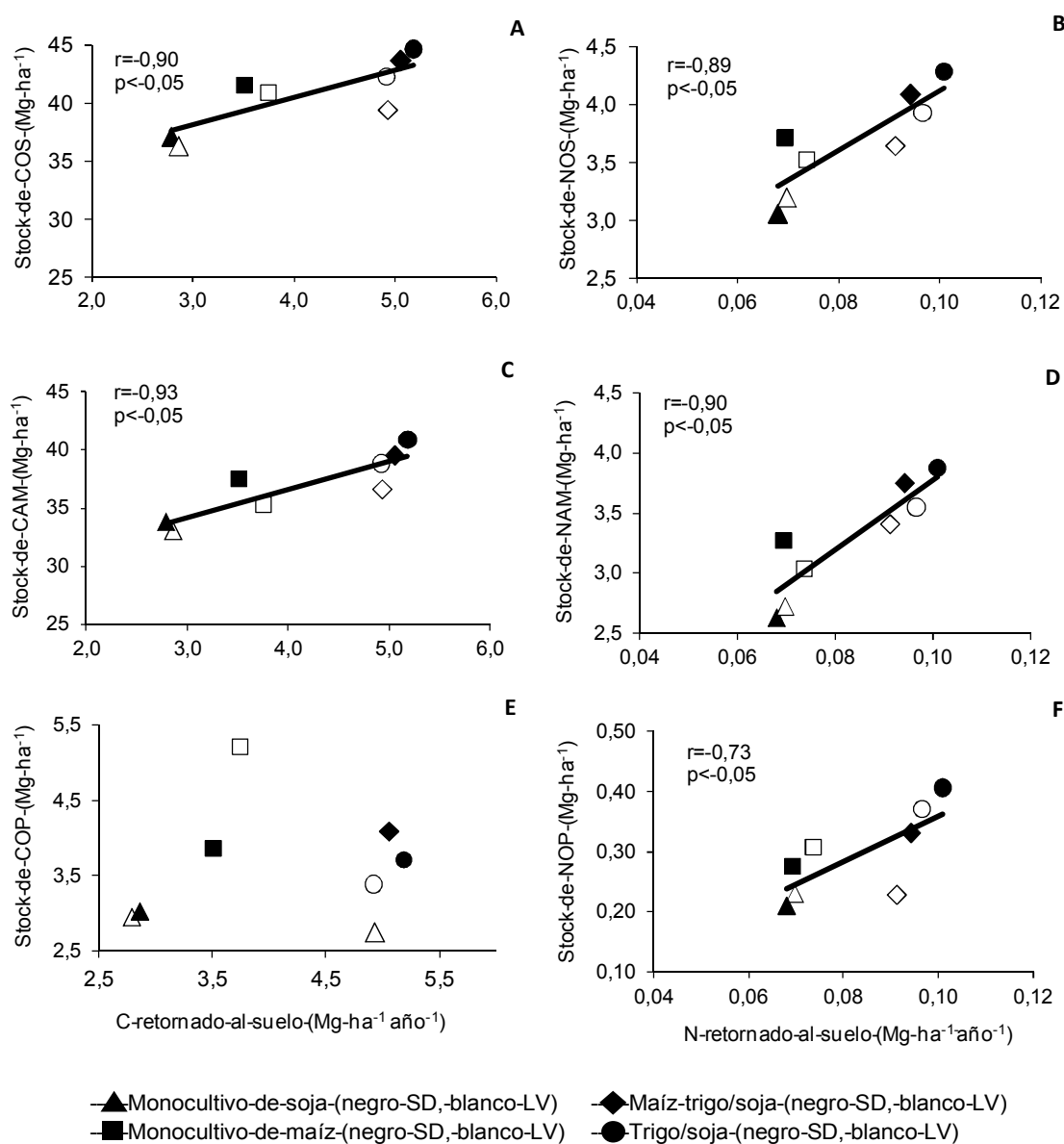
M-T/S: maíz-trigo/soja; T/S: trigo/soja; M: monocultivo de maíz; S: monocultivo de soja; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral. * letras diferentes indican diferencias significativas entre sistemas de labranza dentro de una misma secuencia de cultivo ($p < 0,05$).

Figura 3. Efecto de la secuencia de cultivo bajo dos sistemas de labranza sobre las reservas de materia orgánica del suelo y sus fracciones granulométricas, expresadas a 2500 Mg suelo ha⁻¹.

Las diferencias en COS y NOS encontradas entre secuencias de cultivo dentro de cada sistema de labranza pudieron explicarse, en buena parte, a través de las biomásas de C y N anualmente retornadas al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 A y B). El retorno anual promedio de C para el período completo analizado, siguió la siguiente tendencia: monocultivo de soja ($2,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < monocultivo de maíz ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < T/S ($5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = M-T/S ($5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el correspondiente de N: monocultivo de soja ($0,069 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = monocultivo de maíz ($0,071 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) < T/S ($0,099 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) = M-T/S ($0,093 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). El retorno de C en T/S y M-T/S fue 39 y 79% mayor que en los monocultivos de maíz y de soja, respectivamente y en el monocultivo de maíz fue 29% mayor que en el monocultivo de soja. El retorno de N en T/S y M-T/S fue 37 % superior que en los monocultivos.

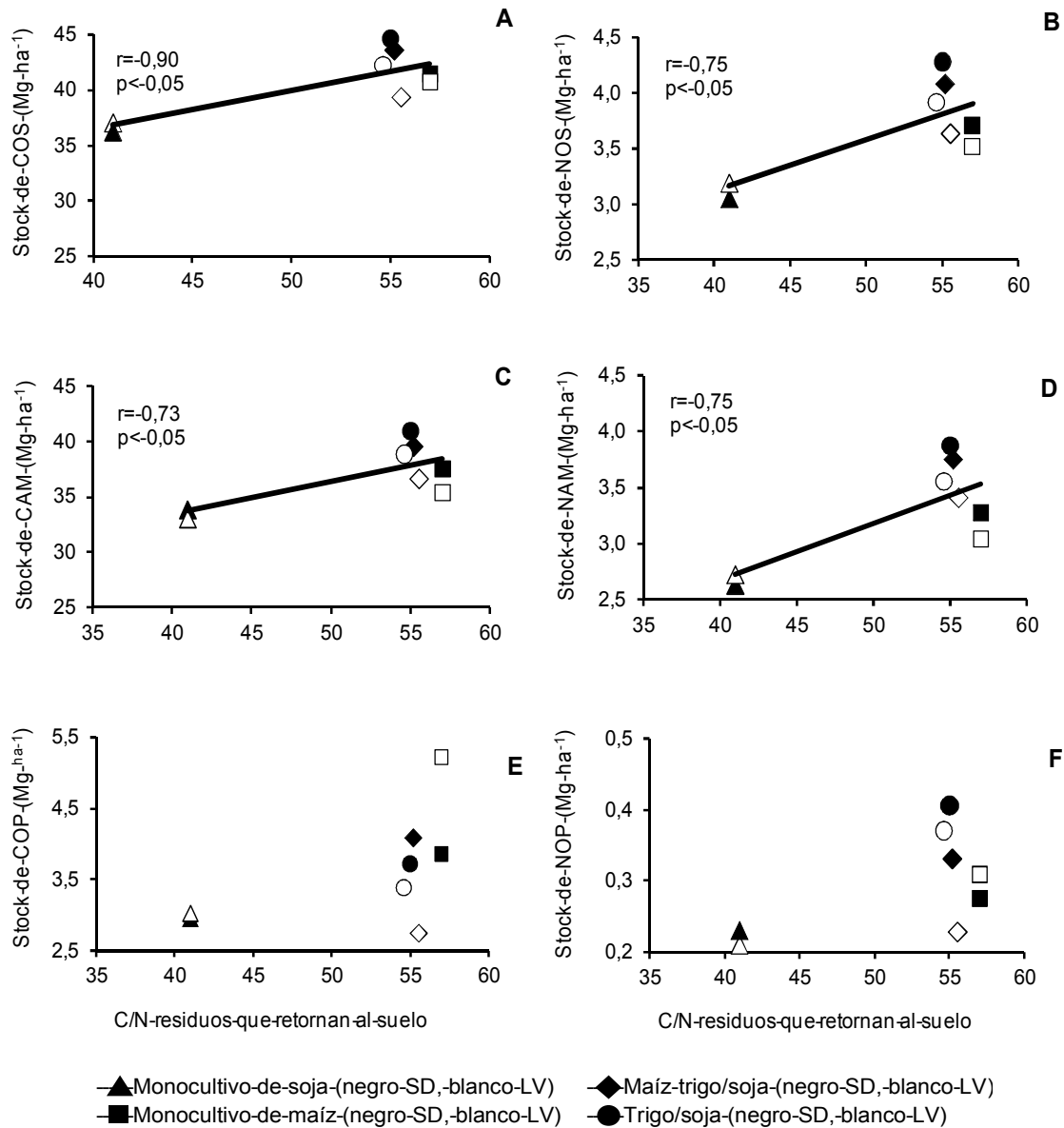
La calidad de los residuos de cultivo producidos por cada secuencia, expresada por medio de la relación C/N, también explicó parte de la variación en el stock de COS y NOS (Figura 5 A y B). En efecto, a medida que disminuyó la calidad de los residuos aportados (mayor C/N) éstos se incrementaron.

A su vez, en el monocultivo de soja se encontró un factor adicional que podría explicar las bajas reservas de COS y NOS: el pH del espesor 0-5 cm del suelo (Tabla 2). Este valor (6,35) difirió significativamente del encontrado en las restantes secuencias estudiadas (5,70), sin que existieran diferencias entre éstas. Evidentemente, la fertilización nitrogenada de las gramíneas en estas secuencias acidificó el suelo, pudiendo retardar la descomposición de los residuos. Por el contrario, debido a que la soja del monocultivo nunca se fertiliza con N y a la descomposición de los productos de la fijación biológica, se produjeron valores de pH cercanos a la neutralidad que podrían estimular la actividad microbiana descomponedora de los residuos en el espesor 0-5 cm. Huggins *et al.* (2007) reportaron un valor de pH muy similar al encontrado en este estudio para el monocultivo de soja (6,4) en el espesor 0-7,5 cm. Otros factores adicionales observados en el monocultivo de soja bajo SD fueron la baja estabilidad de agregados conjuntamente con la mayor temperatura media, lo que también podría estimular la mineralización de la MOS.



COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado.

Figura 4. Relación entre el C y el N retornado al suelo por los residuos de los cultivos con los stocks de COS (A), NOS (B) y sus fracciones granulométricas (C, D, E y F) expresados a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹.

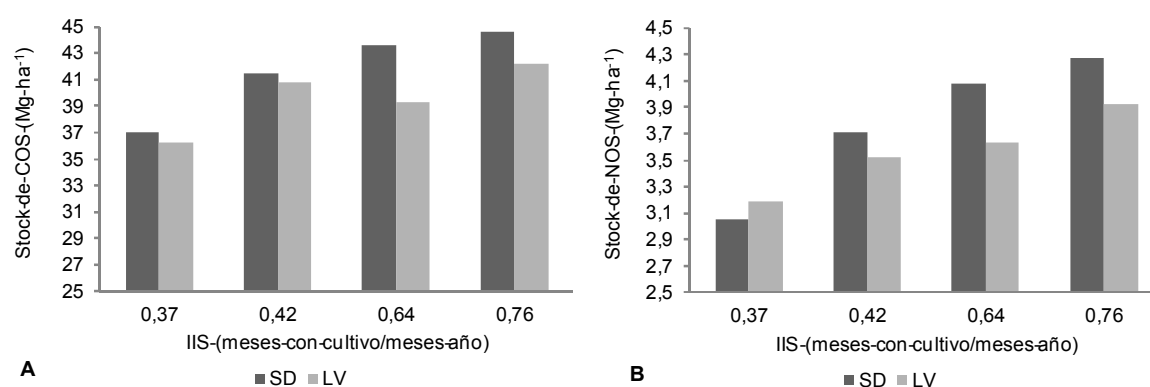


COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; CAM: carbono asociado a la fracción mineral; NAM: nitrógeno asociado a la fracción mineral; COP: carbono orgánico particulado; NOP: nitrógeno orgánico particulado.

Figura 5. Relación entre la relación C/N de los residuos que retornan al suelo con los stocks de COS (A), NOS (B) y sus fracciones granulométricas (C, D, E, F) expresados a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹.

Por otro lado, el aumento de la duración de los períodos de barbecho en las secuencias de cultivo también se constituyó en un factor que disminuye los stocks de COS y NOS (Campbell *et al.*, 1991, 2000; Janzen *et al.*, 1998; Paustian *et al.*, 2000). En las secuencias evaluadas, los barbechos son otoño-invernales, período que, para las condiciones edafoclimáticas de la región, se caracteriza por

presentar condiciones favorables para la mineralización de la MOS. Las Figuras 6 A y B muestran que la intensificación de la secuencia de cultivo aumentó las reservas de COS y NOS en los dos sistemas de labranza, en coincidencia con lo reportado por Wright & Hons (2004, 2005). Las relaciones encontradas entre la intensidad de las secuencias y los cambios en la MOS mostraron claramente la importancia de la reducción de los tiempos de barbecho para poder mejorar el estado orgánico del suelo.



COS: carbono orgánico del suelo; NOS: nitrógeno orgánico del suelo; LV: labranza vertical con arado de cincel; SD: siembra directa; IIS: índice de intensificación de la secuencia, es la fracción de meses del año ocupada por cultivos en el campo (S: 0,37; M: 0,42; M-T/S: 0,64 y T/S: 0,76).

Figura 6. Reservas de COS (A) y NOS (B) expresadas a una masa de suelo de 2500 Mg ha⁻¹ en función del IIS.

Los stocks de COP y de NOP presentaron comportamientos diferentes en las secuencias de cultivo bajo los dos sistemas de labranza (Figura 3 C y D). Bajo LV, el COP presente en el monocultivo de maíz resultó superior que en las secuencias de cultivo restantes, sin diferencias entre ellas. El NOP no presentó diferencias entre T/S y M y fue más elevado que en las otras dos secuencias, sin diferencias entre ellas. Bajo SD, el COP en el monocultivo de soja fue inferior al resto de las secuencias, que no difirieron entre sí. El mismo comportamiento presentó este monocultivo para el NOP, pero además, el monocultivo de maíz y T/S difirieron entre sí. Los valores medios de COP bajo ambos sistemas de labranza no se relacionaron con la cantidad de C retornado al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 E), mientras que los de NOP sí lo hicieron (Figura 4 F). Las relaciones C/N de las secuencias de cultivo en ambos sistemas de labranza tampoco se relacionaron con los stocks de COP y de NOP (Figura 5 E y F). Bajo LV, el elevado valor de COP obtenido en el monocultivo de maíz radicaría en la introducción de una gran cantidad de residuo de menor calidad. En las rotaciones, los más bajos valores medios de COP podrían atribuirse a una mayor estimulación de la tasa de mineralización de

fracciones lábiles debido a una elevada diversidad de sustratos carbonados que ingresan al suelo por efecto del laboreo sistemático, anulando el efecto de la cantidad de C aportado (Luo *et al.*, 2010). Bajo SD, los menores valores medios de COP y NOP en el monocultivo de soja podrían ser explicados por el mayor pH superficial, la muy baja estabilidad de agregados y la mayor temperatura media.

Los valores medios de CAM entre secuencias de cultivo variaron en el siguiente orden: T/S > M-T/S > M > S. Por su parte, los valores medios del NAM entre secuencias de cultivo tuvieron el mismo comportamiento bajo los dos sistemas de labranza: M-T/S = T/S > M > S. Las diferencias encontradas entre secuencias de cultivo para CAM y NAM pudieron explicarse por la cantidad de C y N retornados al suelo por los residuos de los cultivos (Figura 4 C y D) y por la calidad de estos, expresada por medio de la relación C/N (Figura 5 C y D).

Por último, existieron diferencias significativas entre secuencias de cultivo para la relación COP/NOP (datos no mostrados). Las rotaciones M-T/S y T/S retuvieron más N que los monocultivos en su fracción particulada, y particularmente en T/S. Un resultado inesperado lo constituyó el bajo valor medio de COP/NOP encontrado en T/S (9,4). Esto estaría indicando un mecanismo de protección de la fracción lábil diferente al del resto de las secuencias.

Conclusiones

En el largo plazo la SD produjo cambios en las reservas de MOS con respecto al laboreo vertical con arado de cincel en las secuencias de cultivo más intensificadas (M-T/S y T/S), no así en los monocultivos. La combinación de estas rotaciones con la práctica continua de SD en la Pampa Ondulada puede mejorar el estado orgánico del suelo y prestar un importante servicio ambiental reduciendo las emisiones de CO₂ y las pérdidas de N hacia los sistemas adyacentes.

Consideraciones finales

La existencia de estos experimentos de largo plazo en un sitio representativo de la región, que abarca todo el período de cambios señalados, que controla importantes fuentes de variación y que dispone de una base de datos confiable, permitió cuantificar el posible impacto de la adopción masiva de los sistemas de cultivo en las últimas décadas en la Pampa Ondulada sobre la MOS. El elevado esfuerzo y

costo que requiere el mantenimiento de estos ensayos, hace que su valor científico y práctico sea inconmensurable y que continúe creciendo con los años.

Actualmente, uno de los mayores desafíos para la Pampa Ondulada es implementar un desarrollo agropecuario sostenible, que permita el crecimiento económico del sector, mantenga las cualidades del ambiente y reduzca el riesgo asociado a las variaciones del clima. Para tal fin, resulta necesario adaptar los planteos de producción que presentan estos ensayos. Una alternativa posible sería intensificarlos, incorporando, por ejemplo, cultivos de cobertura, pasturas temporarias y/o perennes. Estos nuevos sistemas de cultivo podrían representar una herramienta eficaz para mejorar la calidad de los suelos y su adopción redundaría en un beneficio ambiental para la región. Sin embargo, resulta necesario evaluar estos sistemas en el tiempo para reducir las fuentes de incertidumbre en el almacenamiento de MOS, tanto a nivel del clima como de prácticas agronómicas.

Por otro lado, estos ensayos pueden usarse para la calibración de modelos de simulación de la dinámica de C y N del suelo de largo plazo y así contribuir a la evaluación de la sustentabilidad ambiental de los sistemas de producción y a su planificación territorial.

Bibliografía

- Alvarez, R & H Steinbach. 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. En: Pascale, JA (Ed.). *Materia orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. 55-68 pp. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.
- Balesdent, J; C Chenu & M Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till. Res.* 53: 215-230.
- Bolinder, MA ; HH Janzen ; EG Gregorich ; DA Angers & AJ VandenBygaart. 2007. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118: 29-42.
- Burke, W; D Gabriela & J Bruma (Eds). 1986. *Soil structure assessment*. Rotterdam, A.A. Balkema. 92 pp.
- Cambardella, CA & ET Elliot. 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 777-783.
- Campbell, CA; RP Zentner; EG Gregorich; G Roloff; BC Liang & B Blomert. 2000. Organic carbon accumulation in soil over 30 years in a semiarid southwestern Saskatchewan: Effects of crop rotations and fertilizers. *Can J. Soil. Sci.* 80: 179-192.

- Campbell, CA; VO Biederbeck; RP Zentner & GP Lafond. 1991. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71: 363-376.
- Domínguez, GF; NV Diovisalvi; GA Sttudet & MG Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage system on mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102: 93-100.
- Douglas, JT & MJ Goss. 1982. Stability and organic matter of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil Till. Res.* 2: 155-175.
- Doyle, GL; CW Rice; DE Peterson & J Steichen. 2005. Biologically defined soil organic matter pools as affected by rotation and tillage. *Environ. Manage.* 33: 528-538.
- Ekboir, J. 2001. Sistemas de innovación y política tecnológica: siembra directa en el MERCOSUR. En: Roberto Díaz Rossello (coordinador). *Siembra directa en el Cono Sur*. Pp. 1-18. PROCISUR, Montevideo.
- Franzluebbers, AJ. 2004. Tillage and residue management effects on soil organic matter. En: Magdoff, F & RR Weil (Eds). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Pp. 227-268. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 33431.
- Hedges, JI & Oades JM. 1997. Comparative organic geochemistries of soils in marine sediments. *Org. Geochem.* 27: 319-161.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp; JA Lamb & GW Randall. 2007. Corn soybean sequence and tillage effects on soil carbon dynamics and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 145-154.
- INTA. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja Pergamino (3360-32). 106 pp. + anexos.
- Janzen, HH; CA Campbell; RC Izaurralde; BH Ellert; N Juma et al. 1998. Management effects on soil carbon storage on Canadian Prairies. *Soil Till. Res.* 47: 181-195.
- Liebig, MA; GE Varvel; JW Doran & BJ Wienhold. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the Western Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 596-601.
- Luo, Z ; E Wang & OJ Sun. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 139: 224-231.
- Milesi Delaye, LA; AB Irizar; AE Andriulo & B Bruno. 2013. Effect of Continuous Agriculture of grassland soils of the Argentine Rolling Pampa on soil organic carbon and nitrogen. *Applied Environ. Soil Sci.* Volume 2013. Article ID 487865. 17 pp.
- Oorts, K; B Nicolardot; R Merckx; G Richard & H Boizard. 2006. C and N mineralization of undisrupted and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biol. Biochem.* 38: 2576-2586.
- Oorts, K; H Bossuyt; J Labreuche; R Merckx & B Nicolardot. 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *Eur. J. Soil Sci.* 58: 248-259.
- Paustian, K; J Six; ET Elliot & HW Hunt. 2000. Management options for reducing CO₂ emissions from agricultural soils. *Biogeochem.* 48: 147-163.
- Puget, P; C Chenu & J Balesdent. 1995. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* 46: 449-459.

-
- Puget, P; J Balesdent & C Chenu. 1999. Dynamics of soil organic matter associated with primary particle size fractions of water-stable aggregates. *Eur. J. Soil Sci.* 51: 595-605.
- SAGPyA. 2006. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. República Argentina. www.sagpya.gov.ar. 06/08/2008.
- SAS Institute Inc. 2001. SAS/STAT User's guide, Version 8.2. 4th edition. Vol. 2. Cary, NC: SAS Institute Inc. 846 pp.
- Senigaglia, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: Buxton, DR, R Shibles, RA Forsberg, BL Blad, KH Asay, GM Paulsen & RF Wilson (Eds). *International Crop Science*. Pp 27-35. Crop Sci. Soc. Am. Madison, WI 53711, USA.
- West, TO & WM Post. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1930-1946.
- Wright, AL & FM Hons. 2004. Soil aggregation and carbon and nitrogen storage under soybean cropping sequences. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 507-513.
- Wright, AL & FM Hons. 2005. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage a



Cultivo de algodón en ensayo de secuencias (ELD EEA Saenz Peña) - Cap. 4



Tratamientos de secuencias y Labranzas (ELD EEA Reconquista) - Cap. 5



Tratamientos de secuencias y labranza con cincel (ELD EEA Manfredi) - Cap. 6



Cultivo de soja sembrado en parcelas con dos historias de fertilización acumulada (ELD EEA Marcos Juárez) - Cap. 7



Tratamiento de avena (izq) y de labranza convencional (der). Al fondo se pueden observar las parcelas de avena secadas con herbicida. (ELD EEA Marcos Juárez) - Cap. 8

Ensayos de Larga Duración en Argentina: *Un aporte al logro de Sistemas Agrícolas Sustentables*



Muestreo de suelo y agua en ensayo rotaciones para estudio de algas (ELD C. del Uruguay)-Cap. 9



Tractor con conformando las taipas con el rolo del taipero. (ELD C. del Uruguay) - Cap. 9



Huellado del lote luego de la cosecha del arroz con suelo saturado. (ELD C. del Uruguay) – Cap. 9



Tratamientos de Labranzas y Siembra directa. (ELD Pergamino) – Cap. 10



Muestreo de suelos en distintas secuencias de cultivos en invierno. (ELD Pergamino) – Cap. 10



Secuencias de cultivos sobre distintos antecesores. (ELD Pergamino) – Cap. 10



Secuencias de cultivos sobre distintos antecesores. (ELD Gral Villegas) – Cap. 11



Residuos de distintas secuencias de cultivos. (ELD Gral Villegas) – Cap. 11



Tratamientos de Labranzas y Secuencias. (ELD Balcarce) – Cap. 13



Tratamientos de Secuencias de cultivos. (ELD Balcarce) – Cap. 13



Tratamientos de Secuencias de cultivos. (ELD Barrow) – Cap. 14



Tratamientos de Secuencias de cultivos y Pastoreo de animales. (ELD Barrow) - Cap. 14



Trigo y Vicia Consociado. (ELD Bordenave) - Cap. 15



Siembra en experimentos con distintas secuencias. (ELD Bordenave) - Cap. 15



Cosecha de trigo en experimentos con distintas secuencias. (ELD Bordenave) - Cap. 15



Vista Experimento con pastoreo y sin pastoreo. (ELD Anguil) - Cap. 16



Medición de cobertura de residuos. (ELD Anguil) - Cap. 16

Secuencias agrícolas en suelos representativos del Noroeste Bonaerense

Mirian Barraco¹, Andrea Lardone², Paula Girón¹, Martín Díaz-Zorita³

¹ INTA EEA General Villegas; ² INTA AER Canals; ³ Desarrollo de tecnologías en Monsanto

Descripción regional

El noroeste de la provincia de Buenos Aires forma parte de la región de la pampa arenosa, que cubre una superficie de 54.980 km² en el área central de Argentina (Figura 1). Es una extensa llanura, con pendiente de oeste a este, con un gradiente medio de 0,025 %. El paisaje está constituido por lomas, planicies y cordones medanosos cubiertos por sedimentos de origen eólico que son obstáculos naturales para el normal escurrimiento de las aguas superficiales.

El clima es templado con moderadas condiciones continentales. La temperatura media anual de 16,2 °C, con medias máximas durante el mes de enero de 33 °C y medias mínimas durante el mes de julio de 1,6 °C. El régimen de precipitaciones presenta una distribución primavera-estivo-otoñal, con una alta variabilidad interanual. Las precipitaciones medias disminuyen unos 50 a 75 mm año⁻¹ por grado de longitud en sentido este a oeste con valores promedios (Período 1900 a 1999) de 968 mm y de 738 mm, en el este y oeste, respectivamente (Sian, 2002). La relación entre las precipitaciones y evapotranspiración determina un período seco desde julio a septiembre y de déficit hídrico entre noviembre y febrero (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

Los suelos son predominantemente Molisoles, de texturas superficiales arenosas a franco arenosas, con moderada capacidad de almacenaje de agua, alta permeabilidad, y con bajos a medios contenidos de Carbono (10 a 15 mg kg⁻¹ en el horizonte superior), (Díaz-Zorita & Buschiazzo, 2006). Hacia el noroeste del área se encuentran suelos clasificados como Hapludoles thapto-árgicos, que presentan horizontes superficiales de textura franca hasta los 45 cm de profundidad, apoyados sobre un horizonte argílico (horizonte IIB) que ofrece resistencia al desarrollo de raíces durante el periodo de restricciones hídricas. En las áreas más altas del relieve se han desarrollado suelos clasificados como Hapludoles énticos, de textura arenosa, algo a excesivamente drenados y con baja retención de humedad, mientras que en posiciones de medias lomas o sectores planos se encuentran Hapludoles típicos con mayor capacidad de retención de humedad de textura franco arcillo arenosa, y bien drenados (SAGYP-INTA, 1989).

Durante gran parte del siglo XX los sistemas productivos de la región comprendieron rotaciones de cultivos anuales con pasturas perennes en proporciones similares y bajo condiciones extensivas o semi-intensivas de producción (Viglizzo *et al.*, 2010). A partir de la década del '90, las áreas asignadas a pasturas fueron reduciéndose e incrementándose las áreas agrícolas, fundamentalmente con cultivos estivales bajo sistemas de siembra directa (SD), (Díaz-Zorita *et al.*, 2002). Además, ante el aumento de la agricultura se modificó la participación relativa de los cultivos estivales en las secuencias. Por ejemplo, para 13 partidos del noroeste de Buenos Aires la relación de superficie soja:girasol pasó de 0,5 en la campaña 1990/91 a 7,5 en la campaña 2003/04, mientras que la relación soja:maíz aumentó de 1,1 a 3,1 en el mismo período (MAGyP, 2016). Esta relación entre áreas destinadas a cultivos estivales se mantuvo en magnitudes similares hasta la actualidad.

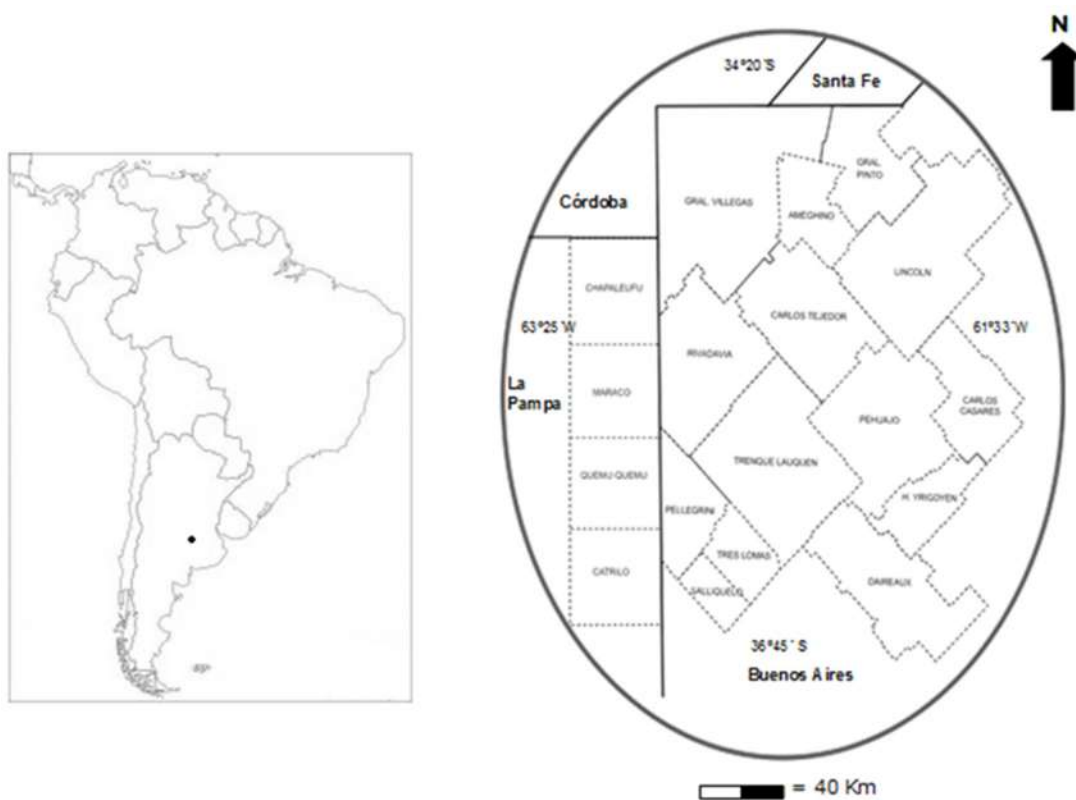


Figura 1: Región de la pampa arenosa. Las líneas completas muestran los límites entre provincias y las discontinuas los límites entre partidos y entre departamentos dentro de la provincia de Buenos Aires y de La Pampa, respectivamente.

Problemática de estudio

Si bien los sistemas bajo SD presentan mayores contenidos de carbono orgánico del suelo (COS) que los sistemas con laboreo (Alvarez *et al.*, 2014; Angers & Eriksen-Hamel, 2008; Steinbach & Alvarez, 2005), esta característica requiere, para contribuir a la sustentabilidad de los sistemas productivos, incluir gramíneas que aporten rastrojos voluminosos. Así por ejemplo, secuencias con maíz y trigo muestran mayores contenidos de COS que secuencias con alta participación de soja (Novelli *et al.*, 2011; Huggins *et al.*, 2007). Otra alternativa, es la inclusión de cereales de invierno como cultivos de cobertura (CC), los cuales aportan biomasa e incrementan el contenido de COS (Blanco-Canqui *et al.*, 2013; Scianca *et al.*, 2013). Generalmente, los CC mejoran la eficiencia de uso del agua en los sistemas agrícolas, al reducir las pérdidas por drenaje y evaporación y/o incrementar la infiltración del agua en el suelo (Kaspar *et al.*, 2012; Blanco-Canqui *et al.*, 2012). Sin embargo, el consumo de agua de los CC puede reducir la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente (Barraco *et al.*, 2012; Caviglia *et al.*, 2012), lo cual dependerá de las lluvias durante el ciclo de crecimiento y del barbecho posterior a su secado.

En el contexto, de alta participación de soja en las secuencias agrícolas del noroeste de Buenos Aires, en 2004 se planteó como hipótesis que bajo condiciones de mayor diversificación de cultivos la producción de secuencias agrícolas es mayor, mejorando la eficiencia del uso del agua e incrementando la acumulación de COS. A partir de allí se inició una experiencia de larga duración para responder a dichos interrogantes. El objetivo general del estudio fue evaluar diferentes secuencias agrícolas que incluyen los cultivos de maíz y soja, en combinación con CC invernales, sobre algunas propiedades edáficas y su productividad. Los objetivos específicos fueron: (i) describir los contenidos de COS según secuencias agrícolas y CC, (ii) discriminar los aportes de materia seca entre prácticas de manejo de los CC en las secuencias agrícolas (i.e. biomasa aérea de los CC, efectos de la fertilización y del cultivo antecesor), y (iii) cuantificar diferencias en la producción de los cultivos de soja y de maíz, según el cultivo antecesor inmediato.

Características del experimento

El ensayo se instaló en 2004 en la Estación Experimental de INTA General Villegas, sobre una consociación de suelos de las series La Belita (80 %) y Blaquier (20 %), que corresponden a Hapludoles típicos, familia franca gruesa. El paisaje es de planicies suavemente onduladas integradas

por pendientes suaves (0,5 a 1,0 %) de longitud media, y el micro relieve es muy poco perceptible (Alfieri *et al.*, 1990). La capa superficial del suelo (0 a 20 cm) al inicio del estudio presentaba 15 mg kg⁻¹ de fósforo extractable (Pe, Bray & Kurtz), y 6,3 de pH.

Durante el período estudiado (2004 hasta 2016), las precipitaciones resultaron muy variables, con 4 ciclos productivos caracterizados como “Niñas” (2007/08, 2008/09, 2010/11 y 2011/12), 4 como “Niños” (2004/05, 2006/07, 2009/10 y 2015/16) y 4 “neutros” (2005/06, 2012/13, 2013/14, y 2014/15), (Tabla 1).

Tabla 1: Precipitaciones mensuales y total anual (mm) en el sitio experimental. Mes: enero (E), febrero (F), marzo (M), abril (A), mayo (MY), junio (JN), julio (JL), agosto (AG), septiembre (S), octubre (O), noviembre (N) y diciembre (D).

Año	Mes												Total
	E	F	M	A	MY	JN	JL	AG	S	O	N	D	
2004	267	28	36	105	86	0	76	22	0	133	112	110	974
2005	199	55	254	19	3	12	51	25	38	38	165	38	894
2006	210	66	148	92	11	9	11	1	10	189	88	156	990
2007	113	151	228	32	14	17	2	2	86	49	29	99	823
2008	93	68	54	9	2	16	30	0	30	96	131	44	573
2009	25	103	42	55	20	0	29	1	80	10	121	311	796
2010	188	147	27	38	7	14	4	2	107	53	19	26	632
2011	128	83	50	100	10	7	11	1	8	78	62	3	540
2012	80	283	127	71	79	6	0	69	60	271	170	60	1275
2013	8	20	104	35	48	4	18	0	39	71	104	78	529
2014	67	124	104	172	77	4	11	4	87	70	73	73	873
2015	97	92	85	129	88	4	2	13	20	130	160	100	920
2016	183	175	19	158	13	47	38	2	47	259	91	150	1182

Tratamientos

Inicialmente, en octubre de 2004, se establecieron cuatro tratamientos de secuencias agrícolas: (i) Maíz–Soja–Trigo/Soja, (ii) Soja–Maíz, (iii) Soja–Soja, y (iv) Maíz–Maíz. En todos los casos, con y sin la siembra de CC invernol, siendo las especies triticales y vicia (sin fertilización) según fueran antecesores de soja y de maíz, respectivamente. Luego del primer ciclo de tres años la rotación (i) Maíz–Soja–Trigo/Soja fue reemplazada por la secuencia Maíz–Soja, y de este modo se presentaron los dos cultivos estivales de la secuencia en cada año. Además a partir de ese momento los CC de todas las secuencias agrícolas se uniformaron a la especie centeno, con dos manejos de la fertilización (sin y

con la aplicación de nitrógeno y de fósforo), mientras que a partir del 2014 todos los CC recibieron fertilización nitrogenada y fosfatada.

A los fines de este estudio los tratamientos analizados fueron según sus secuencias agrícolas fueron: (i) soja–maíz (Rotación), (ii) monocultivo de soja (SS) y (iii) monocultivo de maíz (MM); y según el manejo del CC invernal: (i) Sin CC, (ii) Con CC fertilizado y (iii) Con CC sin fertilización.

Manejo de los cultivos

En todas las secuencias anualmente los cultivos de maíz y de soja, independientemente del antecesor (Sin o Con CC) se sembraron en la primera semana de octubre y en la primer semana de noviembre, respectivamente. Los genotipos de soja y de maíz empleados se modificaron según materiales de uso frecuente en la región en estudio. Anualmente los cultivos de maíz se fertilizaron con 80 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (SPT, 0-46-0) incorporado en la siembra, y con N hasta alcanzar una disponibilidad de 150 kg N ha⁻¹ (N suelo + N fertilizante) en forma de urea (46-0-0) en estadios de V3-V6. Los cultivos de soja se realizaron sin fertilización y las semillas fueron tratadas con inoculantes comerciales conteniendo cepas de *Bradyrhizobium japonicum*.

Los CC anualmente se sembraron inmediatamente después de la cosecha de los cultivos de grano, entre la segunda quincena de abril y la primera quincena de mayo. Los cultivares de centeno empleados fueron diploides. La interrupción del ciclo de los CC se realizó de forma química. En las campañas 2009 y 2010, en las parcelas destinadas a maíz el control químico del CC se realizó 22 días antes que las parcelas destinadas a soja. En las campañas siguientes se optó por un secado en un único momento, independientemente del cultivo sucesor y entre la segunda quincena de agosto y la primera quincena de septiembre. La fertilización del tratamiento de CC se realizó anualmente con 80 kg ha⁻¹ de SPT incorporado al suelo al momento de la siembra, y 100 kg ha⁻¹ de urea, aplicada al voleo en estado de macollaje.

Todos los cultivos se implantaron bajo prácticas de SD. El control de plagas se realizó de forma química con los principios activos y dosis comúnmente usados en la zona, y no se realizaron controles foliares de enfermedades. El control de malezas se realizó de forma química con los principios activos y dosis comúnmente usadas en la zona, y en los casos que esto no fue posible, se realizó de forma manual.

Evaluaciones de suelos y cultivos

En otoño de 2015 se realizó un muestreo de suelos estratificado de las capas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15, y 15 a 20 cm de profundidad. Además en dichas capas se midió la densidad aparente a través del método del cilindro. Las muestras de suelo fueron secadas al aire y luego tamizadas con malla de 2000 μm . En cada capa se determinó la concentración de COS, (Walkley & Black, 1934). La cantidad total (“stock”) de COS (Mg ha^{-1}) de la capa de 0 a 20 cm se calculó igualando a la masa del tratamiento con menor densidad (Neill *et al.*, 1997).

En otoño de 2016 se realizó un muestreo de suelos para determinar el contenido de fósforo extractable en los primeros 20 cm de profundidad según el método de Bray & Kurtz 1 (1945).

Anualmente se midió la producción de materia seca de la biomasa aérea de los CC al momento de su control químico, mediante cortes de material y posterior secado en estufa a 100 °C hasta alcanzar peso constante.

En estadio V2 de los cultivos de maíz (mediados a fines de octubre, dependiendo de la fecha de siembra), se midió el contenido de N de nitratos del suelo de la capa de 0 a 60 cm de profundidad (método fenil disulfónico). En 6 campañas (2008/09 a 2012/13 y 2015/16) se determinó el contenido de agua disponible en el suelo hasta los 120 cm de profundidad (método gravimétrico).

También, en el período 2004 a 2016 se evaluaron los rendimientos de soja y de maíz, expresados con contenidos de humedad de 14% por cosecha manual (2004 a 2012) y mecánica (2013 a 2016).

Diseño experimental

El diseño experimental fue en parcelas divididas y en seis bloques completos aleatorizados, siendo el CC la parcela principal, y la secuencia de cultivos la subparcela. El tamaño de cada unidad experimental fue de 100 m^2 . El análisis de datos se realizó con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2016). La variable rendimiento se analizó con ANVA usando modelos mixtos donde la secuencia, el CC y la interacción entre ambos fueron considerados efectos fijos, y el factor año como efecto aleatorio. Los restantes análisis se realizaron a través de ANVA utilizando modelo de efectos fijos. Cuando se registraron diferencias significativas se aplicó el test de comparación de medias de LSD de Fisher ($p < 0,05$), (Di Rienzo *et al.*, 2016).

RESULTADOS

Efectos sobre el suelo

Luego de 11 años de iniciado el experimento la concentración de **COS** en los primeros 5 cm del suelo varió entre 14,2 y 17,4 g kg⁻¹, evidenciando interacción entre la secuencia de cultivos y la inclusión de CC ($p<0,01$). En las secuencias rotación y monocultivo de soja la mayor concentración de COS se registró con la inclusión de CC ($p<0,01$ en ambos); en cambio en monocultivo de maíz no se observaron diferencias al incluir o no el CC ($p=0,97$). En las capas de 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm de profundidad la concentración de COS no presentó diferencias entre los tratamientos de secuencias, de CC, ni interacción entre ambos factores (Tabla 2).

Tabla 2: Concentración de Carbono orgánico del suelo (g kg⁻¹), luego de 11 años de iniciado el estudio, según tratamientos de secuencias agrícolas: monocultivo de soja (SS), rotación de soja con maíz (Rotación), y monocultivo de maíz (MM), y tratamientos de cultivos de cobertura (CC): Con y Sin CC.

Profundidad (cm)	SS		Rotación		MM	
	Con CC	Sin CC	Con CC	Sin CC	Con CC	Sin CC
0 a 5	17,1 a	14,2 b	17,4 a	14,6 b	17,3 a	17,3 a
5 a 10	11,7	10,7	11,5	11,2	11,6	11,2
10 a 15	10,0	9,5	9,9	9,9	9,5	10,2
15 a 20	9,0	8,4	9,0	9,3	8,7	8,9

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos con y sin cultivos de cobertura, para cada secuencia agrícola y profundidad, ausencia de letras indica ausencia de diferencias significativas ($p<0,05$).

La cantidad acumulada de **COS** del suelo en la capa de 20 cm superficiales varió entre 28,7 y 32,3 Mg ha⁻¹, con interacción entre la secuencia y la inclusión de CC ($p=0,04$). En las secuencias de rotación y monocultivo de soja la cantidad de COS fue mayor cuando se incluyó el CC ($p<0,01$ en ambos), en cambio no presentó diferencias en el monocultivo de maíz ($p=0,92$), (Figura 2). En un estudio de 14 años en un Haplacuel típico del noroeste del cinturón maicero de EEUU, bajo prácticas SD una secuencia continua de maíz presentó un 15 % más de COS (de 0 a 45 cm de profundidad), con respecto al monocultivo de soja (Huggins *et al.*, 2007). En este estudio la diferencia de COS en secuencias continuas de maíz comparado con secuencias continuas de soja (0 a 20 cm) fue de 9 %.

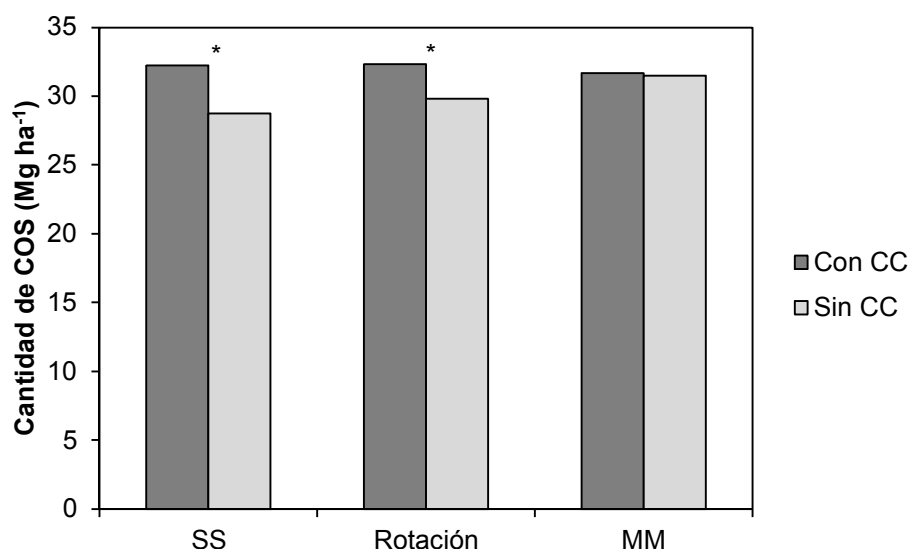


Figura 2: Cantidad acumulada de Carbono orgánico del suelo (COS), de la capa de 0 a 20 cm de profundidad, luego de 11 años de iniciado el estudio, según tratamientos de secuencias agrícolas: monocultivo de soja (SS), rotación de soja con maíz (Rotación), y monocultivo de maíz (MM), y tratamientos de cultivos de cobertura (CC): Con y Sin CC. El asterisco representa diferencias significativas ($p < 0,05$) para la cantidad de COT entre tratamientos de CC para cada secuencia agrícola.

Después 12 años de efectos acumulados, el **fósforo extractable** del suelo en la capa de 0 a 20 cm de profundidad varió entre 9,6 y 13,4 mg kg⁻¹. Se observaron diferencias según la secuencia ($p < 0,01$), pero no así por la inclusión de CC ($p = 0,92$), ni la interacción entre ambos factores ($p = 0,96$). En relación a la secuencia, el monocultivo de maíz presentó los mayores valores respecto al monocultivo de soja, en tanto la rotación presentó un valor intermedio entre ambos con 13,3, 11,1 y 9,7 mg kg⁻¹ respectivamente. Esto se encuentra en relación con los aportes de fertilizantes realizados en las diferentes secuencias (de 190, 95 y 0 Kg P ha⁻¹ en 12 años, respectivamente).

Productividad de cultivos

La producción de materia seca de la biomasa aérea de los CC varió entre 1787 y 9027 kg ha⁻¹, con un valor promedio de 3887 kg ha⁻¹. La fertilización incrementó la producción de materia seca de los CC en 5 de las 6 campañas evaluadas (Figura 3). En promedio los CC produjeron 3430 y 4689 kg ha⁻¹, para los tratamientos sin y con fertilización, lo que indica un incremento medio del 36 %. Similares resultados fueron obtenidos en otros estudios de fertilización de CC en la región con incrementos medios del 53 % (rango de 41 a 74 %), (Barraco *et al.*, 2012).

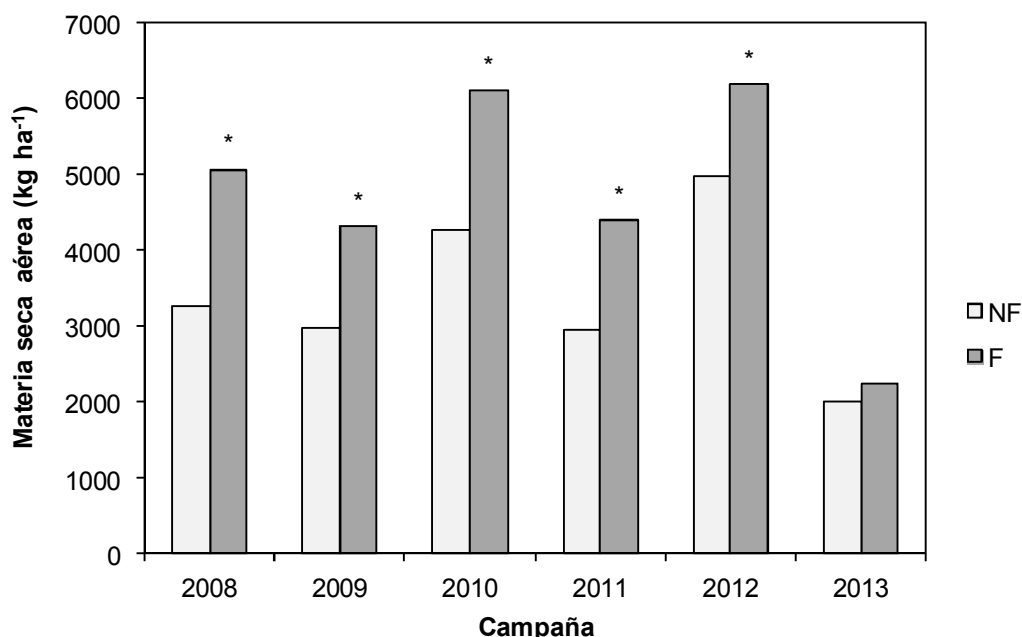


Figura 3: Producción de materia seca aérea de los cultivos de cobertura al momento de secado, según tratamientos de fertilización: sin fertilización (NF) y fertilizado con nitrógeno y fósforo (F). Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

En cuanto al efecto de los cultivos de las secuencias (soja, rotación o maíz) sobre la producción de los CC, el análisis se realizó para cada campaña en particular ya que a lo largo del estudio se realizaron modificaciones en el manejo de los CC que no permiten un análisis en conjunto de la información. En 3 campañas (2008/09, 2009/10, 2010/11) se observó mayor producción de materia seca aérea con antecesor soja en monocultivo, intermedio para soja en rotación y menores valores con antecesores maíz (Figura 4). Estas diferencias en los años 2009 y 2010 se deberían en parte al momento de secado diferencial en función del cultivo posterior (atraso de 22 días para cultivo de soja respecto a maíz). En las restantes campañas no se registraron diferencias significativas entre antecesores.

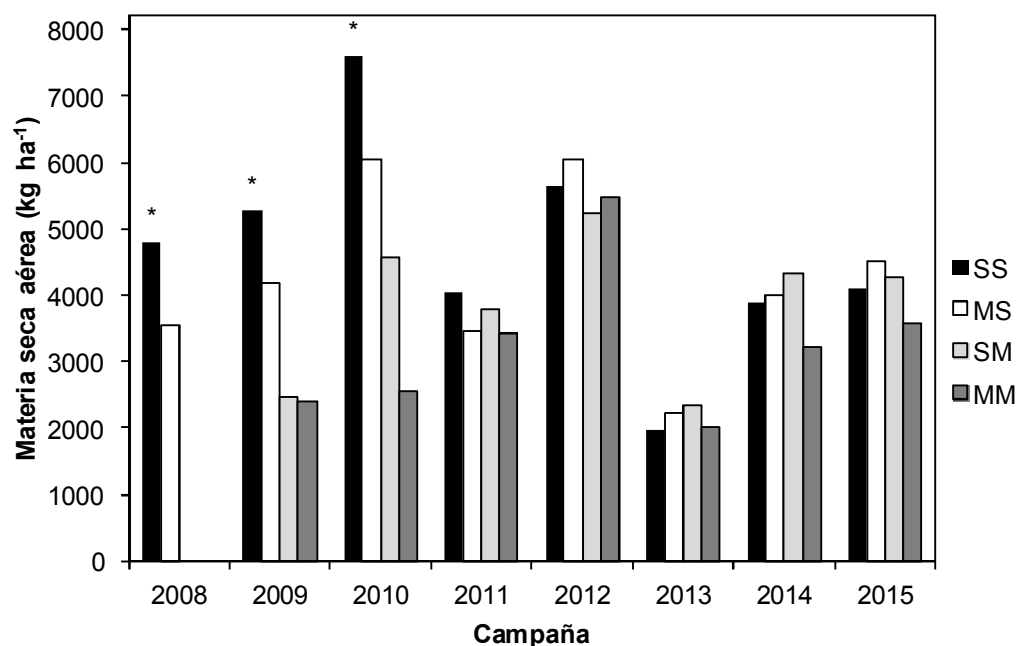


Figura 4: Producción de materia seca aérea de los cultivos de cobertura al momento de secado, según tratamientos de secuencias agrícolas: monocultivo de soja (SS), rotación de antecesor maíz con predecesor soja (MS), rotación de antecesor soja con predecesor maíz (SM), y monocultivo de maíz (MM). Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

Los **rendimientos de soja** variaron entre 2687 y 6030 kg ha⁻¹ (Figuras 5 y 6). No se observaron efectos de la fertilización de los CC sobre los rendimientos de soja en ninguna de las 5 campañas analizadas (2008/09 al 2012/13), por lo que en los posteriores análisis se integraron dichos tratamientos (Con CC). En ninguna de las campañas se observó interacción entre la secuencia y la inclusión del CC, y solo en la campaña 2005/06 se observaron diferencias entre tratamientos de CC con mayores rendimientos de soja con CC (Figura 5). Numerosos estudios en la región pampeana también muestran efectos neutros de corto plazo de los CC invernales sobre la productividad de soja (Baigorria *et al.*, 2014; Ortiz *et al.*, 2012).

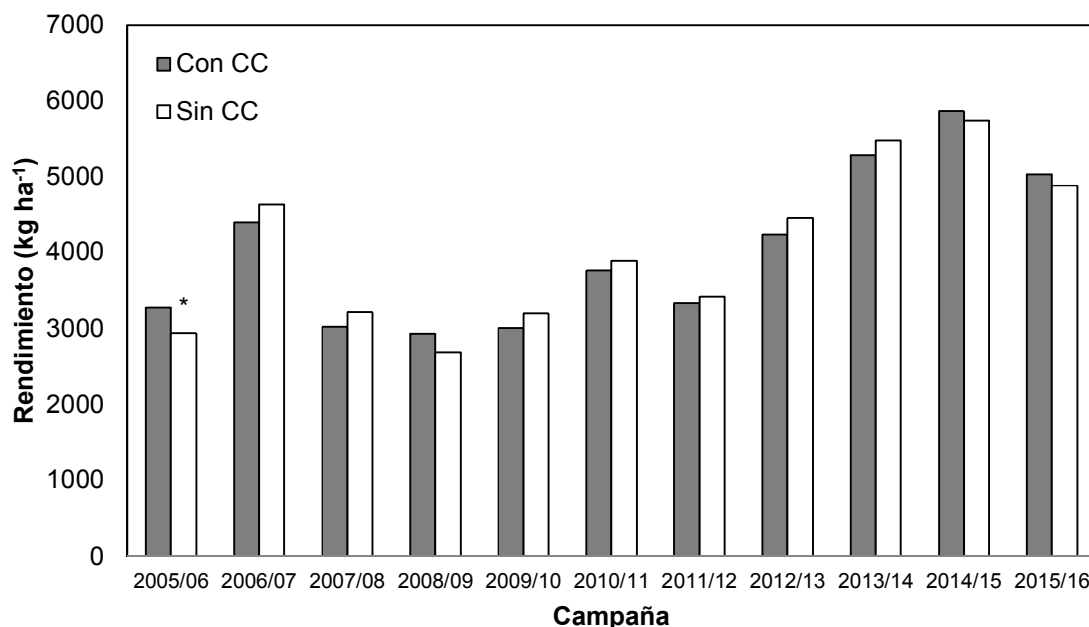


Figura 5: Rendimientos de soja según tratamientos con y sin cultivos de cobertura (CC). El asterisco sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

En cuanto a la secuencia de cultivos, se registraron diferencias significativas en los rendimientos en 3 de las 10 campañas evaluadas (2006/07, 2011/12 y 2012/13), donde los rendimientos de soja fueron mayores con antecesor maíz respecto al monocultivo (Figura 6). En el análisis combinado de todo el período en estudio se observó efecto de la secuencia ($p < 0,01$), pero no del CC ($p = 0,36$), ni la interacción entre ambos factores ($p = 0,14$). En promedio, los cultivos de soja en rotación con maíz rindieron 257 kg ha^{-1} más que en planteos de monocultivo. Un estudio previo de análisis de lotes de producción mostró similares tendencias, con una brecha de rendimiento de 356 kg ha^{-1} entre lotes con antecesor soja y maíz. En ese caso se atribuía a un posible efecto combinado de la secuencia y calidad de lote debido a una mayor proporción de lotes con suelos de mayor aptitud agrícolas en los lotes provenientes de maíz (Barraco, 2009). En este estudio al establecerse las secuencias bajo un mismo tipo de suelo la diferencia de productividad se debería a un efecto “puro” de la secuencia de cultivos.

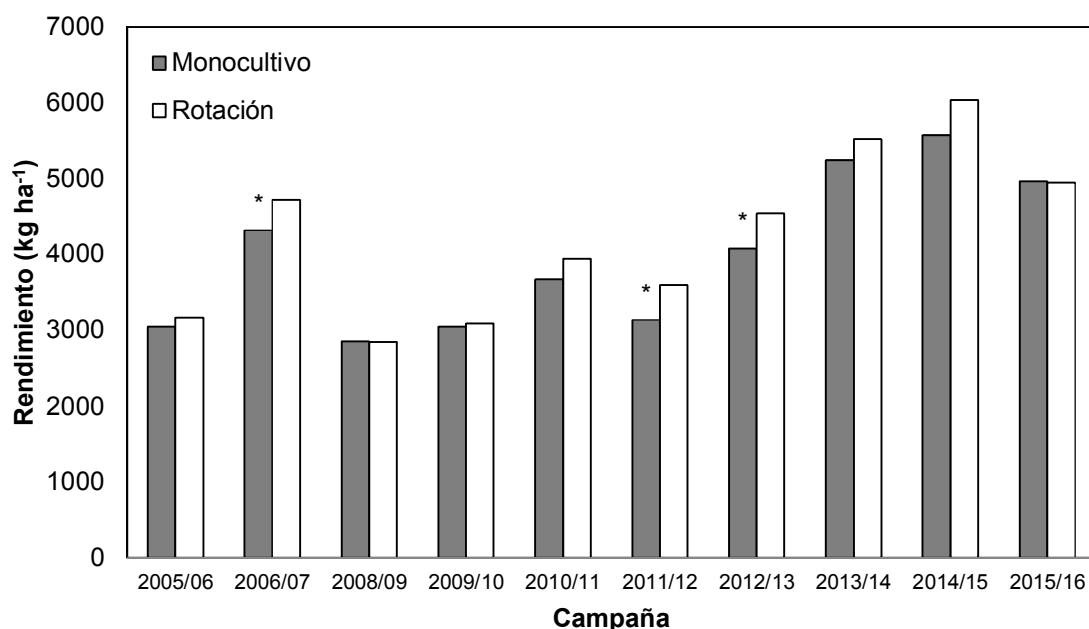


Figura 6: Rendimientos de soja según tratamientos de secuencias agrícolas: (i) monocultivo: secuencia continua de soja, y (ii) rotación de soja con maíz. Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

Los **rendimientos de maíz** variaron entre 2267 y 11803 kg ha⁻¹. En el análisis para cada campaña, se observó en la campaña 2005/06 una interacción entre el CC y la secuencia ($p=0,03$) donde para la secuencia rotada no se detectaron efectos del CC ($p=0,80$) y bajo monocultivo los rendimientos con CC fueron mayores que sin CC ($p < 0,01$). En las restantes campañas no se registró interacción entre los tratamientos de secuencia y de CC, y en 2 campañas (2010/11 y 2011/12) los CC generaron un efecto negativo en los rendimientos de maíz (Figura 7).

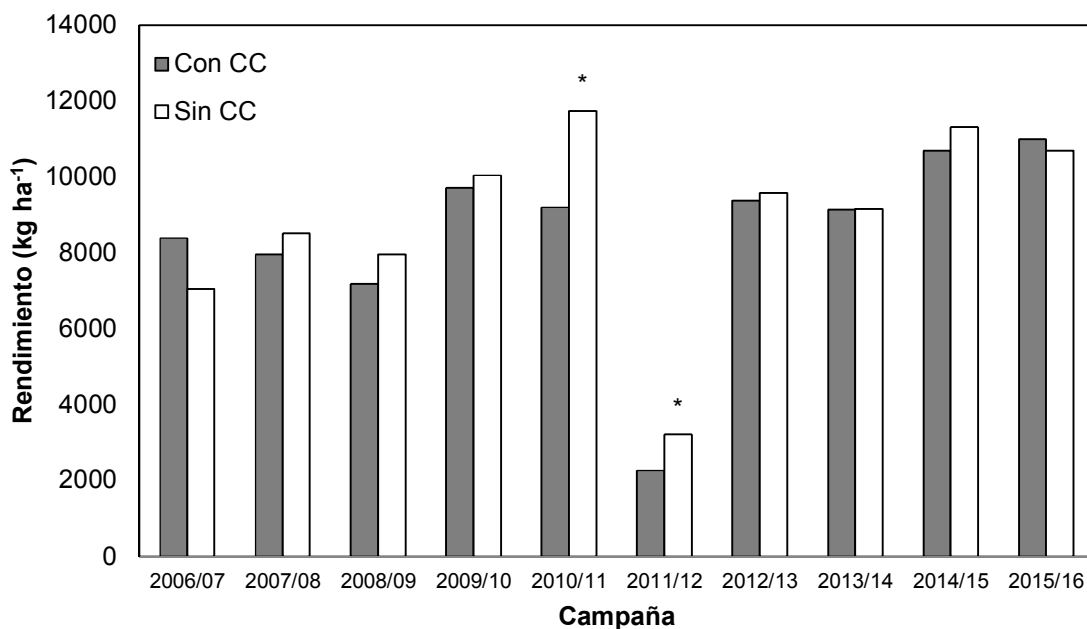


Figura 7: Rendimientos de maíz según tratamientos con y sin cultivos de cobertura (CC). Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos para la campaña.

En 3 campañas (2009/10, 2010/11 y 2015/16) los mayores rendimientos se registraron en la rotación con soja con respecto al monocultivo de maíz (Figura 8). En el análisis combinado de todo el período de estudio se observó efecto de la secuencia ($p < 0,01$), y del cultivo de cobertura ($p = 0,02$), pero no la interacción entre ambos factores ($p = 0,45$). En promedio los cultivos de maíz rotados rindieron 723 kg ha^{-1} más que en monocultivo, mientras que los tratamientos sin CC rindieron 474 kg ha^{-1} más que con CC.

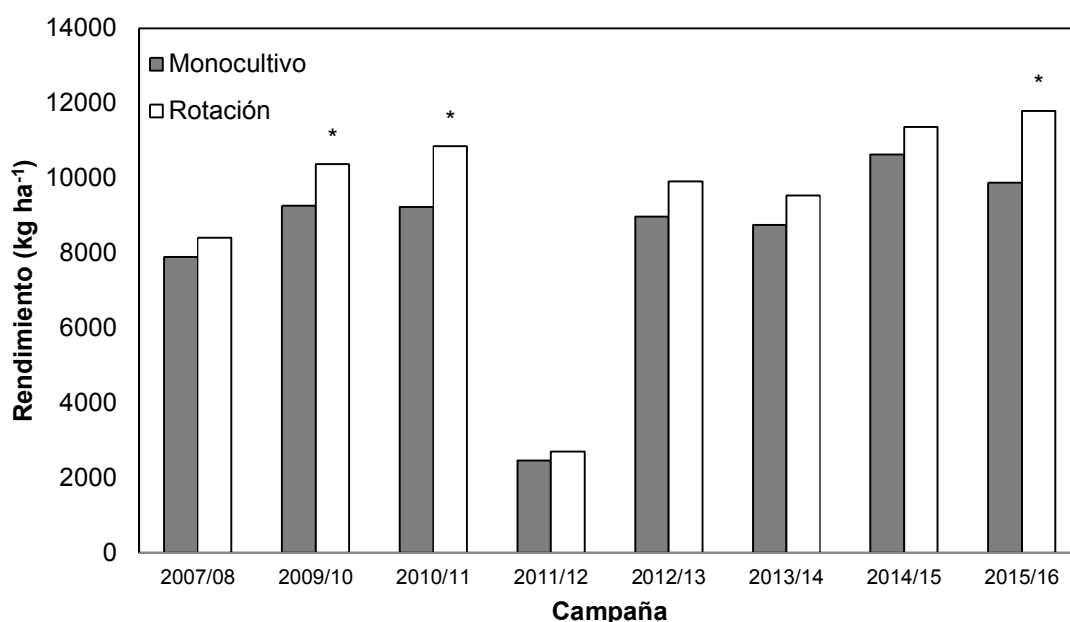


Figura 8: Rendimientos de maíz según tratamientos de secuencias agrícolas: (i) monocultivo: secuencia continua de soja, y (ii) rotación de maíz con soja. Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

La menor productividad de maíz con CC puede estar explicada en parte por la oferta hídrica. La disponibilidad de agua en el suelo en el mes de octubre, a proximidad de la siembra de maíz, se modificó por la inclusión de CC ($p < 0,01$), por la campaña ($p < 0,01$) e interacción entre ambos factores ($p < 0,05$). En 4 campañas (2008/09, 2009/10, 2010/11 y 2012/13) se observaron en promedio 44 mm menos (0 a 120 cm) en los tratamientos con CC (24 %), mientras que en las restantes campañas las diferencias no fueron significativas (Figura 9). Otros estudios también muestran menores contenidos de humedad en secuencias de CC-maíz cuando el período de barbecho es corto y/o las precipitaciones son insuficientes para la recarga de los perfiles (Balboa *et al.*, 2012; Fargioni *et al.*, 2012).

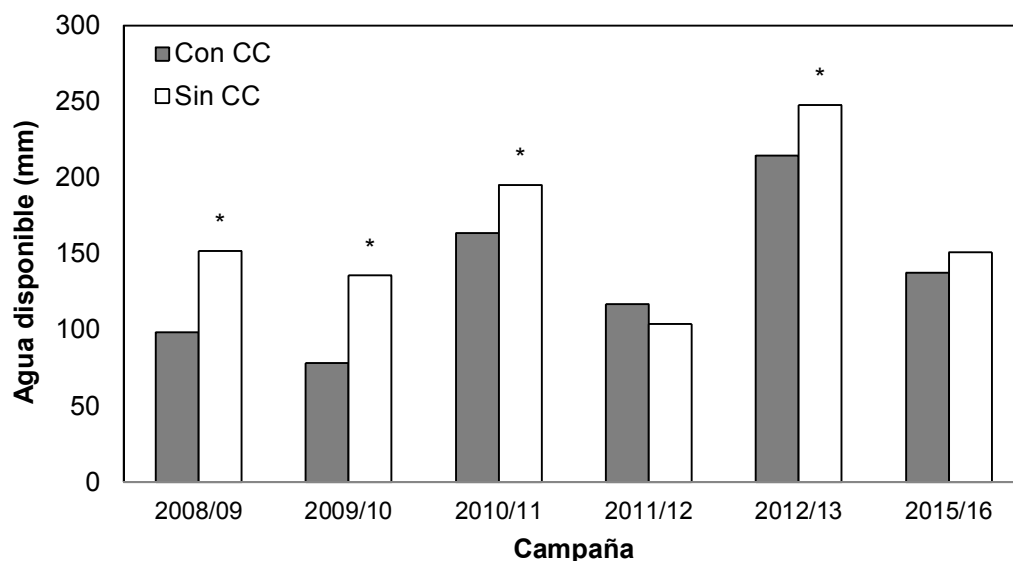


Figura 9: Disponibilidad de agua en el suelo (0 a 120 cm) en el mes de octubre alrededor de la fecha de siembra de maíz, para la secuencia de cultivos rotación maíz con soja, según tratamientos con y sin cultivos de cobertura (CC): con y sin inclusión de CC. Los asteriscos sobre las columnas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada campaña.

La disponibilidad de N de nitratos en estadios de V2 de los cultivos de maíz varió significativamente según las secuencias consideradas ($p < 0,01$), la inclusión de CC ($p < 0,01$) con interacción entre ambos factores. En promedio, los mayores contenidos de N se observaron en las secuencias sin CC (66 kg N ha^{-1}) y con mayor disponibilidad con antecesor soja (rotación). Con CC la disponibilidad de N fue en promedio de 35 kg N ha^{-1} , con contenidos similares según antecesor de maíz o soja (Figura 10). De acuerdo a estos resultados la disponibilidad de N es un factor a considerar fundamentalmente al sembrar maíz, por el efecto de menor disponibilidad bajo secuencias que incluyen CC invernales. Similares resultados fueron descriptos por Fernandez *et al.* (2013). En este estudio se ajustaron los contenidos de N de nitratos hasta alcanzar igual disponibilidad en todos los tratamientos ($150 \text{ kg N disponible ha}^{-1}$), pero podrían haber ocurrido procesos de inmovilización del N aplicado en los tratamientos con CC.

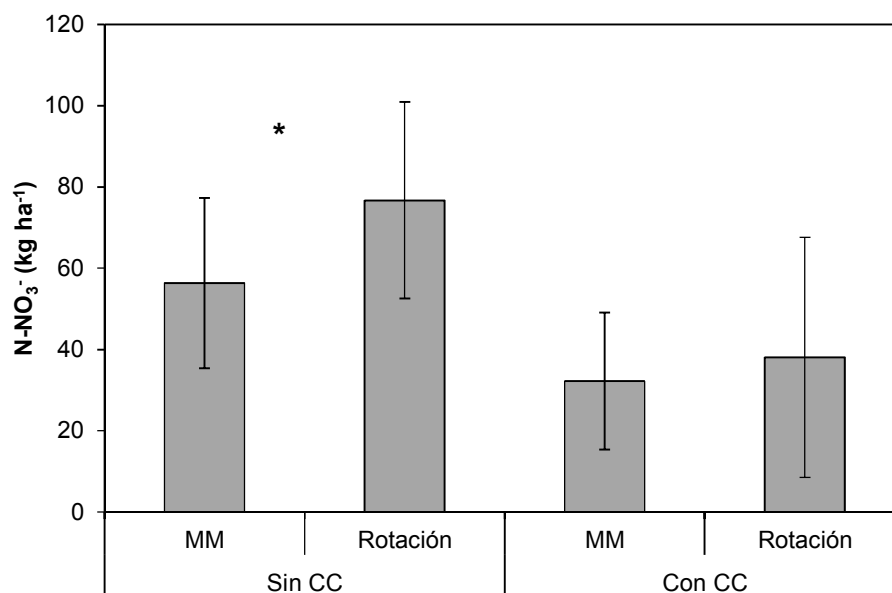


Figura 10: Contenido medio de nitrógeno de N-NO_3^- en el suelo en la capa de 0 a 60 cm de profundidad (2009 a 2011 y 2013 a 2015), según tratamientos de secuencias agrícolas: monocultivo de maíz (MM), y rotación de maíz con soja (Rotación), y tratamientos de cultivos de cobertura (CC): Con y Sin CC. Las barras verticales representan el error estándar de los datos. El asterisco indica diferencias significativas ($p < 0,05$) entre secuencias para cada tratamiento de CC.

Recomendaciones surgidas de los resultados

En las condiciones agroecológicas del presente estudio de larga duración es posible determinar que las secuencias de cultivos en rotación contribuyen a aumentar los rendimientos medios de soja en 257 kg ha^{-1} y de maíz en 723 kg ha^{-1} con respecto a secuencias continuas o en monocultivo. La inclusión de CC, a nivel general no modificó los rendimientos de soja, pero sí redujo los de maíz en 474 kg ha^{-1} .

La fertilización de los CC incrementó 36 % la producción de materia seca de la biomasa aérea de los CC. Cuando la fecha de terminación del ciclo por control químico fue uniforme, el tipo de cultivo antecesor no modificó los aportes de biomasa de los CC.

En el suelo, el contenido medio de COS superficial luego de 11 años de efectos acumulados en monocultivo de maíz no presentó diferencias al incluir o no CC. En contraposición la inclusión de CC incrementó los contenidos de COS superficial (0 a 5 cm) en la rotación de soja con maíz, y en condiciones de monocultivo de soja.

Financiamiento:

Durante el transcurso del período analizado el ensayo se financió con aportes de Proyectos de INTA y de la Asociación Cooperadora de la EEA INTA General Villegas. Los proyectos de INTA fueron: BANOR01 (2006-2009), PNCER 2341 (2006-2009), PNCER 022411 (2009-2012), BANOR 710011 (2009-2012), PNCyO 1127032 (2013-2019), PNSUELO 1134023 (2013-2019), BANOR 11271305 (2013-2019), y BANOR 112701309 (2013-2019).

Agradecimientos

Los autores agradecen a quienes acompañaron en el desarrollo de los ensayos y en la obtención de datos: Ing. Agr. Cristian Álvarez, Ing. Agr. Walter Miranda, Ing. Agr. Carlos Scianca, Ing. Agr. Marta Perez, Sr. Pablo Agüero, Tec. Alberto Hellbusch, Sr. Matías Aguirre, Sr. Lautaro Oga, Sr. Agustín Iaconis, Sr. Neri Faundes, Tec. Agustín Mosca, Tec. Miguel Menghini y Tec. Daniela Soria.

Bibliografía

- Alfieri, AE; JC Viale & RE Sobral. 1990. Carta de suelos del campo experimental de la EEA General Villegas. INTA CIRN, 90 pp.
- Alvarez, C; CR Alvarez; A Costantini & M Basanta. 2014. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). *Soil & Till. Res.* 142: 25-31.
- Angers, DA & NS Eriksen-Hamel. 2008. Full-inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 72(5), 1370-1374.
- Baigorria, T; C Cazorla; P Beluccini; B Aimetta; V Pegoraro; M Bocolinni & C Álvarez. 2014. Efecto del rolado de cobertura sobre la dinámica de agua y malezas. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía, Blanca, 5 al 9 de mayo de 2014. En CD.
- Balboa, GR; G Saggioratto; M Beltrame; C Ceriarli; A Marengo & GP Espósito. 2012. Centeno como cultivo de cobertura para maíz en el sur de Córdoba. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, 16 al 20 de abril de 2012. En CD
- Barraco, M. 2009. Productividad de soja [*Glycine max* L. (Merrill)] según propiedades edáficas de hapludoles de la región de la pampa arenosa. Tesis de Maestría en Ciencias del Suelo. Escuela para Graduados Alberto Soriano, Facultad de Agronomía, UBA. 113 pág. Agosto de 2009.
- Barraco, M; C Scianca; A Lardone; C Álvarez & M Díaz-Zorita. 2012. Cereales de Invierno como cultivos de cobertura en secuencias continuas de soja. En: Stenglein, SA (comp) (Et al.). Cereales de invierno: Investigación científico técnica desarrollada por el INBA (CONICET/FAUBA), EL BIOLAB AZUL(CIC-PBA/FIBA/FAUNCPBA), la Facultad de Agronomía UBA y la Facultad de Agronomía UNCPBA. Tandil. UNCPBA. Pp:231-238.

- Blanco-Canqui, H; JD Holman; AJ Schlegel; J Tatarko & T Shaver. 2013. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77:1026–1034.
- Blanco-Canqui, H; MM Claassen & DR Presley. 2012. Summer cover crops fix nitrogen, increase crop yield, and improve soil–crop relationships. *Agron. J.* 104:137–147.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soil. *Soil Science* 134:376-380.
- Caviglia, O; L Novelli; V Gregorutti; N Van Opstal & R Melchiori. 2012. Cultivos de cobertura invernales: una alternativa de intensificación sustentable en el centro-oeste de Entre Ríos. En: Álvarez, C; A Quiroga; D Santos & M Bodrero (Ed.) *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción*. 1.º ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 148-157.
- Di Rienzo JA; F Casanoves; MG Balzarini; L González; M Tablada & CW Robledo. 2016. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita, M & DE Buschiazzi. 2006. Soils of the Pampas. *Encyclopedia of Soil Science* DOI: 10.1081:1653-1657.
- Díaz-Zorita M; GA Duarte & JH Grove 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.
- Fargioni, M; C Vega; T Baigorria; J Pietrantonio & C Cazorla. 2012. Efectos de los cultivos de cobertura sobre la disponibilidad hídrica y nitrogenada a la siembra y rendimiento de maíz. Disponible en: http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-intamjz_cc_fargioni12.pdf. Acceso: 25/10/2016.
- Fernandez, R; M Saks; M Uhaldegaray; A Quiroga & E Noellemeyer. 2013. Estudio de la contribución de nitrógeno por parte de los cultivos de cobertura al cultivo de maíz. IAH 9, Marzo de 2013. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/DF6DC8A69254472385257B340054D77E/\\$FILE/12.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/DF6DC8A69254472385257B340054D77E/$FILE/12.pdf). Acceso: 01/11/2016.
- Huggins, DR; RR Allmaras; CE Clapp; JA Lamb & GW Randall. 2007. Corn-Soybean Sequence and Tillage Effects on Soil Carbon Dynamics and Storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:145-154.
- Kaspar, TC; DB Jaynes; TB Parkin; TB Moorman & JW Singer. 2012. Effectiveness of oat and rye cover crops in reducing nitrate losses in drainage water. *Agric. Water Manage.* 110:25–33. doi:10.1016/j.agwat.2012.03.010
- MAGyP. 2016. [En línea] Disponible en: www.datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones. Acceso: 16/10/2016.
- Neill, C; J Melillo; PA Steudler; CC Cerri; JFL Moraes; MC Piccolo & M Brito. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in southwestern Brazilian amazon. *Ecological Applications* 7: 1216-1225.
- Novelli, LE; OP Caviglia & RJM Melchiori. 2011. Impact of soybean cropping frequency on soil carbon storage in Mollisols and Vertisols. *Geoderma* 167-168: 254-260.

- Ortiz, J; M Bojanich; L Ferreyra; C Cazorla; T Baigorria; A Canale & V Pegoraro. 2012. Evaluación de cultivos de cobertura antecesores de soja en suelos de texturas contrastantes. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, 16 al 20 de abril de 2012. En CD.
- SAGyP-INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1: 500000. Proyecto PNUD ARG 85/019, editado por Secretaría de agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. 472 pp.
- Scianca C; MF Varela; M Barraco; C Álvarez & A Quiroga. 2013. Cultivos de cobertura en un Hapludol Thapto Argico de la Pampa Arenosa: análisis de 5 campañas. En: Álvarez, C; A Quiroga; D Santos & M Bodrero (Ed.) Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción. 1.º ed. La Pampa: Ediciones INTA. p. 105-116.
- Sian, B. 2002. Variabilidad de las condiciones hídricas en la región semiárida pampeana, Argentina. *Geoacta* 27:30-50.
- Steinbach, HS & R Alvarez, R. 2005. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in pampean agroecosystems. *J. Environ. Qual* 35: 3-13
- Viglizzo E; LV Carreño; H Pereyra; F Ricard; J Clatt & D Pincén. 2010. Capítulo 1: Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: Expansión de la Frontera Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental. Viglizzo, E & E Jobágy. (eds). Ediciones INTA, Buenos Aires. 102 pp.
- Walkley, A & TA Black. 1934. An examination of the Degtjaerff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.

Diez años de siembra directa en un Hapludol de la Pampa Arenosa con diferentes condiciones iniciales de uso

Jorge Zanettini¹, Mirian Barraco², Martín Díaz-Zorita³

¹ INTA AER 25 de Mayo; ² INTA EEA General Villegas; ³ Desarrollo de tecnologías en Monsanto

PROBLEMÁTICA DE ESTUDIO

En la región de la pampa arenosa, junto a la expansión de sistemas agrícolas descritos en el capítulo 11 de esta publicación, fue creciente a partir de la década del 90 la adopción de prácticas de siembra directa (SD). Aproximadamente el 90 % de la superficie cultivada en esta región actualmente se realiza bajo prácticas continuas en SD.

En 1990, y con el objetivo de determinar los efectos de largo plazo de la incorporación de prácticas agrícolas en SD, se estableció un ensayo de larga duración en el campo experimental de la EEA del INTA en General Villegas. El estudio se instaló sobre una pastura de festuca (*Festuca arundinacea*) establecida en 1987 y se desarrolló en una secuencia continua de soja y de maíz en rotación. Inicialmente se evaluaron tres sistemas de manejo de los suelos: i) labranza con arado de rejas y repaso con discos de doble acción, ii) labranza con arado de cincele y repaso con discos de doble acción y iii) SD con control químico de malezas. Además, se mantuvo, como control sin agricultura, la pastura de festuca sin pastoreo y bajo cortes.

La implementación de prácticas continuas de SD mostró mayor acumulación de contenidos de materia orgánica (MO), la formación de agregados de mayor tamaño y estabilidad de fragmentos de los suelos que bajo sistemas con laboreo (Díaz-Zorita *et al.*, 2004). Estos resultados coinciden con los descriptos para estudios similares realizados en otras regiones de la región pampeana (Buschiazzi *et al.*, 1996) validando la contribución de la implementación de la SD para la conservación de la calidad de los suelos. Sin embargo, las observaciones sobre la porosidad de los suelos evaluada a partir de mediciones de densidad aparente (DA), de pH y los niveles extractables de fósforo (Pe) fueron variados y no coincidieron con lo descripto en estudios similares (Sanchez & García, 1998; Ferreras *et al.*, 2000; Lal *et al.*, 1990; Giuffré *et al.*, 1995). Estos resultados variados se atribuyeron, entre otros factores, al estado inicial del suelo en el momento de instalarse el sistema de SD entre los diferentes estudios comparados. Solo algunos estudios se iniciaron a partir de condiciones prístinas sin

antecedentes de prácticas agrícolas y en general su implementación se realizó en sitios bajo prácticas agrícolas con variada intensificación y nivel de degradación. Es así que los estudios comparativos de labranzas no son concluyentes en definir si los cambios aparentes que generan las prácticas de SD se atribuyen a modificaciones inducidas por sí misma o resultan de la interacción con la condición inicial de uso del suelo. Por ejemplo, al compararse sistemas con diferentes prácticas de labranzas, el aumento aparente de la MO en SD, independientemente del uso previo del suelo podría resultar de su contribución efectiva, de la conservación comparada con el deterioro producido en sistemas bajo laboreo, (en ambos casos), o bien, consecuencia de una de las anteriores situaciones en interacción con el uso inicial del suelo. Este comportamiento, conduce al interrogante si la SD contribuye exclusivamente a la conservación de los suelos independientemente de su condición original de uso, o de su implementación se pueden esperar procesos de mejora en aquellos ambientes laboreados previamente.

En todos los casos, se observa que en ausencia de remoción (sistemas de labranza cero o SD) los contenidos de MO y Pe se estratifican acumulándose en la superficie de los suelos. La mayor concentración de MO en los estratos superficiales de suelos minerales es esencial para el control de la erosión y la conservación de nutrientes. Según Franzluebbers (2003), se consideran estabilizados aquellos ambientes con índices de estratificación superiores a 2. Es así que el grado de estratificación expresado como un índice relativo es considerado como un indicador de la calidad de los suelos para analizar la evolución aparente de sistemas bajo diversas condiciones de uso (ej. prácticas de laboreo, uso previo, etc.).

Se hipotetiza que la implementación de prácticas agrícolas en SD en un Hapludol típico previamente laboreado, incrementaría los contenidos de MO, de Pe, el tamaño de fragmentos y la estabilidad de la estructura, y contrariamente reduciría el pH y la DA. Estos cambios serían de mayor magnitud en las capas superficiales. En cambio, en el mismo suelo pero a partir de condiciones de manejo sin remoción (ej. pastura o agricultura sin labranza), la conducción de prácticas agrícolas bajo SD no generaría cambios relevantes de estas propiedades con respecto a su condición inicial.

El objetivo de nuestro estudio fue determinar si el sistema de SD para la producción agrícola continua es una práctica conservacionista o mejoradora de las propiedades de un suelo clasificado como Hapludol típico representativo de la región semiárida-subhúmeda de la pampa arenosa, a partir de diferentes niveles de remoción previa del suelo.

CARACTERÍSTICAS DEL EXPERIMENTO

El estudio se realizó en la EEA del INTA en General Villegas (Drabbe, provincia de Buenos Aires) a partir de un estudio comparativo de labranzas iniciado en 1991 y descripto en la introducción de este capítulo. El clima y condiciones generales de relieve de la región fueron descriptos en el Capítulo 11. El suelo predominante en el ensayo es un Hapludol típico serie Blaquier, compuesto por los horizontes A (0 a 20 cm), AB (20 a 28 cm), Bw (28 a 57 cm), B (57 a 89 cm) y C (> 89 cm). El horizonte A es de textura franco-arenosa con 61,5 g kg⁻¹ de arena, 26,1 g kg⁻¹ de limo y 12,4 g kg⁻¹ de arcilla.

En la primavera del 2001 se instalaron tres tratamientos de rotación continua de maíz-soja bajo prácticas de SD diferenciados según tres condiciones contrastantes de uso previo del suelo:

- i) F Pastura de festuca de 14 años de implantada y sin pastoreo (PF),
- ii) F Agricultura en SD o sin remoción durante 10 años (LSR), y.
- iii) F Agricultura con labranzas o bajo prácticas de remoción durante 10 años (LCR).

Durante el otoño del 2001 y del 2011, se tomaron muestras compuestas y disturbadas de los suelos en las profundidades de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm. En cada una se determinó la concentración de MO (Walkley & Black, 1934), de Pe (Bray & Kurtz, 1945) y el pH en agua por potenciometría. Se calculó el índice de estratificación de MO (IE_{MO}) y del Pe (IE_{Pe}), como el cociente entre los valores de la capa superficial y las capas de 15 a 20 cm de profundidad. Además, se tomaron muestras por duplicado de 0 a 10, 10 a 20 y 20 a 30 cm de profundidad para la determinación de la DA (Blake & Hartge, 1986). Para evaluar la estructura y su estabilidad se cuantificó la distribución de fragmentos separados bajo condiciones uniformes de energía de fraccionamiento (Díaz-Zorita *et al.*, 2002a), donde sin la aplicación de esta energía se calcula el diámetro medio ponderado (DMP) considerado equivalente al existente en el suelo en el momento de la evaluación. La tasa de reducción del DMP (TR-DMP), se estimó según la pendiente de la relación exponencial entre los niveles de energía de ruptura por caída y los valores de DMP.

Las diferencias entre usos previos del suelo se analizaron en relación a las diferencias entre el inicio y luego de 10 años de SD en cada tratamiento.

El diseño experimental fue en seis bloques completos aleatorizados con parcelas de 400 m². Los resultados de MO, Pe, pH en agua y DA se evaluaron mediante análisis de la varianza empleando un modelo de parcelas divididas en el espacio. Los IE_{MO}, IE_{Pe}, DMP y la TR-DMP se evaluaron mediante

análisis de la varianza empleando un modelo en parcela dividida. En todos los casos la comparación múltiple de medias de las propiedades edáficas se realizó mediante la prueba de Tukey ($p < 0,15$).

RESULTADOS

Materia orgánica

Luego de 10 años de SD, la diferencia de MO en cada capa fue independiente del uso previo del suelo ($p < 0,48$; Tabla 1). De 0 a 5 cm de profundidad se observaron incrementos medios del 10 % ($p < 0,005$), mientras que entre 5 y 20 cm de profundidad no se observaron diferencias entre momentos de evaluación ($p < 0,52$). Las diferencias entre los IE_{MO} de la condición inicial y luego de los 10 años de SD no dependieron del uso previo del suelo ($p < 0,57$; Figura 1). La estratificación de la MO mostró un incremento medio del 16 % ($p < 0,0001$) entre ambos momentos de evaluación.

Tabla 1: Concentración de la materia orgánica ($g\ kg^{-1}$) de un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos del suelo (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción) y diferentes profundidades. Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa en cada profundidad. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre profundidades para cada uso previo del suelo y momentos de evaluación ($p < 0,005$).

Profundidad (cm)	LSR		PF		LCR		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0 a 5	33 a	36 a	35 a	38 a	28 a	31 a	32 A	35 B
5 a 10	24 b	25 b	26 b	27 b	24 b	23 b	25 A	25 A
10 a 15	21 c	21 c	21 c	23 c	22 c	21 c	21 A	22 A
15 a 20	19 c	19 c	21 c	20 c	20 d	18 d	20 A	19 A

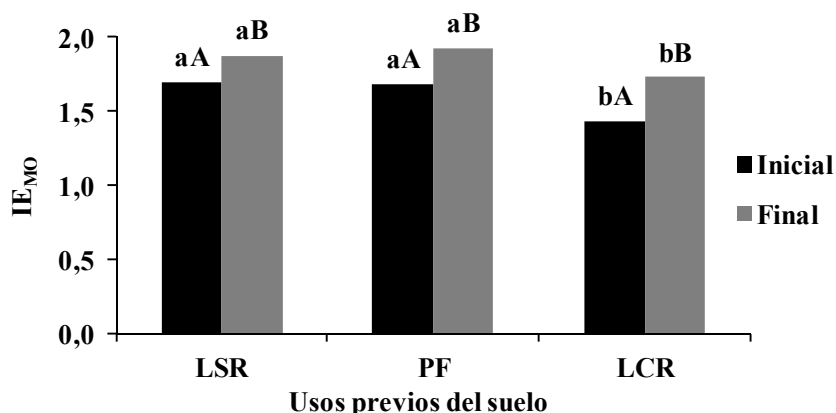


Figura 1: Índice de estratificación medio de la materia orgánica (IE_{MO}) de un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción). Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa para un mismo uso previo. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre usos previos según momentos de evaluación ($p < 0,002$).

El incremento en la MO observado en los primeros 5 cm se atribuiría a la permanencia de los residuos de cosecha en superficie y a la ausencia de remoción, resultando en una menor tasa de mineralización.

Dado que el efecto de la SD es independiente del uso previo, las diferencias superficiales de MO entre tratamientos al inicio del estudio, se mantuvieron en magnitudes similares luego de los 10 años de SD. Esto sugiere que la SD incrementa la MO en superficie independientemente del nivel de remoción, sin embargo la concentración luego de 10 años es dependiente del uso previo del suelo siendo superior en aquellos con menor remoción inicial (Figura 2).

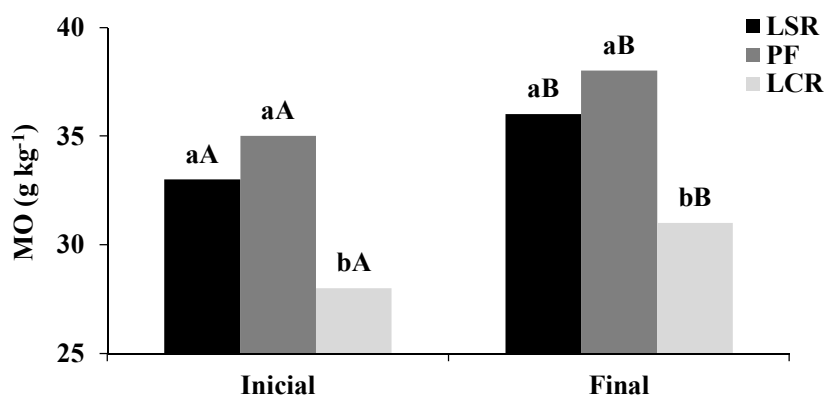


Figura 2: Concentración de la materia orgánica (g kg⁻¹) entre 0 y 5 cm de profundidad de un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos del suelo (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción). Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa en cada uso previo del suelo. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre usos previos del suelo en cada momento de evaluación ($p < 0,01$).

El IE_{MO} mostró que 10 años de SD contribuyen a mejorar la calidad de un Hapludol típico dado el incremento observado en este índice, en aproximadamente un 16 %, y además estuvo próximo a la estabilización (índice 2). Luego de 10 años de SD, el mayor IE_{MO} con antecedentes de uso del suelo bajo LSR con respecto a LCR, mostró que este índice es dependiente del tiempo de implementación del sistema de SD. Los resultados sugieren un índice superior cuanto mayor es el tiempo. Además, luego de 10 años de este sistema de labranza, el mayor IE_{MO} con uso previo del suelo bajo PF con respecto a LCR, mostró que este índice también es dependiente del nivel de remoción previa. Esto implica que sobre suelos no laboreados, la SD produciría una rápida estabilización del IE_{MO} , es decir, mejoraría su calidad en poco tiempo de implementación de este sistema de labranza.

Existen estudios que han descripto mayores concentraciones superficiales de MO en SD con respecto a sistemas de labranza con remoción (Díaz-Zorita *et al.*, 2002b). Esta diferencia se atribuye, en parte, a una menor acumulación de MO en los sistemas con remoción dado por mayores tasas de mineralización. Según nuestro estudio, la diferencia observada por estos autores en superficie, también podría atribuirse a una contribución efectiva en el aumento de MO que induce la SD por sí misma al acumular residuos de cosecha en superficie. Por otra parte, estos autores observaron bajo prácticas de labranza con remoción mayores concentraciones de MO con respecto a la SD en capas más profundas del perfil. Esta diferencia entre ambos sistemas de labranzas, según lo descripto en nuestro estudio, podría ser el resultado de una conservación efectiva de MO en SD frente a las operaciones de remoción que incorporan la MO superficial en capas más profundas y con mayor proporción de partículas minerales.

Acidez

Luego de 10 años de SD, la diferencia de pH en agua en cada capa fue independiente del uso previo del suelo ($p < 0,51$), observándose en todas las capas incrementos medios de la acidez del 5 % ($p < 0,0001$; Tabla 2). Además se observó una relación lineal y negativa entre los valores de pH en agua y el IE_{MO} , lo que sugiere que las variaciones en los niveles de acidez son explicadas en parte por los aumentos de MO superficial (Figura 3).

Tabla 2: Valores de pH en agua medios en un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción) y diferentes profundidades (cm). Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa para cada profundidad. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre profundidades para un mismo uso previo del suelo y momento de evaluación ($p < 0,0001$).

Profundidad (cm)	LSR		PF		LCR		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0 a 5	6,2 a	5,9 ab	6,1 a	5,8 a	6,3 a	5,9 ab	6,2 A	5,9 B
5 a 10	6,2 a	5,8 a	6,1 ab	5,8 a	6,2 a	5,8 a	6,2 A	5,8 B
10 a 15	6,2 ab	5,9 ab	6,2 ab	5,9 b	6,2 a	5,8 a	6,2 A	5,9 B
15 a 20	6,3 b	6,0 b	6,3 b	6,1 c	6,3 a	6,0 b	6,3 A	6,0 B

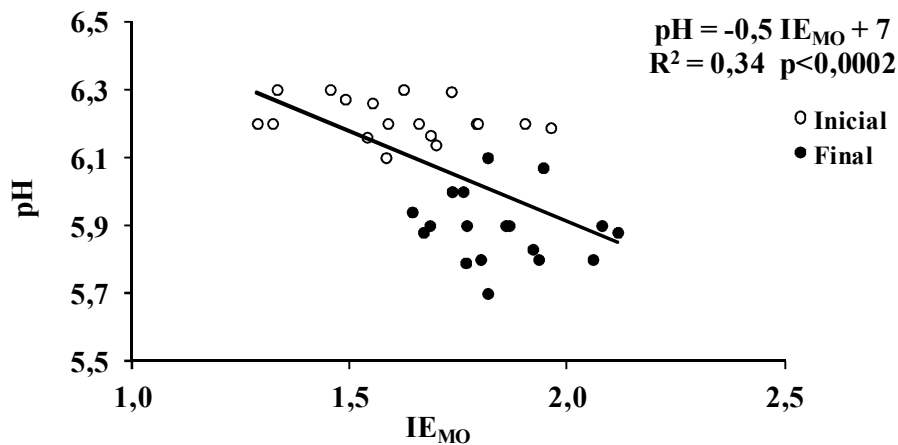


Figura 3: Relación del pH en agua (promedio de 0 a 20 cm de profundidad) y el índice de estratificación de la materia orgánica (IE_{MO}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad en un Hapludol típico entre el inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa.

En este estudio las fertilizaciones anuales de los cultivos de maíz con urea a razón de 100 kg ha^{-1} de nitrógeno podrían constituir otro de los factores causantes del incremento de la acidez. La implementación del sistema de SD induce un crecimiento de la población microbiana del suelo, lo que produce más dióxido de carbono y contribuye a la acidificación del perfil. Otra característica propia de este estudio que ayuda a la acidificación es la textura franco-arenosa, la baja capacidad buffer favorecería la acidificación luego de 10 años de SD.

Fósforo extractable

Las diferencias entre los contenidos iniciales y finales de Pe en cada capa, fueron independientes del uso previo del suelo ($p<0,63$; Tabla 3). Entre ambos momentos de evaluación, se detectaron aumentos promedio del 43 y 23 %, en las profundidades de 0 a 5 y 5 a 10 cm, respectivamente ($p<0,03$). Entre 10 y 20 cm de profundidad, la disponibilidad de Pe no varió entre momentos de evaluación ($p<0,23$). Las diferencias en los IE_{Pe} entre ambos momentos de evaluación no dependieron del uso previo del suelo ($p<0,19$) y mostraron incrementos medios del 69 % ($p<0,0001$; Figura 4). Se observó una relación lineal y positiva entre el IE_{Pe} y el IE_{MO} (Figura 5). De allí se deduce que los incrementos de MO superficial explicarían en parte el aumento del Pe acumulado en superficie al final de los 10 años de SD.

Tabla 3: Contenido de fósforo extractable ($mg\ kg^{-1}$) de un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción) y diferentes profundidades (cm). Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa para cada profundidad. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre profundidades para cada momento de evaluación ($p<0,06$).

Profundidad (cm)	LSR		PF		LCR		Promedio	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0 a 5	16	26	19	28	22	28	19 aA	27 aB
5 a 10	12	14	10	14	15	16	12 bA	15 bB
10 a 15	9	10	9	10	12	14	10 cA	11 cA
15 a 20	9	8	9	9	12	12	10 cA	9 cA

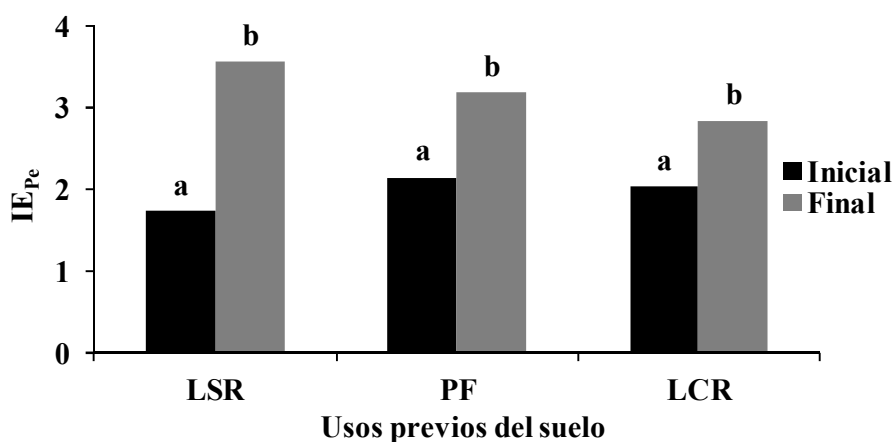


Figura 4: Índice de estratificación medio del fósforo extractable (IE_{Pe}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad de un Hapludol típico al inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción). Letras distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa para un mismo uso previo ($p < 0,0001$).

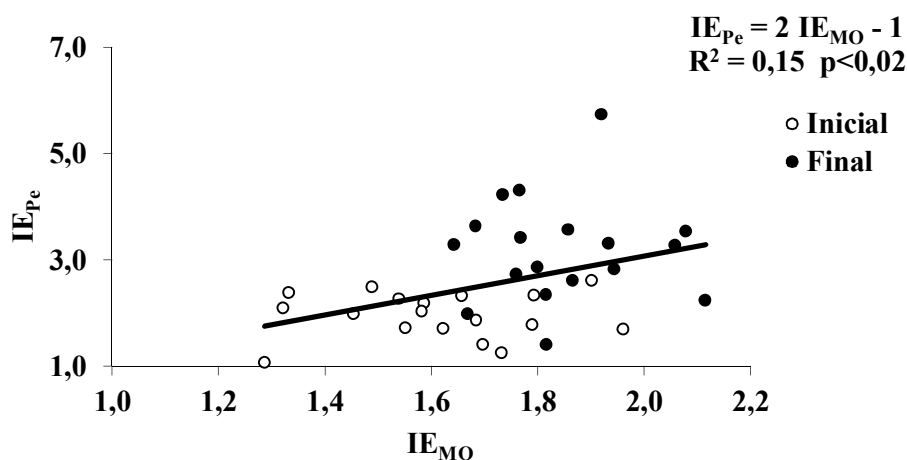


Figura 5: Relación del índice de estratificación de fósforo extractable (IE_{Pe}) y el índice de estratificación de la materia orgánica (IE_{MO}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad en un Hapludol típico entre el inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa.

Los residuos de los cultivos y su sistema radical dejados por la SD son descompuestos, constituyendo una fuente de fósforo (P) que se acumula en la superficie del suelo (Díaz-Zorita *et al.*, 2002b). De este modo, el aumento de Pe observado podría atribuirse al ciclado desde capas situadas a profundidades mayores a 20 cm y posterior acumulación en la superficie a partir de los residuos de cosecha (Deubel *et al.*, 2011). También el incremento de MO observado en los 5 cm superficiales pudo actuar

aumentando la disponibilidad de Pe al reducir la adsorción de éste en las partículas minerales. La no remoción del suelo durante 10 años y la baja movilidad del P también podrían haber favorecido su acumulación en los 10 cm superficiales. Las estrategias de fertilización de enriquecimiento y mantenimiento utilizan dosis de 27 y 20 kg ha⁻¹ año⁻¹ de P en maíz y soja, respectivamente (Barraco *et al.*, 2009). Esto permite suponer que, en las condiciones de nuestro estudio, las fertilizaciones de P aplicadas durante los 10 años (17 y 11 kg ha⁻¹ año⁻¹ en maíz y soja, respectivamente), no serían suficientes para lograr balances positivos que justifiquen la acumulación de Pe en superficie. Algunos estudios que comparan sistemas de labranzas han descripto mayores contenidos de Pe luego de implementar prácticas de SD que bajo labranzas con remoción (Saavedra *et al.*, 2007). Los resultados de este estudio muestran que estas diferencias podrían atribuirse a una contribución efectiva en el aumento de Pe que induce la SD por sí misma, en relación a la acumulación de residuos de cosecha en superficie.

Se observó un IE_{Pe} superior luego de 10 años de SD con respecto a la condición inicial, indicando que este sistema de labranza contribuye a mejorar la calidad de un Hapludol Típico. Contrariamente a lo ocurrido con el IE_{MO}, el IE_{Pe} fue independiente del tiempo de implementación del sistema de SD, dado que luego de 10 años de su adopción con antecedentes de LSR, el IE_{Pe} no fue significativamente superior con respecto al uso previo de LCR o PF. También fue independiente del nivel de degradación por remoción inicial del suelo, dado que luego de 10 años de SD con antecedentes de PF, el IE_{Pe} no fue significativamente mayor con respecto al uso previo de LCR.

Densidad aparente

Luego de 10 años de SD, los cambios de DA en los 10 cm superficiales fueron independientes del uso previo del suelo ($p < 0,19$). En esta profundidad y entre ambos momentos de evaluación se observó una reducción media del 4 % ($p < 0,02$; Tabla 4). Contrariamente, de 10 a 20 y de 20 a 30 cm de profundidad se observaron diferencias entre ambos momentos de evaluación dependientes del uso previo del suelo ($p < 0,07$). Bajo antecedentes de uso con LSR se detectaron incrementos en la DA del 4 % en cada una de estas capas ($p < 0,11$), mientras que en PF y LCR no se detectaron diferencias entre ambos momentos ($p < 0,80$ y $0,29$; respectivamente). La reducción de la DA entre 0 y 10 cm de profundidad se atribuyó en parte a los incrementos de MO superficial, ya que se observó una relación inversa entre la DA y el IE_{MO} (Figura 6). Además, en 10 años de SD se podría inducir

aumentos en la distribución y densidad del sistema radicular entre 0 y 10 cm de profundidad contribuyendo en la reducción de la DA superficial.

Tabla 4: Densidad aparente media (Mg m^{-3}) de un Hapludol típico antes (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa con distintos usos previos (LSR = siembra directa o sin remoción, PF = pastura de festuca, LCR = labranza con remoción) y diferentes profundidades (cm). Letras mayúsculas distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de siembra directa para un mismo uso previo y profundidad. Letras minúsculas distintas muestran diferencias significativas entre profundidades para un mismo uso previo del suelo y momento de evaluación ($p < 0,11$).

Profundidad (cm)	LSR		PF		LCR	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
0 a 10	1,30 aA	1,28 aB	1,35 aA	1,21 aB	1,31 aA	1,30 aB
10 a 20	1,36 bB	1,42 bA	1,39 bA	1,38 bA	1,40 bA	1,37 bA
20 a 30	1,34 bB	1,40 bA	1,37 bA	1,37 bA	1,36 bA	1,34 bA

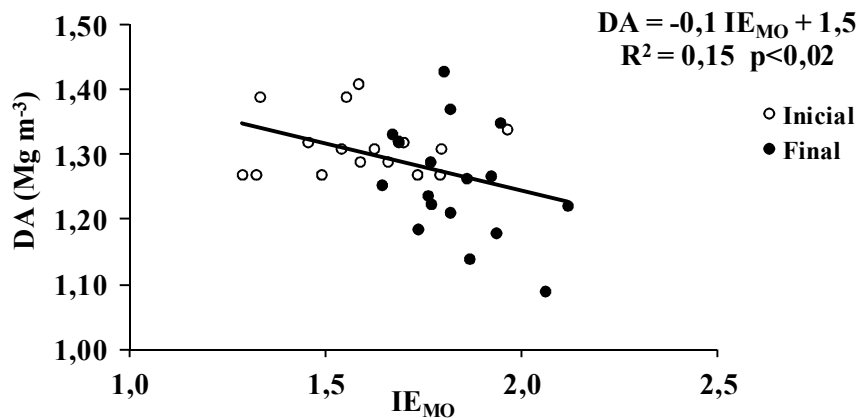


Figura 6: Relación de la densidad aparente (DA) de 0 a 10 cm de profundidad y el índice de estratificación de la materia orgánica (IE_{MO}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad de un Hapludol típico entre el inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa.

Estudios que comparan sistemas de labranzas en suelos de textura franco-arenosa han descripto en la superficie valores de DA superiores en SD con respecto a labranza con remoción (Díaz-Zorita, 1996). La diferencia fue atribuida a incrementos en la DA causados por la SD, conjuntamente con las reducciones de esta propiedad debidas a la remoción por labranza. Sin embargo, las reducciones superficiales en los valores de DA observadas en este estudio hacen pensar que la diferencia descripta por estos autores podría atribuirse a una menor reducción de esta propiedad bajo sistema de SD con respecto a labranza con remoción.

El incremento de la DA entre 10 y 30 cm de profundidad, en los tratamientos con antecedentes de LSR, mostró un efecto de compactación con la implementación durante 10 a 20 años de la SD. El aumento de la DA podría atribuirse a un mayor número de años con agricultura sin remoción con respecto a usos previos de PF y LCR, complementado con el tránsito de maquinarias. Sin embargo, luego de 10 años de SD con antecedentes de LSR, los valores de DA se encuentran dentro del rango normal de texturas franco-arenosas (1,2 a 1,6 Mg m⁻³).

Estructura de los suelos

Luego de 10 años de SD la diferencia de DMP sin la aplicación de energía de ruptura por caída, fue independiente del uso previo del suelo (p<0,95) y mostró un incremento medio del 35 % (p<0,06). Entre ambos momentos de evaluación, e independientemente de los antecedentes de uso del suelo (p<0,20), no se observaron diferencias en la TR-DMP ante niveles crecientes de energía de ruptura por caída (p<0,27; Tabla 5).

Tabla 5: Diámetro medio ponderado (DMP) y tasa de reducción del diámetro medio ponderado ante niveles crecientes de energía de fragmentado por caída en un Hapludol típico antes (Inicial) y luego (Final) de 10 años de labranza cero. Promedio de distintos usos previos del suelo (labranza cero o sin remoción, pastura de festuca, labranza con remoción). Letras distintas muestran diferencias significativas entre el inicio y luego de 10 años de labranza cero (p<0,06).

	Inicial	Final
DMP (mm)	33 a	45 b
Tasa de reducción del DMP (mm J ⁻¹ g ⁻¹)	5,5 a	4,1 a

Se observó una relación lineal y positiva entre los IE_{MO} y el DMP (Figura 7), sugiriendo que la agregación superficial del suelo depende en parte de los contenidos de MO acumulados en superficie.

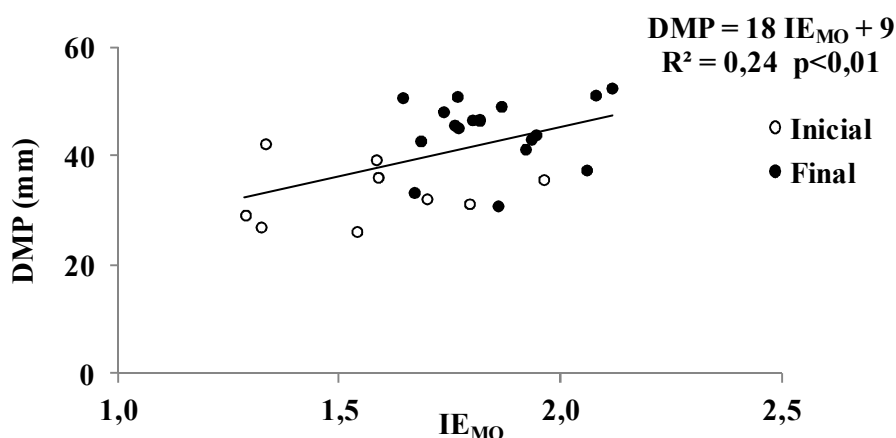


Figura 7: Relación del diámetro medio ponderado (DMP) sin la aplicación de energía de ruptura por caída (nivel $0,00 \text{ J g}^{-1}$) y los índices de estratificación de la materia orgánica (IE_{MO}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad en un Hapludol típico entre el inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa.

Se detectó una relación lineal e inversa entre los IE_{MO} y las TR-DMP (Figura 8). Si bien no se observaron cambios en las TR-DMP entre el inicio y luego de 10 años de SD, esta relación sugiere que los incrementos de MO superficial tienden a disminuir las TR-DMP. Esto implica que con más de 10 años de implementación de SD podría detectarse un aumento en la estabilidad de la estructura.

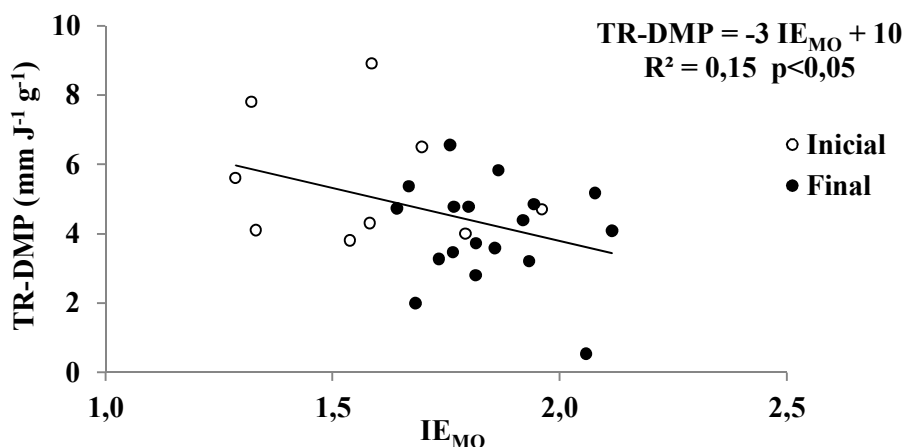


Figura 8: Relación de la tasa de reducción del diámetro medio ponderado (TR-DMP) y los índices de estratificación de la materia orgánica (IE_{MO}) considerando capas de 0 a 5 y 15 a 20 cm de profundidad en un Hapludol típico entre el inicio (Inicial) y luego (Final) de 10 años de siembra directa.

Algunos estudios han descripto mayor estabilidad de la estructura bajo sistemas de SD con respecto a sistemas de labranza con remoción (Fuentes et al., 2009). Según los resultados de este estudio la

diferencia descrita entre sistemas de labranza podría atribuirse a una conservación de la estabilidad estructural inducida por la SD frente a procesos de fragmentado promovido por la remoción de los suelos.

RECOMENDACIONES SURGIDAS DE LOS RESULTADOS

En un Hapludol típico representativo de la región semiárida–subhúmeda de la pampa arenosa, los efectos de la conducción de prácticas agrícolas en un sistema continuo en SD durante 10 años fueron independientes del uso inicial del suelo y causaron los siguientes efectos:

- Incremento en los contenidos de MO superficiales (0 a 5 cm de profundidad) y conservación del contenido inicial entre 5 y 20 cm de profundidad.
- Reducción de los valores de pH en agua entre 0 y 20 cm de profundidad.
- Aumento del Pe entre 0 y 10 cm de profundidad y conservación del contenido inicial entre 10 y 20 cm de profundidad.
- Mayores tamaños medios de los fragmentos de suelo y conservación de la estabilidad estructural entre 0 y 10 cm de profundidad.

Los cambios que se observan en la porosidad total evaluada a partir de la medición de la DA dependieron de la condición inicial de uso del suelo y variaron según las profundidades consideradas. Entre 0 y 10 cm de profundidad, e independientemente del uso previo del suelo, 10 años de SD redujeron la DA. En cambio, entre 10 y 30 cm de profundidad, bajo sistema inicial de LSR, 10 años de SD incrementaron la DA. En la misma profundidad, bajo sistema original de PF o LCR, 10 años de SD conservaron la DA inicial.

En las condiciones de este estudio, donde los suelos en su condición original no presentaron niveles de degradación intensiva, los resultados descriptos sugieren que la adopción de prácticas continuas de SD durante 10 años con producciones de maíz y soja en rotación, generan cambios principalmente en la superficie del suelo sin depender de su condición inicial de uso. En situaciones originales con degradación intensiva, especialmente con presencia de capas compactadas, es recomendable el acondicionamiento del suelo con laboreo para eliminar estas impedancias antes de la instalación de sistemas continuos de conservación sin laboreo.

Bibliografía

- Barraco, M; M Díaz-Zorita; C Álvarez & C Scianca. 2009. Estrategia de fertilización fosfatada en una secuencia agrícola bajo labranza cero en la pampa arenosa: I. Evaluación agronómica. En Simposio Fertilidad. Instituto internacional de nutrición de plantas (IPNI). Pp. 139.
- Blake, G & K Hartge. 1986. Bulk density. En Klute, A (Ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2da edn. Pp 363-376. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, Estados Unidos.
- Bray, R & L Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.
- Buschiazzo, D; J Panigatti & F Babinec. 1996. Labranza en la Región Semiárida Argentina. Consideraciones finales. En: Buschiazzo, D; J Panigatti & F Babinec (Eds.). Labranzas en la Región Semiárida Argentina. Pp 147-156. Editorial Hemisferio Sur. Santa Rosa, Argentina.
- Deubel, A; B Hofmann & D Orzessek. 2011. Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. Soil Till. Res. 117:85-92.
- Díaz-Zorita, M; Barraco, M; Álvarez, C. 2004. Efecto de doce años de labranzas sobre un hapludol del noroeste bonaerense. Ciencia del Suelo 22: 11-18.
- Díaz-Zorita, M. 1996. Labranzas en la Región Semiárida y Subhúmeda Bonaerense Noroeste. En: Buschiazzo, D; J Panigatti & F Babinec (Eds.). Labranzas en la Región Semiárida Argentina. Pp 39-48. Editorial Hemisferio Sur. Santa Rosa, Argentina.
- Díaz-Zorita, M; E Perfect & J Grove. 2002a. Disruptive methods for assessing soil structure: A review. Soil Till. Res. 64:3-22.
- Díaz-Zorita, M; G Duarte & J Grove. 2002b. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid pampas of Argentina. Soil Till. Res. 65:1-18.
- Ferreras, L; J Costa; F García & C Pecorari. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampas" of Argentina. Soil Till. Res. 54:31-39.
- Fuentes, M; B Govaerts; F de León; C Hidalgo; L Dendooven; K Sayre & J Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. Eur. J. Agr. 30:228-237.
- Franzluebbers, A. 2003. Conservation tillage and stratification on soil properties: a summary of the special issue in Soil and Tillage Research (2002). ISTRO 16th Conference. Brisbane, Australia. En DC.
- Giuffré, L; O Heredia; N Arrigo; M Conti & J Storti. 1995. Variación espacial y temporal del fósforo extractable en un ciclo de maíz sembrado bajo dos sistemas de labranza: convencional y directa. Agron. Costarricense 19:57-60.
- Lal, R; T Logan & N Fausey. 1990. Long-term tillage effects on Mollic Ochraqualf in north-west Ohio. Soil nutrient profile. Soil Till. Res. 15:371-382.
- Saavedra, C; J Velasco; P Pajuelo; F Perea & A Delgado. 2007. Effects of tillage on phosphorus release potential in a Spanish Vertisol. Soil Sci. Soc. Am. J. 71:56-63.

Sanchez, A & J García. 1998. Efecto del laboreo en algunas propiedades físicas de un Haplustol Típico y en el rendimiento de la soja. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Carlos Paz, Argentina.

Walkley, A & I Black. 1934. An examination of method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37:29–38.

Sistemas de cultivo en el sudeste bonaerense: su aporte al manejo de la fracción orgánica de los suelos

Guillermo A. Studdert

Facultad de Ciencias Agrarias, Un. Nac. Mar del Plata, Unidad Integrada Balcarce.

La agricultura tiene por objetivo satisfacer las necesidades de la humanidad de alimento y fibras, entre otros. Sin embargo, buscando tales objetivos, se han afectado los servicios que los agroecosistemas deben prestar a la sociedad. Uno de los motivos más importantes de que haya sucedido tal cosa ha sido el limitado conocimiento del funcionamiento de los sistemas y de la incidencia de los factores intervinientes, del efecto de las prácticas empleadas sobre los procesos y, por último, cuál es la capacidad de cada sistema de soportar alteraciones que permitan el mantenimiento de su funcionalidad dentro de límites aceptables.

Los cambios en los agroecosistemas provocados por la agricultura, especialmente sobre el suelo, son generalmente lentos. Su identificación y conocimiento requiere del seguimiento durante períodos prolongados de las alteraciones provocados por cambios en el uso de la tierra. La tendencia que se previó iba a ocurrir en el uso de los suelos para la producción en el Sudeste Bonaerense (SEB), hizo que en la Unidad Integrada Balcarce (UIB) se planteara el estudio de los efectos de dicho cambio y de distintas prácticas de manejo (i.e. sistemas de labranza, combinaciones de cultivos, fertilización) sobre las propiedades del suelo y la productividad de los cultivos. Así, varias décadas atrás se plantearon ensayos de larga duración (ELD) con el objetivo de aportar al conocimiento de cómo el uso del suelo afecta los procesos y mecanismos intervinientes a fin de lograr identificar las combinaciones de las prácticas de manejo que permitan su uso sustentable. Los ELD representativos del SEB se llevaron adelante en el campo experimental de la UIB situado en el partido de Balcarce, Provincia de Buenos Aires (Figura 1).

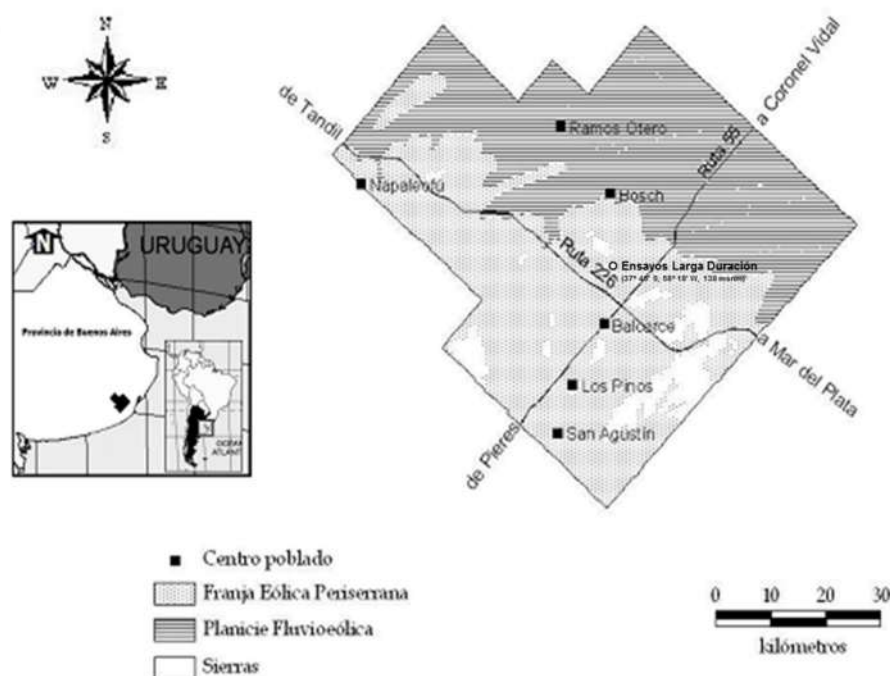


Figura 1. Ambientes geomórficos del Partido de Balcarce (Provincia de Buenos Aires, Argentina) (F. Cabria, com. personal) y localización de los Ensayos de Larga Duración de la Unidad Integrada Balcarce.

i. Descripción Regional

i.1. Caracterización climática

Las características climáticas del partido de Balcarce son representativas del SEB. El clima del partido se clasifica como mesotermal subhúmedo-húmedo (según Thornthwaite) o como templado húmedo sin estación seca (C_{fb} , según Köppen) (A. Irigoyen, com. personal).

La media de precipitación acumulada anual para el período 1971-2015, es de $923,8 \pm 158,7$ mm (máximo 1342,2 mm (año 2002), mínimo 619,6 mm (año 1979)) (Figura 2a). Asimismo, la media de evapotranspiración de referencia (ET_0) para el período 1971-2015, es de $960,3 \pm 76,7$ mm (máximo 1116,4 mm (2015), mínimo 828,5 mm (2001)) (Figura 2a). En la Figura 2b se muestran las medias mensuales de precipitación y ET_0 . Por tanto, hay, en promedio, un leve déficit hídrico anual que puede manifestarse fundamentalmente en los meses de primavera-verano (Figura 2b). No obstante, la diferencia precipitación – ET_0 anuales ha sido marcadamente variable y con una marcada tendencia al déficit en los últimos años (Figura 2a).

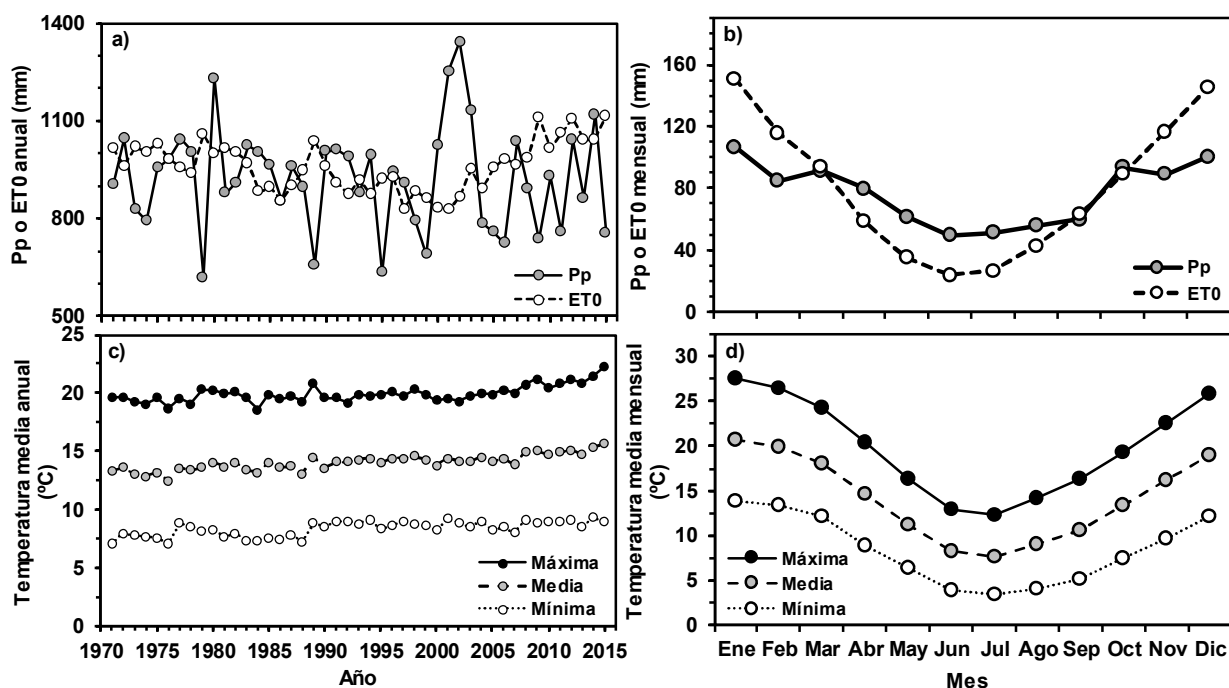


Figura 2. Precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ET0) total anual (a) y promedio mensual (b) y temperatura diaria del aire máxima, media y mínima promedio anual (c) y promedio mensual (d) en el partido de Balcarce en el período 1971-2015. Estación Agrometeorológica, Unidad Integrada Balcarce (37° 45' S, 58° 18' W, 130 msnm).

Analizando la variación intra- e interanual del balance de agua mensual para dos suelos agrícolas de diferente profundidad efectiva del partido de Balcarce, Irigoyen et al. (2004) informaron que entre los meses de mayo y octubre los valores máximos de almacenaje de ambos suelos, igualaron al límite máximo de almacenaje. Por otro lado, para suelos sin limitaciones de profundidad, el límite mínimo de agua útil en el suelo puede alcanzarse sólo durante los meses de verano, mientras que para suelos menos profundos (por presencia de tosa o roca) puede alcanzarse aún en los meses de primavera. Con ello, la probabilidad de déficit de agua o de baja evapotranspiración relativa (evapotranspiración real/ET0) es mayor en estos últimos suelos. Así, es altamente probable que el perfil del suelo se encuentre recargado (i.e. a capacidad máxima de almacenaje) a la fecha de siembra de los cultivos invernales o estivales, independientemente de cuál hubiera sido el manejo previo (Cárcova y Otegui, 1997; Caviglia y Andrade, 2010). Por otro lado, es altamente probable la ocurrencia de déficits hídricos durante los períodos críticos de los cultivos estivales, especialmente en los suelos con limitaciones de profundidad, lo que lleva a la necesidad de riego complementario y de implementación de prácticas que mejoren la conservación del agua en el perfil del suelo.

Las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias presentan valores promedio anuales de 19,7, 14,1, 8,4 °C, respectivamente. En la Figura 2 se muestra la evolución de las tres temperaturas promedio anual (Figura 2c) y los valores promedio mensuales (Figura 2d) a lo largo del período 1971-2015. Entre tales años se ha registrado un incremento sostenido de las temperaturas (0,036, 0,044 y 0,033 °C año⁻¹ para las temperaturas máxima, media y mínima, respectivamente). Por otro lado, el cambio de temperatura es más brusco desde los meses cálidos a los fríos que desde los fríos a los cálidos (Figura 2d). Las amplitudes térmicas diarias oscilan entre 0,9 °C y 28,0 °C con una mediana de 11,5 °C. El valor medio mensual de amplitud térmica más elevado es en el mes de diciembre (13,9 °C) y el más bajo, en el mes de junio (9,1 °C) (San Martino et al., 2002).

Se define como helada agrometeorológica (HA) a la ocurrencia de una temperatura mínima diaria que no supere los 3 °C a 1,5 m de altura en abrigo meteorológico (Monterubbianesi y Cendoya, 2001). Según la información de la Estación Agrometeorológica de la UIB (37° 45' S, 58° 18' W, 130 m sobre el nivel del mar (msnm), en Balcarce hay 73 días con HA, estando la mayor parte de ellos entre los meses de mayo y septiembre. Las fechas medias de primera y última HA son 21 de abril y 17 de noviembre, respectivamente, y las extremas son 25 de febrero y 22 de diciembre, respectivamente. Monterubbianesi y Cendoya (2001) informaron que en el período 1971-2000 hubo una tendencia significativa de acortamiento del período con heladas. Así, el período libre de HA durante la última década estudiada fue de 190 días, lo que significó 1,4 veces la duración promedio de las dos décadas anteriores. Esto coincide con la tendencia creciente de las temperaturas mostrada en la Figura 2c. Las características generales del régimen de heladas del SEB indican a las heladas estivales e invernales como de baja peligrosidad, pero de moderada o alta peligrosidad a las primaverales y otoñales. Esto se debe a que, si bien las heladas tempranas y tardías suelen ser de baja intensidad, se producen en momentos de mayor susceptibilidad de los cultivos (Irigoyen, 1993).

i.2. Caracterización geomorfológico-edáfica

En el Partido de Balcarce se reconocen tres ambientes geomórficos principales: Sierras (Sistema de Tandilia), Franja Eólica Periserrana (FEP) y Planicie Fluvioeólica (Figura 1). Las Sierras se presentan aisladas entre si y separadas por amplios valles que han sido cubiertos por depósitos eólicos del período Cuaternario (Pleistoceno tardío-Holoceno), esencialmente limosos (loess) (Durán et al., 2011) que forman un paisaje de colinas (FEP). Hacia el norte, este relieve de colinas pasa

transicionalmente a una llanura de muy bajo gradiente (Planicie Fluvioeólica). La altitud máxima de las Sierras es de 383 msnm, mientras que en la Planicie Fluvioeólica se registra la menor altura del partido (35 msnm) (CGCC, 2004; F. Cabria, com. personal).

La mayoría de los suelos de aptitud agrícola del Partido de Balcarce se encuentran en la FEP (Figura 1) y evolucionaron bajo vegetación de pradera, constituida mayormente por gramíneas. La FEP muestra ondulaciones (lomas) de morfología compleja que se adosan a los frentes serranos u ocupan los amplios valles interserranos. Estas lomas pueden alcanzar alturas relativas de hasta 60 m y diversas formas (p.e. elongadas o parabólicas). Los suelos en la FEP pueden separarse, por un lado, en asociaciones de suelos constituidas por Argiudoles Líticos, Petrocálcicos y Típicos (Soil Survey Staff, 2014) en las cercanías de las Sierras o en las lomas controladas por una estructura rocosa subyacente. Sus limitaciones más importantes para la producción, son la susceptibilidad a la erosión hídrica debido a las pendientes pronunciadas, y la profundidad efectiva. Por otro lado, al oeste de las Sierras o en complejos de colinas con pendientes pronunciadas que se adosan a los frentes serranos y cuya altitud y extensión decrece al alejarse de las áreas más elevadas, los suelos dominantes son Argiudoles Petrocálcicos y Típicos (Soil Survey Staff, 2014). Las características intrínsecas de estos suelos no suelen afectar a la producción de cultivos, pero el riesgo de ocasionar daños a los cultivos o al recurso suelo se asocian a la susceptibilidad a los procesos erosivos debido a la elevada pendiente del terreno (CGCC, 2004; F. Cabria, com. personal).

Los dos suelos más frecuentes bajo producción agrícola en el SEB y particularmente en el Partido de Balcarce son Argiudoles Típicos y Argiudoles Petrocálcicos (Soil Survey Staff, 2014), los que generalmente se presentan formando complejos. De todas las series descriptas en el SEB de ambos suelos, las dos más frecuentes en el Partido de Balcarce son la Serie Mar del Plata (Argiudol Típico limoso fino, mixto, térmico) y la Serie Balcarce (Argiudol Petrocálcico limoso fino, mixto, térmico) (INTA, 1979). Los ELD de la UIB se desarrollaron sobre un complejo de estas dos series, con una participación mayoritaria de la Serie Mar del Plata (aproximadamente 80 a 85%). En la Tabla 1 se presentan algunas características de ambas series.

Tabla 1. Descripción de los perfiles modales perfiles modales de las Series Mar del Plata (Argiudol Típico fino, mixto, térmico (Soil Survey Staff, 2014)) y Balcarce (Argiudol Petrocálcico fino, illítico, térmico (Soil Survey Staff, 2014)). Adaptado de INTA (1979).

Variable edáfica	Horizontes Serie Mar del Plata						Horizontes Serie Balcarce				
	A	BA	B _{t1}	B _{t2}	BC	C	A	BA	B _{t1}	B _{t2}	2C _{km}
Espesor (cm)	29	10	19	18	34	40	23	8	23	16	-
Carbono total (g kg ⁻¹)	35,6	17,4	13,6	5,8	2,9	0,4	41,1	26,4	12,0	6,4	-
Nitrógeno total (g kg ⁻¹)	3,0	1,5	1,2	0,7	-	-	3,6	2,4	1,1	0,7	-
Arcilla (g kg ⁻¹)	228	236	333	314	196	137	257	278	313	293	-
Limo (g kg ⁻¹)	347	363	292	344	313	334	315	273	283	350	-
Arena (g kg ⁻¹)*	425	401	375	342	491	526	428	449	404	357	-
pH en agua 1:2.5	6,0	6,3	6,7	7,0	7,2	7,6	7,0	7,4	7,4	7,8	-
Suma de bases (cmol kg ⁻¹)	17,0	19,8	25,6	24,8	18,1	15,6	22,2	21,9	24,4	23,8	-
CIC (cmol kg ⁻¹)**	23,1	22,9	30,3	27,1	18,2	15,1	29,4	25,1	29,2	24,4	-
Saturación de bases (%)	74	87	85	91	99	100	76	88	84	97	-

* mayormente (~97-98%) arena fina (100 a 250 µm).

** CIC: capacidad de intercambio catiónico.

Los suelos del SEB y, particularmente, los de la FEP son de alta fertilidad y productividad (Durán et al., 2011), aunque naturalmente deficitarios en fósforo (P), si bien en los últimos años se ha incrementado su disponibilidad debido a la fertilización sostenida (García et al., 2014). Asimismo, su alto contenido de materia orgánica (MO) original y su textura generalmente franca en superficie los hace resistentes a varios procesos de degradación. Por ello, estos suelos son muy aptos para la producción de granos y otros cultivos, con rendimientos muy aceptables aún sin aporte adicional de nutrientes (excepto P) y, dadas las condiciones climáticas, sin o escasa necesidad de riego complementario. No obstante, el relieve de la FEP y, muchas veces, la proximidad a la Sierra hace que los suelos presenten alta susceptibilidad a la erosión (Castorina, 2014). Es menester aclarar que los ELD de la UIB se ubicaron en una posición del paisaje con escaso gradiente de pendiente (< 2%), motivo por el cual se asume que la exposición a la erosión es mínima.

i.3. Cambio en el uso del suelo

Las muy favorables características agroecológicas del SEB hicieron que la región se transformara en una de las más importantes de la Argentina en lo que respecta a producción agropecuaria (Hall et al., 1991; Duran et al., 2011). A pesar de que sus condiciones edafoclimáticas permiten una amplia diversidad de situaciones productivas y combinaciones de prácticas de manejo y agricultura de alta producción, el manejo tradicional se realizaba con combinación de actividades agrícolas con la producción extensiva de ganado vacuno para carne (Hall et al., 1991). Esto obligaba a que se alternaran ciclos bajo cultivos agrícolas con ciclos bajo pasturas cultivadas o, eventualmente, prados naturales, y la implantación de verdeos dentro de una rotación, y a la utilización de los residuos de cosecha como recurso forrajero. De esta forma, se contribuía al mantenimiento de alta fertilidad y productividad de los suelos (Hall et al., 1991; Studdert et al., 1997). Sin embargo, la mayor rentabilidad de la agricultura frente a la ganadería durante las últimas décadas del siglo XX, hizo que los productores se volcaran hacia un mayor uso agrícola del suelo desplazando a la ganadería hacia otras zonas (Rearte, 1996). Este cambio en el uso del suelo (llamado “agriculturización”) es coincidente con la mayor parte de la Región Pampeana Argentina (Manuel-Navarrete et al., 2009) y consistió en la instauración de agricultura permanente, o bien, en el incremento de la duración del periodo agrícola en los sistemas que se mantenían mixtos.

No obstante, la transformación de sistemas productivos mixtos en sistemas netamente agrícolas con alta predominancia de cultivo de soja (*Glycine max* (L) Merr), está conduciendo a un deterioro sostenido de las propiedades del suelo (Manuel-Navarrete et al., 2009). Entre ellas, se destacan la caída en el contenido de MO (Sainz Rozas et al., 2011), el deterioro de propiedades físicas (Aparicio y Costa, 2007), la reducción de la oferta de nutrientes (i.e. nitrógeno (N) y azufre (S)) y el incremento en la incidencia de la erosión hídrica (Castorina, 2014; Casas y Albarracín, 2015). Además, en las últimas décadas se ha generalizado el uso de riego complementario para la mayoría de los cultivos, aunque el acuífero utilizado provee agua con elevados contenidos de bicarbonato de sodio. Esto está provocando un deterioro adicional de las propiedades del suelo por incremento de la concentración del ion sodio en el complejo de intercambio iónico del suelo (Costa y Aparicio, 2015). En contraste, los cambios en el uso de los suelos mencionados, han sido acompañados por el cambio del sistema de labranza pasando de operaciones de laboreo altamente agresivos (Darwich, 1991) a uso generalizado de siembra directa (SD) para la mayoría de los cultivos de cosecha de granos (AAPRESID, 2016).

ii. Problema a estudiar al momento de instalar los ELD

En la década de 1970, se vislumbraba que el cambio que se venía dando en una gran parte de la Región Pampeana Argentina, pasando de los sistemas mixtos (uso agrícola y ganadero combinado y/o alternado) tradicionales, a sistemas predominantemente agrícolas, iba producirse también en el SEB (Costamagna et al., 2006). Además, estos cambios que se estaban verificando en el sistema productivo iban acompañados por una creciente agresividad de los sistemas de labranza, lo que llevaba a presuponer el agravamiento de algunos procesos degradativos del suelo, en particular, y del agroecosistema, en general (Darwich, 1991). Se planteó así la preocupación en los ámbitos académicos y tecnológicos acerca de los efectos que generarían sistemas de producción basados en la agricultura más prolongada sobre las propiedades del suelo en sus aspectos físicos, químicos y biológicos y en su funcionamiento, y, consecuentemente, sobre su productividad (Costamagna et al., 2006).

No había evidencias claras y concretas sobre cuántos y cuáles atributos del recurso suelo podían ser afectados por los cambios en el manejo, ni en qué proporción ni cómo los suelos del SEB podrían soportar tales efectos. Tampoco se conocía si, a través del manejo, se podía lograr que el suelo restaurara sus propiedades afectadas sin resignar su uso para la producción. Surgió entonces la necesidad de cuantificar el efecto que distintas combinaciones de cultivos y sistemas de labranza podrían ejercer sobre las propiedades físico-químico-biológicas de los suelos y sobre el rendimiento de los cultivos de la región. Se necesitaba información experimental que contribuyera a tomar decisiones en cuanto a la duración del ciclo agrícola que menos afectara las propiedades del suelo y, por consiguiente, los rendimientos de los cultivos, como así también la duración de los períodos de pastura que permitieran restituir las variables afectadas. Asimismo, los cambios en las combinaciones de cultivos y de sistemas de labranza se reflejan también, por lo general, en la necesidad de utilización de insumos (p.e. fertilizantes, herbicidas, pesticidas). Por lo tanto, también era necesario evaluar las combinaciones de prácticas sobre la dinámica de nutrientes y otros aspectos que hacen a la producción. Generar esa información contribuiría a optimizar el uso de recursos e insumos y, por lo tanto, a lograr sistemas sustentables. Tal información daría también elementos para la toma de decisiones económico-financieras de la empresa agropecuaria buscando, a la luz de los resultados operativos de cada actividad, priorizar la más rentable sin resignar la condición del suelo.

La factibilidad del logro de la sustentabilidad de la producción agropecuaria depende, en gran medida, del conocimiento de cómo las prácticas de manejo empleadas afectan al recurso suelo según sus características intrínsecas y las del paisaje en el que está inserto (Studdert, 2006). A través de la combinación de prácticas de manejo se busca regular, inhibir, potenciar u orientar algunos de los procesos que ocurren dentro y fuera del suelo que determinan su condición y se traducen en una respuesta de producción (Power, 1994). El conocimiento de las relaciones entre los componentes del sistema y de los procesos involucrados en su funcionamiento y en la determinación de sus capacidades y limitaciones, así como de qué manera son alterados por el uso, es requisito para el logro de una agricultura sustentable. Pasar de una agricultura tradicional, basada casi exclusivamente en insumos, hacia una agricultura sustentable, supone el cambio hacia una tecnología de procesos basada en el manejo de las interacciones entre los componentes del sistema (Luna y House, 1990) que permita utilizar los servicios del agroecosistema y hacer un uso más racional y seguro de los insumos necesarios. Una de las formas de generar los conocimientos que permitan interpretar y, eventualmente, manejar tales relaciones, es a través de ELD. Este tipo de ensayos buscan, por lo general, dar respuesta a una pregunta fundamental: ¿es posible sostener en el tiempo la productividad que se tiene al convertir un sistema natural en un sistema de producción? (Mitchell et al., 1991).

iii. Tratamientos estudiados

Se han desarrollado cuatro ELD en el campo experimental de la UIB (Figura 3) con objetivos coincidentes:

- ✓ Evaluar la dinámica de parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo bajo combinaciones de cultivos (rotaciones mixtas, agricultura continua, uso de cultivos puente verde (CPV)) y sistemas de labranza contrastantes y fertilización nitrogenada.
- ✓ Determinar el efecto de sistemas de cultivo contrastantes sobre el comportamiento de cultivos importantes del área de influencia de la UIB.
- ✓ Identificar combinaciones de prácticas de manejo (labranza, combinación de cultivos, fertilización) conducentes a asegurar la "sustentabilidad" del sistema de producción.

iii.1. Ensayo de Rotaciones Mixtas

Este ensayo (Figura 3) se inició en 1976 con un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y tres repeticiones. Entre 1976 y 1993, a las parcelas principales se asignaron distintas combinaciones de periodos bajo cultivos de cosecha (100%, ~75% y ~50% del tiempo) bajo labranza convencional (LC) (arado de rejas, rastra de discos, rastras de dientes o vibrocultivador) y periodos bajo pastura de distinta duración (de 2,5 a 5,0 años) con base de gramíneas consociadas con leguminosas. Durante los períodos agrícolas los cultivos involucrados fueron: trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.), y avena (*Avena sativa* L.) y vicia (*Vicia sativa* L) como abonos verdes. En 1980, se generaron las sub-parcelas en cada parcela principal y a ellas se asignó la fertilización nitrogenada de los cultivos de cosecha (excepto los abonos verdes): Con N (dosis variables según cultivo y año hasta 1987 en que la dosis se fijó en 120 kg N ha⁻¹ para todos los cultivos) y Sin N. Más información sobre las características de este ensayo desde 1976 hasta 1993 se encuentra indicada en Studdert et al. (1997).



Figura 3. Ubicación de los Ensayos de Larga Duración de la Unidad Integrada Balcarce.

A partir de 1994 se modificó el esquema del ensayo y se introdujo la variable sistema de labranza transformando “Ensayo de Rotaciones Mixtas” en “Ensayo de Rotaciones Mixtas y Labranzas” (Figura 3) que aún está vigente. Los niveles del factor de tratamiento asignado a las parcelas principales (combinación de cultivos y labranza) resultantes son: a) pastura permanente, b) agricultura permanente, uno bajo LC y otro bajo SD; c) 50% del tiempo (tres años) agricultura y 50% del tiempo (tres años) pastura, uno bajo LC y otro bajo SD; d) 75% del tiempo (nueve años) agricultura y 25% del tiempo (tres años) pastura, uno bajo LC y otro bajo SD. A las sub-parcelas se asignaron cuatro dosis de fertilizante nitrogenado (0, 60, 120, y 180 kg N ha⁻¹) en los cultivos agrícolas. La secuencia de cultivos durante los períodos bajo agricultura es maíz-soja-trigo.

En el otoño de la mayoría de los años entre 1980 y 1993 y cada año desde 1994 se han tomado muestras de suelo de la capa arable (0-20 cm (1980-1993) y 0-5 y 5-20 cm (1994 en adelante) de profundidad) para distintas determinaciones (MO, contenido de N orgánico, fracciones lábiles de la MO, y otras). Se han realizado, además, determinaciones de densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, estabilidad de agregados, e infiltración de la capa arable. Se ha determinado el rendimiento de los cultivos, su respuesta a la fertilización nitrogenada y su acumulación de materia seca aérea.

iii.2. Ensayo de Agricultura Continua

Este ensayo se desarrolló entre 1984 y 1996 con un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y cuatro repeticiones. A las parcelas principales se asignaron dieciséis secuencias de cultivos con trigo, soja, maíz y girasol bajo LC. Las secuencias de cultivos evaluadas en este ensayo fueron: girasol-girasol-trigo (GGT), girasol-maíz-trigo (GMT), girasol-soja-trigo (GST), girasol-trigo-trigo (GTT), maíz- girasol- trigo (MGT), maíz-maíz-trigo (MMT), maíz-soja-trigo (MST), maíz-trigo-trigo (MTT), soja-girasol-trigo (SGT), soja-maíz-trigo (SMT), soja-soja-trigo (SST), soja-trigo-trigo (STT), trigo-girasol-trigo (TGT), trigo-maíz-trigo (TMT), trigo-soja-trigo (TST) y trigo-trigo-trigo (TTT). Estas secuencias se repitieron cuatro veces durante los doce años que duró el ensayo. A las sub-parcelas se asignó la fertilización nitrogenada: Con N y Sin N. La fertilización nitrogenada fue realizada sólo en los cultivos de maíz y trigo con 60 kg N ha⁻¹ al inicio del ensayo y 120 kg N ha⁻¹, los últimos años.

En la mayoría de los años que duró el ensayo se tomaron muestras de suelo (0-20 cm) entre otoño e invierno para determinación de MO y, en algunos años, para estabilidad de agregados. Se ha determinado el rendimiento de los cultivos, su respuesta a la fertilización nitrogenada y su acumulación de materia seca aérea. Más detalles sobre este ensayo se encuentran indicados en Studdert y Echeverría (2000).

iii.3. Ensayo de Sistemas de Labranza

Este ensayo (Figura 3) se inició el año 1997 y continúa hasta la actualidad con un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas y tres repeticiones. La secuencia de cultivos establecida es maíz-girasol-trigo y cada fase de la secuencia está presente cada año. A las parcelas principales se asignaron diferentes sistemas de labranza: a) SD, b) LC, c) bajo cubierta con herramientas de disco (una o dos pasadas de rastra de disco liviana), d) bajo cubierta con herramientas de laboreo vertical (arado de cincel y cultivador de campo), y d) combinada (SD para girasol y maíz y LC para trigo). A las sub-parcelas se asignó la fertilización nitrogenada de los tres cultivos: Con N (120, 90 y 120 kg N ha⁻¹ para trigo, girasol y maíz, respectivamente) y Sin N. Desde 2008, se introdujo un factor de tratamiento adicional: Con cultivo puente verde leguminoso (CPV, *Vicia villosa* Roth.) entre los cultivos de trigo y maíz, y Sin CPV. Así el diseño experimental se transformó en diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas sub-divididas.

En el otoño de cada año desde 1997 se han tomado muestras de suelo de la capa arable (0-5 y 5-20 cm de profundidad) para distintas determinaciones (MO, contenido de N orgánico, fracciones lábiles de la MO, y otras). Se han realizado, además, determinaciones de densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, estabilidad de agregados, e infiltración de la capa arable. Se ha determinado el rendimiento de los cultivos, su respuesta a la fertilización nitrogenada y su acumulación de materia seca aérea. Más detalles sobre este ensayo se encuentran descriptos en Diovisalvi et al. (2008), Domínguez et al. (2009), García (2015) y García et al. (2016).

iii.4. Ensayo de Secuencias Agrícolas y Sistemas de Labranza

Este ensayo (Figura 3) se desarrolló entre 2005 y 2015 sobre un suelo “descansado” (saliendo de una pastura de más de cinco años, constituida por gramíneas de metabolismo C3), con un diseño en

bloques completos aleatorizados con arreglo de tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones. La particularidad de este ensayo es que cada fase de las secuencias se encuentra representada cada año, pero distribuidas en el tiempo ya que cada fase está presente en uno de los bloques que además están repetidos. A las parcelas principales se asignó el factor de tratamiento sistema de labranza: SD, LC. A las sub-parcelas se asignó el factor de tratamiento secuencia de cultivos: a) maíz-maíz-trigo (dos cultivos de metabolismo C4 cada tres años), b) soja-soja-trigo (todos los cultivos C3), c) maíz-soja-trigo (un cultivo metabolismo C4 cada tres años). Los cultivos de trigo y maíz fueron fertilizados con N (120 kg N ha^{-1}).

En el otoño de cada año desde 1997 se han tomado muestras de suelo de la capa arable (0-5 y 5-20 cm de profundidad) para distintas determinaciones (MO, contenido de N orgánico, fracciones lábiles de la MO, y otras). Se han realizado, además, determinaciones de densidad aparente, resistencia mecánica a la penetración, estabilidad de agregados, e infiltración de la capa arable. Se ha determinado el rendimiento de los cultivos, su respuesta a la fertilización nitrogenada y su acumulación de materia seca aérea. Más detalles sobre este ensayo se encuentran descriptos en García (2015) y García et al. (2016).

iv. Interpretación y recomendación en base a los resultados

iv.1. Variaciones de la MO y sus fracciones lábiles

La dinámica de la MO se ha venido estudiando en el SEB desde hace muchos años a partir de la información generada en los ELD. Studdert et al. (1997) mostraron que los años de agricultura con LC luego de una pastura producía una disminución del C orgánico total del suelo (COT) (Figura 3). Posteriormente se demostró que las tasas de esa disminución (Studdert & Echeverría, 2000, ELD de "Agricultura Continua") son dependientes de la secuencia de cultivos utilizada en el período agrícola, lo que se relaciona directamente con la cantidad de C de residuos devuelta al suelo (Studdert & Echeverría, 2000; Domínguez & Studdert, 2006) (Figura 4). A partir de esta información se pudieron estimar balances de C para distintos cultivos bajo LC que permitirían lograr aproximaciones de su efecto sobre los cambios en la MO (Domínguez & Studdert, 2006) y herramientas para la recomendación de combinación de cultivos bajo ese sistema de labranza (Figura 5). De acuerdo con consultas realizadas a varios referentes calificados, el adecuado funcionamiento de molisoles del SEB se lograría con un contenido de MO de 5,7% ($\sim 33,1 \text{ g COT kg}^{-1}$). En la Figura 5 se puede ver que, con

cultivos como trigo o maíz, los rendimientos necesarios para mantener dicho nivel de COT, son bajos. No obstante, con cultivos como soja o girasol, los rendimientos necesarios para aportar la cantidad de C que garantice el mantenimiento de 5,7% de MO, son altos. Así, a partir de información de los cultivos (rendimiento en grano, índice de cosecha, relación biomasa de raíces:biomasa aérea) se podrían realizar balances de C probando el efecto de distintas combinaciones de cultivos y rendimientos sobre el contenido de COT en la capa arable a partir del aporte anual promedio de los cultivos en la secuencia (Domínguez & Studdert, 2006).

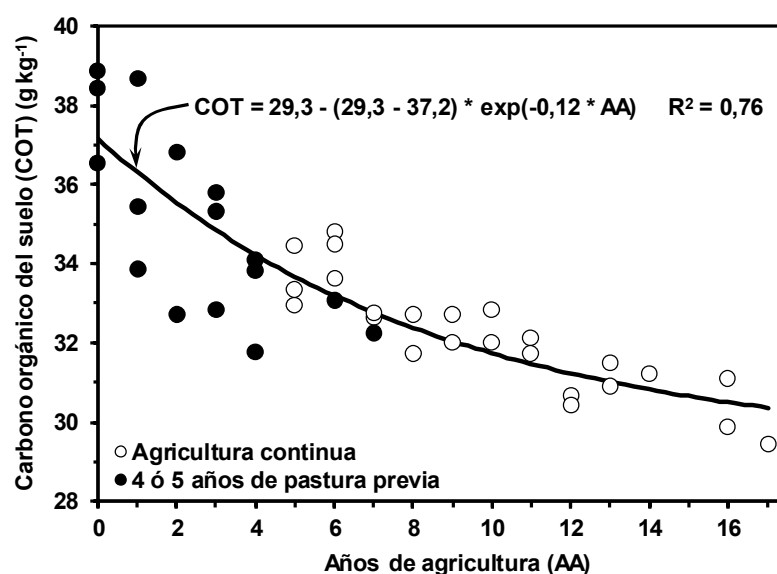


Figura 3. Disminución del contenido de carbono orgánico del suelo en la capa arable (0-20 cm) durante el período agrícola luego de una pastura (Adaptado de Studdert et al., 1997).

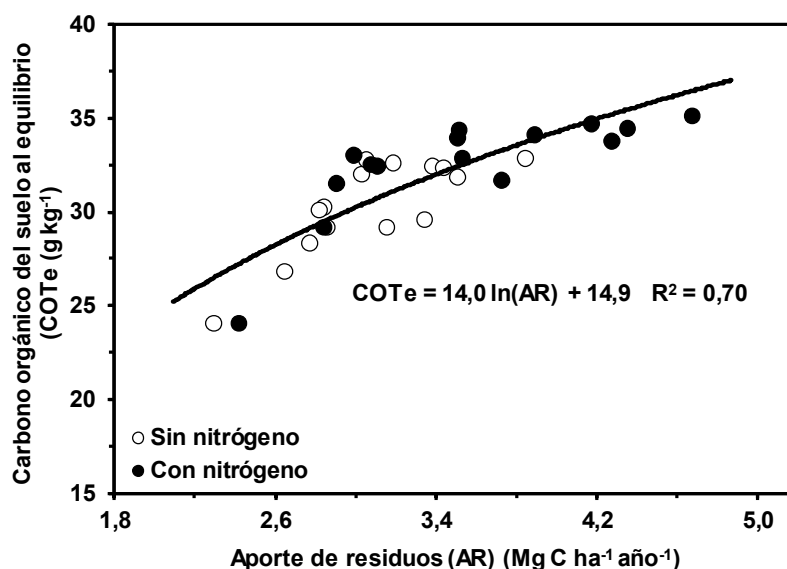


Figura 4. Contenido de carbono orgánico del suelo en la capa arable (0-20 cm) al equilibrio en función del carbono aportado por los cultivos bajo labranza convencional (Adaptado de Studdert & Echeverría, 2000; Domínguez & Studdert, 2006).

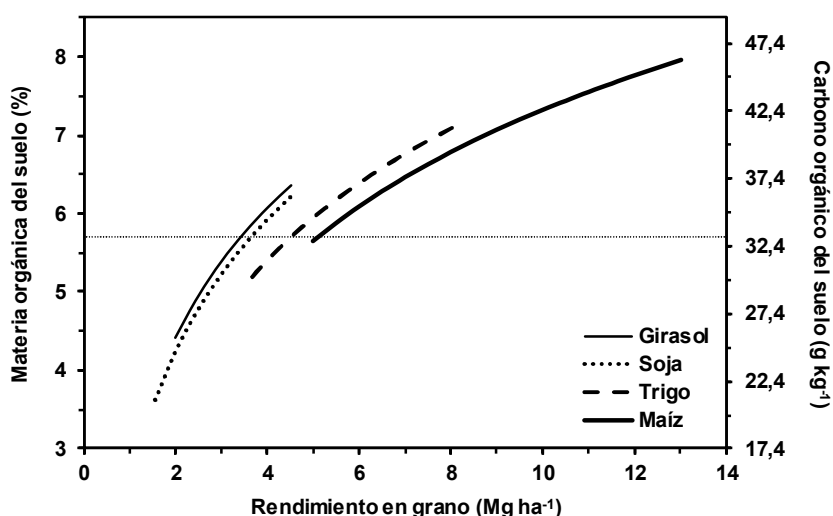


Figura 5. Nivel de materia orgánica y carbono orgánico del suelo en la capa arable (0-20 cm) que se puede mantener en función del rendimiento en grano a humedad de recibo de distintos cultivos bajo labranza convencional (Adaptado de Studdert & Echeverría, 2000; Domínguez & Studdert, 2006). La línea punteada horizontal indica un contenido de materia orgánica de 5,7% (33,1 g kg⁻¹ de carbono orgánico del suelo).

La inclusión de pasturas en la rotación y el uso agrícola-ganadero de los suelos es una práctica que puede ser recomendada como forma de recomponer el estado del suelo y compatibilizar la producción con la calidad ambiental relacionada (Lemaire et al., 2014). De hecho, como ya fuera mencionado, era el manejo tradicional del SEB, lo que hacía que se mantuvieran la buena salud de

los suelos de la región. La ausencia de disturbio, el constante aporte de material a lo largo del año y la acción física directa de los sistemas radicales generalmente densos de las pasturas, generan condiciones adecuadas para la acumulación de C en el suelo. A partir del ELD de “Rotaciones Mixtas”, Studdert et al. (1997) demostraron que la inclusión de una pastura de tres años con predominancia de gramíneas luego de un período agrícola de siete años bajo LC, permitía recomponer los niveles de COT de los que se había partido (Figura 6). Esto es una aproximación a responder uno de los interrogantes que se plantearon al iniciar los ELD de Balcarce. Además, refleja el tipo de rotación que hacían los productores antes del advenimiento de la “agriculturización” (seis o siete años de agricultura bajo LC y tres o cuatro años bajo pasturas con base de gramíneas).

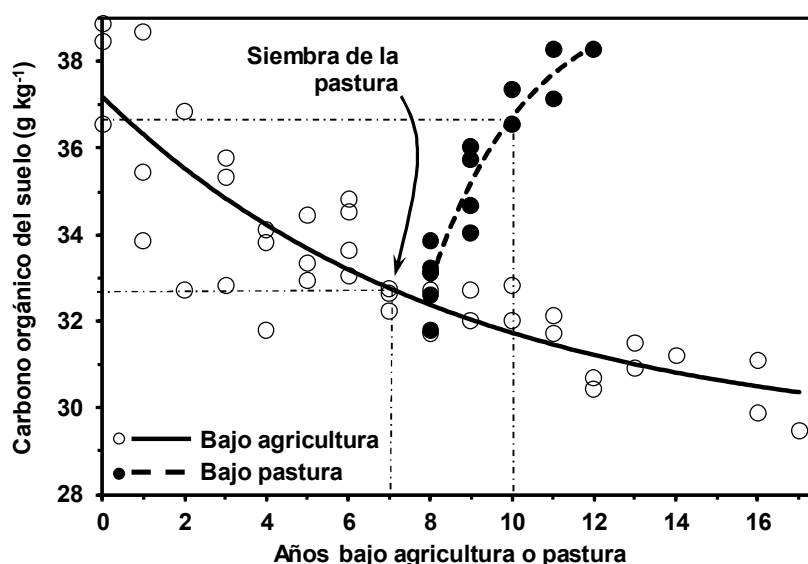


Figura 6. Variación del carbono orgánico en la capa arable del suelo en rotaciones mixtas (adaptado de Studdert et al., 1997).

No obstante, si se asumiera que el nivel umbral de COT para poder lograr esa recomposición con una pastura de tres años (Studdert et al., 1997), fuera el que surge de resolver la ecuación de la Figura 3 para siete años de agricultura, períodos agrícolas de esa duración, ¿siempre llevarían a dicho umbral? A partir de la información generada en el ELD de “Agricultura Continua” (Studdert & Echeverría, 2000) se pudo calcular cuál sería el nivel de MO a los siete años de agricultura con todas las secuencias estudiadas (Figura 7). Se pone de manifiesto que, según cuál hubiera sido la secuencia y según si se hubiera aplicado fertilizante nitrogenado o no, a los siete años de agricultura, algunas

situaciones se hallaban por encima del nivel umbral y otras por debajo. Esto indica que, desde el punto de vista de la dinámica del COT, secuencias con un mayor aporte de C (i.e. con mayor frecuencia de trigo y/o maíz y fertilización) permitirían prolongar los períodos agrícolas algo más de los siete años, mientras que con secuencias con menor aporte (i.e. con mayor frecuencia de girasol y/o soja), el período agrícola debería acortarse. Además, Studdert y Echeverría (2000) mostraron que, bajo LC y a un mismo aporte promedio de C, las secuencias con mayor frecuencia de cultivos de verano provocaban mayores disminuciones de la MO. Esto se atribuyó a la más elevada frecuencia de laboreos en momentos de temperatura más elevada y, por lo tanto, provocando incrementos en la tasa de descomposición de los residuos y de mineralización de la MO. Así, la combinación de cultivos y la oportunidad de laboreo que tendieran a reducir la disminución del COT permitirían períodos con cultivos de cosecha más prolongados. Por otro lado, la reducción de la intensidad del laboreo también podría ser una alternativa conducente a prolongar los ciclos bajo agricultura con menor afectación del COT.

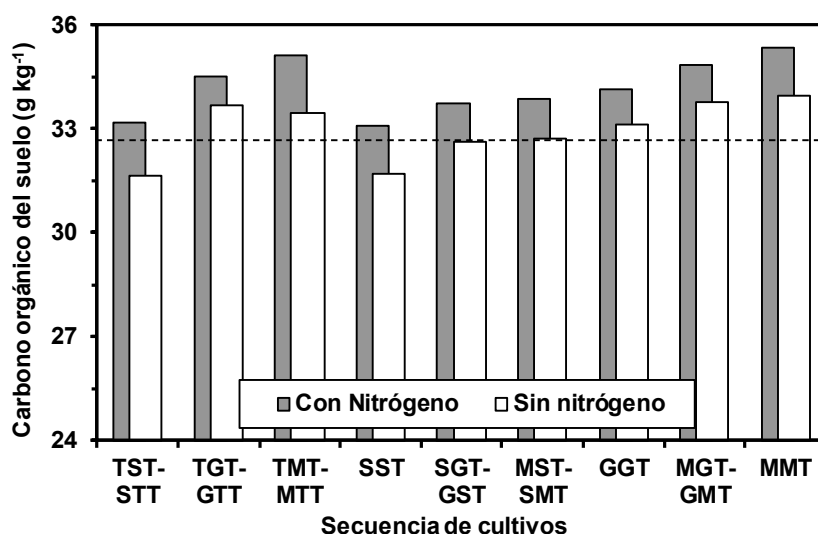


Figura 7. Estimación del contenido de carbono orgánico en la capa arable de molisoles de Balcarce a los 7 años de agricultura bajo labranza convencional para distintas secuencias de cultivos (calculado a partir de Studdert & Echeverría, 2000). La línea punteada indica el nivel a partir del cual una pastura corta permite recuperar el nivel de carbono orgánico al inicio del período agrícola (calculado a partir de Studdert et al., 1997). S: soja; M: maíz; G: girasol; T: trigo.

Uno de los beneficios que se atribuyen a la labranza conservacionista (i.e. intensidad de laboreo reducida hasta el extremo de la SD) es la de reducir las tasas de mineralización de la MO por menor exposición de las fracciones protegidas. Con ello se podría lograr un incremento de la MO en el suelo

(Reicosky et al., 2011). Sin embargo, la generalización del concepto de la capacidad de la SD para ello, puede resultar algo exagerada si no se la contextualiza adecuadamente (Powlson et al., 2014) (i.e. relacionándola con las condiciones edafo-climáticas y con las combinaciones de cultivos implementadas). En varios trabajos surgidos de los ELD de la UIB se ha visto que no hay grandes diferencias entre LC y SD en los contenidos de COT en la capa arable, como así tampoco en su cambio en el tiempo partiendo de situaciones no degradadas (Eiza et al., 2005; Diovisalvi et al., 2008; Domínguez et al., 2009; Cozzoli et al., 2010; García, 2015; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017) (Figura 8b). Así, se ha demostrado que, en el SEB, los cambios del contenido de COT son más dependientes de la cantidad (Domínguez et al., 2009, ELD de “Sistemas de Labranzas”) y la calidad (Studdert et al., 2017, ELD de “Secuencias Agrícolas y Sistemas de Labranza”) de los residuos devueltos al suelo que del sistema de labranza empleado.

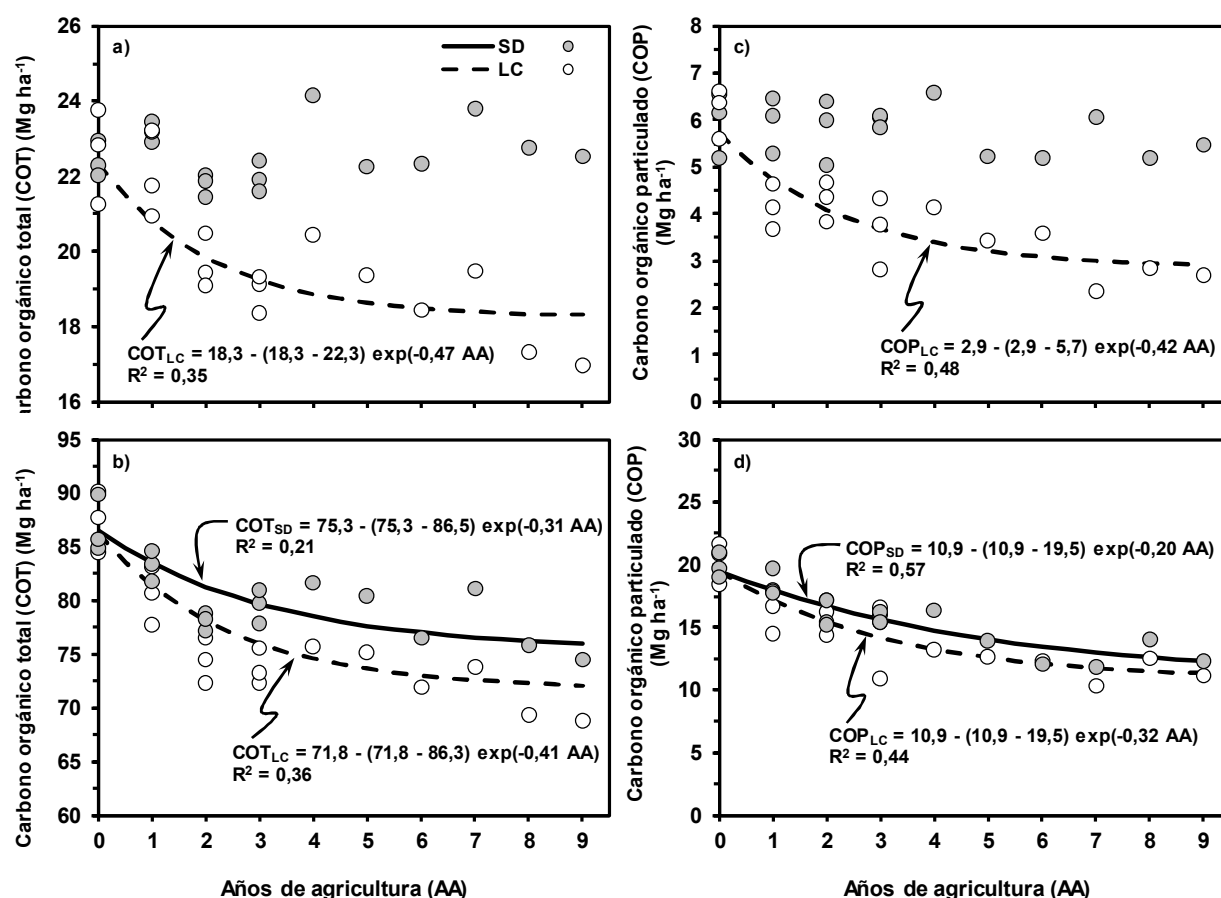


Figura 8. Cambios en el stock de carbono orgánico total (a, b) y particulado (c, d) en la capa superficial (0-5 cm) (a, c) y en la capa arable (0-20 cm) (b, d) de un molisol de Balcarce con los años bajo agricultura con dos sistemas de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) (adaptado de Studdert et al., 2010).

Sin embargo, coincidiendo con la bibliografía nacional e internacional, bajo SD se verificó una estratificación del contenido de COT con mayores valores en los primeros 5 cm de perfil (Eiza et al., 2005; Diovisalvi et al., 2008; Domínguez et al., 2009; Cozzoli et al., 2010; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017) (Figura 8a) debido a la presencia de los rastros de los cultivos en superficie y a la falta de mezclado de los residuos mediante la labranza (Puget & Lal, 2005; Powlson et al., 2014). Si bien se ha comprobado que esta estratificación incide en gran medida sobre la magnitud de la masa total de C orgánico en la capa arable de los suelos del SEB, el mayor contenido de MO en superficie es importante para mantener la funcionalidad del suelo en algunos aspectos sumamente importantes (i.e. estabilidad de la porosidad superficial, resistencia a la erosión) (Powlson et al., 2014). No obstante, los cambios en COT asociados a la agricultura bajo SD observados en la capa arable, han llevado a concluir que bajo este sistema de labranza también es necesario incluir pasturas en la rotación de cultivos para lograr fluctuaciones que no afecten el funcionamiento del suelo (Studdert et al., 2010). Considerando que hay evidencias de que las tasas de disminución del COT con los años de agricultura son algo menores bajo SD que bajo LC (Studdert et al., 2010, ELD de "Rotaciones Mixtas"), resta definir qué duraciones de los períodos agrícola y bajo pastura, serían aconsejables para preservar el adecuado funcionamiento del suelo, en función de la secuencia de cultivos y el sistema de labranza empleados en la etapa bajo cultivos agrícolas. Agostini et al. (2014) demostraron que tanto bajo LC cuanto bajo SD, el incremento de la frecuencia de pasturas en la rotación significaba aumentos en el índice de intensificación de la secuencia (IIs) y con ello mejoras en la MO y en varias propiedades físicas del suelo.

En suelos con baja o nula exposición a la erosión, las variaciones de la MO del suelo son fundamentalmente debidas a los cambios en el contenido de sus fracciones más activas (i.e. fracciones lábiles). Así, a partir de información proveniente de distintos suelos de la Región Pampeana (incluyendo resultados de los ELD de la UIB), se ha demostrado que las variaciones de una fracción lábil como la MO particulada (MOP) pueden ser estimadas a partir de las variaciones de MO (Diovisalvi et al., 2014). Esto es así porque la fracción orgánica más transformada y ligada a la fracción mineral, se muestra más estable y resistente a los cambios provocados por el uso agrícola (Eiza et al., 2005; Domínguez et al., 2009; Diovisalvi et al., 2014; Studdert et al., 2017). Asimismo, en el SEB se ha demostrado que, al igual que para el COT, las variaciones del C en la MOP (COP) (Figura 8c y d) están más asociadas con la cantidad (Domínguez et al., 2009) y la calidad (Studdert et al., 2017) de los residuos devueltos al suelo por los cultivos, que con los sistemas de labranza empleados.

No obstante, en los molisoles del SEB con texturas francas y elevados contenidos originales de MO, los cambios asociados con la agricultura en los contenidos de las fracciones lábiles se han mostrado proporcionalmente mayores (Studdert et al., 1997; Eiza et al., 2005; Domínguez et al., 2009; García, 2015; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017) que los observados en el COT (Figura 8c y d). Studdert et al. (1997) y Manso et al. (2012) mostraron que las disminuciones del COT a lo largo del período agrícola eran mucho menos pronunciadas que las observadas para alguna de sus fracciones lábiles (C orgánico liviano y COP, respectivamente). Asimismo, independientemente del sistema de labranza empleado, el COP mostró tasas de disminución más pronunciadas que el COT con los años de agricultura (Eiza et al., 2005; Studdert et al., 2010), aunque la tasa de disminución fue algo menor bajo SD (Studdert et al., 2010). Por otro lado, en el ELD de “Rotaciones Mixtas”, Studdert et al. (1997) demostraron que una fracción lábil de la MO se recuperó mucho más rápidamente que el COT durante el período bajo pastura de la rotación. Así, las fracciones lábiles se presentan como más sensibles (entendiendo sensibilidad como la magnitud del cambio por unidad de tiempo) a las formas y manejos de uso del suelo en el mediano a largo plazo (Studdert, 2014). Esto, sumado a la estrecha relación de dichas fracciones con varios atributos del suelo (i.e. provisión de nutrientes, formación y estabilización de agregados, entre otros), hace de las fracciones lábiles de la MO excelentes indicadores de salud edáfica (Doran & Parkin, 1996; Studdert, 2014; García, 2015; Domínguez et al., 2016). Contribuye a esto el hecho de que se ha demostrado que el COP no varía estacionalmente (Studdert et al., 2015) ni por efecto del cultivo antecesor inmediato al momento de muestreo (Studdert et al., 2017).

Se esperaría que la mayor sensibilidad de la variación del contenido de fracciones lábiles permitiera distinguir inequívocamente situaciones de manejo contrastantes. Sin embargo, los cambios provocados por diferentes prácticas de manejo de uso habitual en el SEB no permiten que dicha sensibilidad sea suficiente para distinguir claramente entre prácticas al analizarse la capa arable de suelos con bajo nivel de afectación por el uso (Domínguez et al., 2009; Studdert et al., 2010; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017). Esto puede ser consecuencia de la relativamente baja proporción de C y N en las fracciones más lábiles de estos suelos. En el ELD de “Rotaciones Mixtas” se ha determinado que, tanto bajo pastura como bajo LC y SD, en la MOP se encuentra sólo entre el 7% y el 17% del COT y entre el 7% y el 11% del N orgánico total, correspondiendo las mayores proporciones al suelo bajo pastura (Videla et al., 2004). Esto indica que en estos molisoles una muy

elevada proporción de la MO se encuentra altamente protegida, especialmente en aquellos suelos sometidos a agricultura.

iv.2. La MO y la capacidad de proveer N

En el SEB, uno de los principales efectos a largo plazo de las rotaciones de cultivos tienen que ver con la capacidad del suelo de proveer N. En suelos con baja exposición a la erosión, los cambios en la MO han producido grandes efectos sobre la dinámica del N y su disponibilidad. La disminución del N potencialmente mineralizable (No) asociada a la agricultura continua bajo LC (Echeverría et al., 1994), se ha visto reflejada en cada vez más frecuentes deficiencias de N haciéndose paulatinamente más necesaria la utilización de fertilizantes para el logro y mantenimiento de rendimientos elevados. Utilizando información del ELD de “Rotaciones Mixtas” y de otros sitios, Echeverría et al. (1994) determinaron que suelos bajo rotación con pasturas presentaban mayor capacidad de mineralización de N que suelos bajo agricultura continuada luego de varios años desde la última pastura. Asimismo, así como distintas secuencias de cultivos promovieron tasas diferenciales de disminución de la MO del suelo (Studdert & Echeverría, 2000), también lo hicieron con la capacidad del mismo de proveer N (Studdert et al., 2000; Studdert & Echeverría, 2006). El No fue mayor en la capa arable del suelo bajo las secuencias con mayor frecuencia de cultivos con residuos de relación C:N y volumen elevados (Studdert et al., 2000, ELD de “Agricultura Continua”). Por su parte, a partir de muestras tomadas en el ELD de “Rotaciones Mixtas”, Videla et al. (2005) informaron que las mayores tasas de mineralización bruta de N se observaron bajo pastura en concordancia con las mayores proporciones de COP presentes en ese suelo.

Se ha demostrado una muy estrecha relación entre el No y el N de amonio liberado durante una incubación anaeróbica corta (N anaeróbico, NAN) (Echeverría et al., 2000). El NAN es un parámetro edáfico de fácil determinación y muestra una gran relación con la capacidad del suelo de proveer N a los cultivos. De hecho, se ha propuesto al NAN como una herramienta de diagnóstico de disponibilidad de N para cultivos de trigo (Reussi Calvo et al., 2013) y de maíz (Echeverría et al., 2014; Orcellet, 2014). El NAN es muy sensible a las prácticas de manejo (Reussi Calvo et al., 2014) y tiene una muy estrecha relación con el COP (Studdert et al., 2006; Domínguez et al., 2009; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017) (Figura 9). En este sentido, se ha hallado una importante relación entre la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada y el NAN y el COP (Domínguez et

al., 2006a, b), siendo esta respuesta claramente mayor bajo SD (Domínguez et al., 2006a; Studdert, 2006).

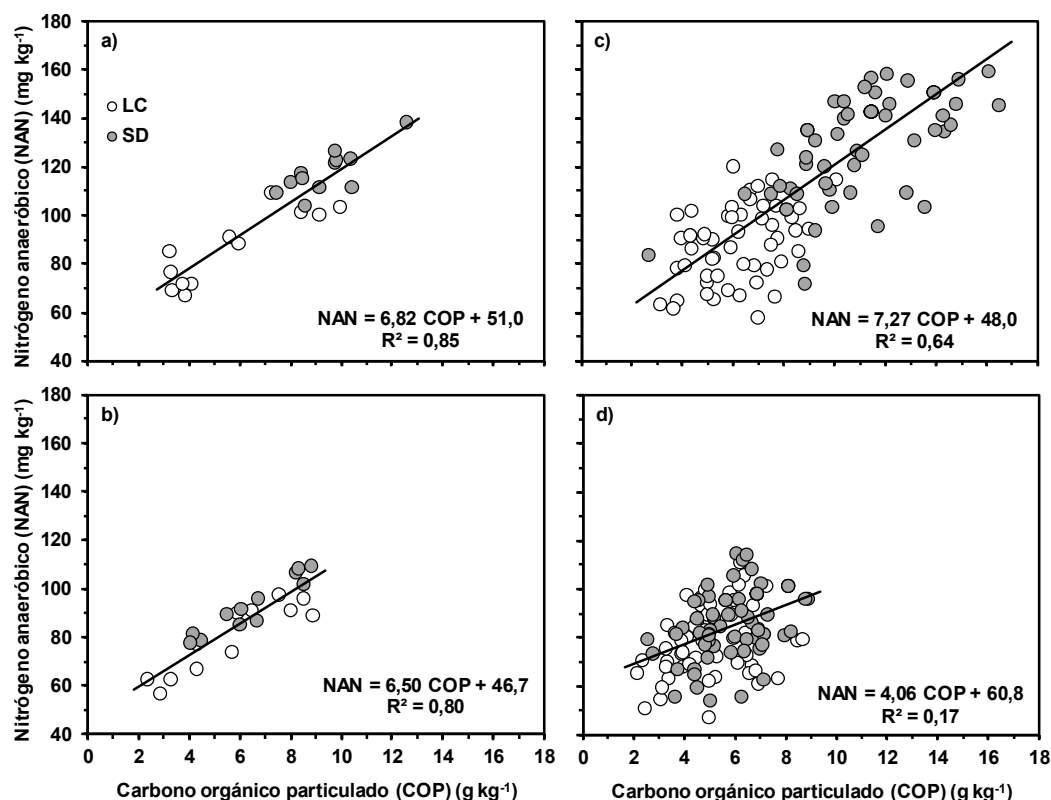


Figura 9. Relación entre el nitrógeno de amonio liberado en incubación anaeróbica corta (N anaeróbico) y el carbono orgánico particulado en la capa superficial (0-5 cm) (a, c) y en la capa arable (0-20 cm) (b, d) de un molisol de Balcarce en dos ensayos de larga duración: "Sistemas de Labranza" (una sola secuencia de cultivos, a y b) y "Sistemas de Labranza y Secuencias de Cultivos" (varias secuencias de cultivos, c y d). LC: labranza convencional; SD: siembra directa (adaptado de Domínguez et al., 2016 (a, b) y de Studdert et al., 2017 (c, d)).

Al igual que lo observado para COP (Figura 8d) (Studdert et al., 2010, 2017) y otras fracciones lábiles de la MO (Studdert et al., 1997), el NAN en la capa arable ha mostrado disminución con los años de agricultura tanto bajo SD, cuanto bajo LC (Genovese et al., 2009; Cozzoli et al., 2010; Studdert et al., 2010; García et al., 2016; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017) (Figura 10). Asimismo, al igual que con el COP (Figura 8c), bajo SD, el NAN ha sido significativamente más alto en los primeros centímetros del perfil (Studdert et al., 2010; García et al., 2016; Domínguez et al., 2016; Studdert et al., 2017). Si bien en los ELD de la UIB no se han observado diferencias en la capa arable entre sistemas de labranza, en la mayoría de los trabajos publicados se informa una leve tendencia a mayor

NAN en la capa arable bajo SD que bajo LC, lo que sugiere que con más tiempo se podría llegar a manifestar una diferencia mayor bajo el sistema de labranza conservacionista (Diovisalvi et al., 2008).

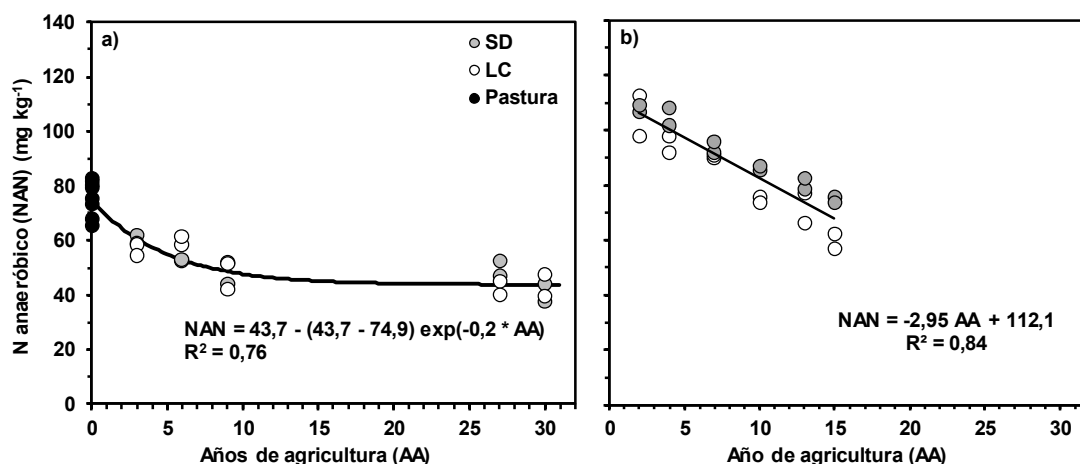


Figura 10. Cambios en el nitrógeno de amonio liberado en incubación anaeróbica corta (N anaeróbico) en la capa arable (0-20 cm) de un molisol de Balcarce con los años bajo agricultura con dos sistemas de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC): a) en el ensayo de larga duración de “Rotaciones Mixtas” (adaptado de Genovese et al., 2009 y de Cozzoli et al., 2010) y b) en el ensayo de larga duración de “Sistemas de Labranza” (adaptado de Domínguez et al., 2016).

No obstante, a pesar de la similar capacidad de mineralización de N del suelo a partir de su capa arable, las respuestas al agregado de fertilizante nitrogenado han sido siempre superiores bajo SD que bajo LC (Falotico et al., 1999; Redolatti et al., 2000; Domínguez et al., 2001; Santamaría et al., 2004; Studdert, 2006), tanto bajo suelos más “descansados” cuanto bajo suelos con un uso agrícola prolongado (Domínguez et al., 2001; Santamaría et al., 2004; Studdert, 2006). Analizando el comportamiento del cultivo de maíz en el ELD de “Rotaciones Mixtas”, Domínguez et al. (2001) mostraron que bajo LC luego de 20 años de agricultura bajo ese sistema de labranza, se obtenían mayores rendimientos y menores respuestas al agregado de N que bajo SD. Asimismo, mostraron que, a la salida de una pastura, el maíz bajo LC no presentó respuesta significativa al agregado de N. Por su parte, analizando la evolución de los rendimientos relativos de trigo y maíz con los años de agricultura (Figura 11), Studdert (2006) mostró que las caídas de rendimiento en el tiempo eran más pronunciadas bajo SD que bajo LC. Asimismo, mostró que al agregar fertilizante nitrogenado los rendimientos relativos de ambos cultivos tendieron al máximo poniendo de manifiesto que el problema asociado con el sistema de labranza en estos suelos, al menos para el período analizado, tenía un marcado efecto, principalmente sobre la nutrición nitrogenada de los cultivos. Si bien en los

ensayos analizados las dosis de fertilizante nitrogenado utilizadas fueron únicas, de la observación de la Figura 11 se puede deducir que, de ajustarse las dosis según el requerimiento de los cultivos, las mismas deberían ser crecientes a medida que avanzan los años bajo agricultura. Esto es particularmente más marcado bajo SD que bajo LC.

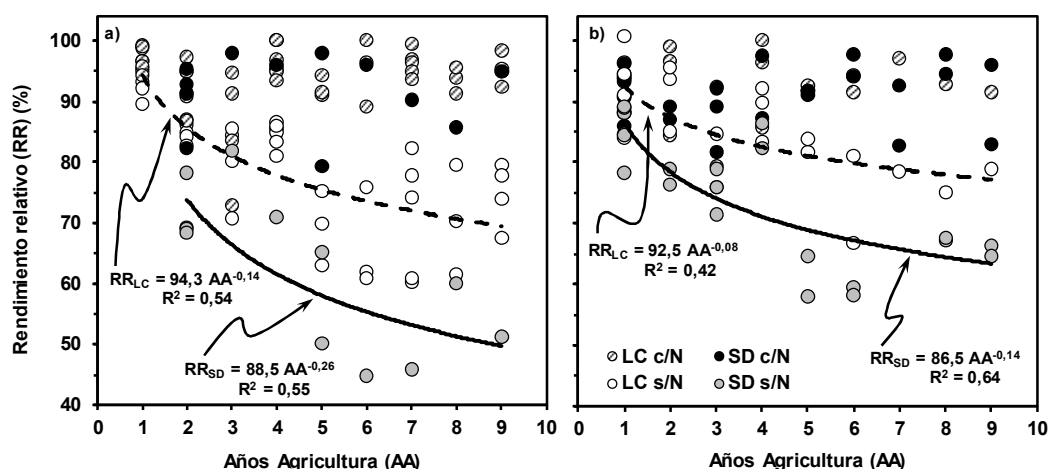


Figura 11. Cambios en los rendimientos relativos de trigo (a) y de maíz (b) sobre un molisol de Balcarce en función de los años bajo agricultura con dos sistemas de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), con (c/N) y sin (s/N) fertilizante nitrogenado (adaptado de Studdert, 2006).

Todo esto demuestra que, a pesar de que las variaciones en el tiempo de la MO total y de sus fracciones lábiles en la capa arable fueron similares entre LC y SD (Figuras 8 y 10), en estos suelos la aplicación estratégica y cuidadosa de laboreo permitiría aprovechar más eficientemente el servicio de provisión de N por parte del suelo. Esto no afectaría de manera diferencial el contenido de MO total debido a la baja proporción de fracciones lábiles en la fracción orgánica de los suelos del SEB. No obstante, sí sería una contribución importante al uso racional de fertilizantes nitrogenados con un impacto ambiental significativo. Los rendimientos potenciales crecientes de los cultivos y el mayor uso agrícola de los suelos requieren de un mayor uso de fertilizantes con lo que se incrementa el riesgo ambiental. Sería importante que a través del manejo se pudiera hacer un uso más acabado de los servicios que el recurso suelo puede dar en este aspecto y, a través de un manejo adecuadamente planificado, recomponer los niveles de MO al verse disminuidos.

Sin embargo, es necesario aclarar que, tal como fue mencionado, muchos de los suelos del SEB son susceptibles a erosión hídrica. Por tanto, a pesar de que permitiría un uso más seguro de los

fertilizantes, el uso de laboreo que pueda exponer al suelo a ese proceso de degradación debería ser considerado teniendo como prioridad la integridad del suelo que pueden ser irreversiblemente afectadas por la erosión (Quiroga & Studdert, 2014). A través de los sistemas de labranza se puede manejar la cantidad de N provisto a los cultivos a partir de la MO del suelo, pero además se maneja la cobertura y la condición superficial del suelo, aspectos fundamentales para hacer frente a la erosión.

iv.3. La MO y la estabilidad de los agregados

La MO y sus fracciones lábiles cumplen un rol fundamental en la formación y mantenimiento de la estructura de suelos como los del SEB (Six et al., 2004). Junto con la cobertura, la adecuada estructuración de la capa superficial del suelo, es la herramienta fundamental para enfrentar los procesos erosivos. La estabilidad de los agregados ha sido identificada como una de las variables edáficas más sensibles a los efectos del manejo en el SEB (Aparicio & Costa, 2007).

A partir de información generada en los ELD de la UIB se ha demostrado que la estabilidad de los agregados en la capa arable, cae abruptamente en los primeros años de agricultura bajo LC luego de una pastura (Studdert et al., 1997; Studdert & Echeverría, 2002). No obstante, Domínguez et al. (2008) mostraron (Figura 12) que, utilizando SD en el ELD de “Rotaciones Mixtas”, la tasa de aquella caída era menos pronunciada, aunque varios años de agricultura continuada llevaban finalmente a índices de estabilidad estructural similares para SD y LC. Asimismo, estos autores concluyeron que la implementación de SD luego de muchos años de agricultura convencional continua, no mejoraba la estabilidad de los agregados, con excepción de la mejora verificada en los primeros 5 cm del perfil (Andersen, A., com. pers.). Por otro lado, con la información de ese mismo ELD, se ha comprobado que un período corto de pasturas en la rotación lleva a una recuperación muy rápida de la estabilidad estructural (Studdert et al., 1997; Domínguez et al., 2008; Agostini et al., 2012). Agostini et al. (2014) demostraron que el aumento del “índice de intensificación de la secuencia por incremento de la frecuencia de pasturas en la rotación lleva a una mejora de la estabilidad estructural.

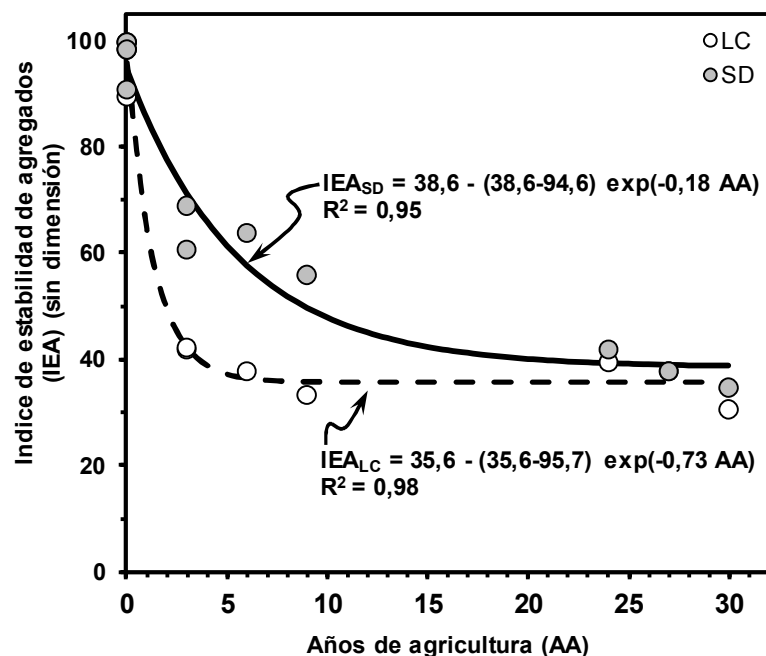


Figura 12. Cambios en el índice de estabilidad de agregados de la capa arable (0-20 cm) de un molisol de Balcarce en función de los años bajo agricultura con dos sistemas de labranza: siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) en el ensayo de larga duración de “Rotaciones Mixtas” (adaptado de Domínguez et al., 2008).

La capacidad de los agregados de resistir la ruptura se relaciona con el contenido de fracciones lábiles de la MO debido al rol que éstas cumplen en la formación y reciclaje tanto de macro- como de microagregados (Six et al., 2004). Las caídas y recuperaciones en la estabilidad de agregados reportadas por Studdert et al. (1997) coincidían con las variaciones observadas en el contenido de la fracción lábil de la MO analizada (C orgánico liviano). Eiza et al. (2006) y Agostini et al. (2012) mostraron que la estabilidad de los agregados se relacionaba con los contenidos de COT, pero más estrechamente con los contenidos de COP (Figura 13). Sin embargo, estos autores y Cozzoli et al. (2010), mostraron que esta última relación era significativa sólo cuando el suelo era sometido a bajos disturbios (pastura o SD), pero que no lo era cuando se lo sometía a laboreos frecuentes (LC) (Figura 13). Esto indica que la estabilidad de los agregados parecería ser suficientemente sensible no sólo para distinguir entre situaciones muy contrastantes (p.e. pastura o no disturbado vs agricultura) y entre situaciones de manejo agrícola (p.e. SD vs LC). No obstante, estos resultados y los de Cozzoli et al. (2010) conducen a pensar que es posible que la determinación del contenido de fracciones lábiles de la MO en alguna fracción de agregados del suelo permitiría ajustar mejor la identificación de un indicador más sensible a los cambios producidos por el manejo (Studdert, 2014).

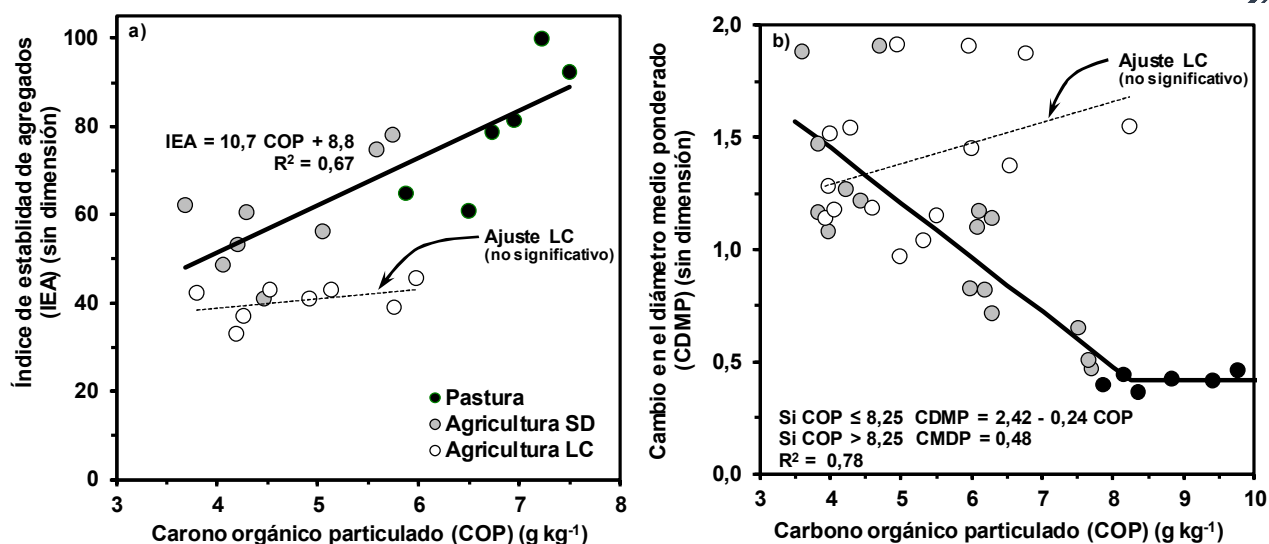


Figura 13. Relación del cambio en el carbono orgánico particulado con el índice de estabilidad de agregados (a) y el cambio en el diámetro medio de los agregados (b) de la capa arable (0-20 cm) de un molisol de Balcarce bajo dos sistemas de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)) y bajo pasturas en el ensayo de larga duración de “Rotaciones Mixtas” (adaptado de Eiza et al., 2006 (a) y de Agostini et al., 2012 (b)).

Mandiola et al. (2011) y Roldán et al. (2012a,b; 2014) estudiaron la distribución de tamaños de agregados, su estabilidad y su concentración de COT y de COP bajo tres situaciones de manejo contrastantes (seudo-prístina (pastura/parque) y agricultura continua SD y bajo LC) en los ELD de “Rotaciones Mixtas” y de “Sistemas de Labranza”. Si bien en estos estudios los contenidos de COP y de COT en la masa total del suelo permitieron distinguir entre las distintas situaciones, la sensibilidad fue mayor en las variables asociadas con los macroagregados ($>250 \mu\text{m}$). Las disminuciones de masa de macroagregados (entre tamizados luego de humedecimiento por capilaridad (baja agresión) y por inmersión (alta agresión) reflejaron con sensibilidad los cambios producidos por SD y LC en comparación con la situación no disturbada (Roldán et al., 2012a,b). No obstante, no hubo relación significativa entre estos cambios y los contenidos de COT y de COP en la masa total del suelo, como así tampoco con el contenido de COT en los macroagregados luego de un tamizado con baja agresión. Sin embargo, se encontraron relaciones significativas (Roldán et al., 2012a,b; Studdert, 2014) con el contenido de COP en la fracción de los macroagregados que quedaron luego del tamizado posterior al humedecimiento por capilaridad. La concentración de COP en esos macroagregados permitió distinguir claramente entre situaciones sin disturbio y los dos sistemas de labranza analizados. Así para los suelos del SEB el COP presente en los macroagregados antes de someterlos a fuerzas disruptivas más intensas podría ser un indicador más sensible de la estabilidad de los agregados del suelo, componente importante de la salud del suelo. Asimismo, siendo que el

NAN se relaciona tan estrechamente con el COP, también se relaciona con la estabilidad de los agregados (Domínguez et al., 2016). Por lo tanto, se supone que el NAN en los macroagregados remanentes luego de una baja agresión (i.e. luego del tamizado posterior al humedecimiento por capilaridad), podría ser un indicador sensible de la estabilidad de los agregados del suelo.

iv.4. Modelos de simulación de la dinámica de la MO

La cantidad de variables intervinientes y sus interacciones en todo el proceso de cambios en la MO asociados con el uso del suelo, hace que sea difícil tenerlas todas en cuenta para predecirlos ante escenarios ambientales y de manejo cambiantes. Los modelos de simulación se presentan como una herramienta poderosa para resolver ese problema y ayudar a comprender dichas variaciones asociadas con el uso del suelo (Studdert et al., 2011; Moreno et al., 2016). Los modelos que simulan los cambios en la MO pueden ser simples o muy sofisticados. Estos últimos pueden describir adecuadamente el sistema, pero su aplicación está restringida a usuarios con alto grado de entrenamiento (Moreno et al., 2016). El uso de modelos con fines prácticos y aplicados al diseño de prácticas de manejo de la MO requiere que sean simples y que utilicen información fácilmente accesible para muchos usuarios (Studdert et al., 2011). Disponer de modelos sencillos debidamente calibrados y validados, permitiría su uso por los decisores principales del proceso productivo (i.e. productores, asesores) como herramienta de apoyo para la toma de decisiones de manejo atendiendo al mantenimiento o mejora del contenido de MO de los suelos.

Con la información disponible de los ELD de la UIB se han podido ajustar/validar para las condiciones del SEB (Studdert et al., 2011; Moreno et al., 2016), dos modelos sencillos que requieren información muy fácilmente accesible y podrían implementarse con herramientas informáticas de uso común y frecuente en estos días: el modelo RothC (Coleman & Jenkinson, 1996) y el modelo AMG (Andriulo et al., 1999). Ambos modelos mostraron resultados promisorios y se ha sugerido que, con las facilitaciones adecuadas para adaptarlos para la utilización por un mayor espectro de usuarios, podrían ser herramientas valiosas para ayudar a la toma de decisiones de manejo.

v. Consideraciones finales y acciones a futuro

Los ELD de la UIB han permitido caracterizar los procesos de ganancia y pérdida de C del suelo en relación con las prácticas de manejo que se implementen. Con ello se ha podido generar información

que permite comprender cómo funcionan los procesos que hacen a la dinámica de la MO y poder sugerir, proponer o descartar prácticas de manejo y su oportunidad e intensidad de uso. Gracias a esa información se ha podido llegar al medio con respuestas a problemáticas de interés generalizado y proponiendo alternativas de manejo que, aunque no siempre tenidas en cuenta, son un reservorio de conocimiento disponible para ser utilizado cuando se lo requiera. Esa es una de las grandes ventajas de los ELD que, si bien no siempre dan respuestas de inmediato, generan un acervo de conocimiento que, procesado e interpretado adecuadamente, está disponible cuando sea necesario. Además, las situaciones creadas en los distintos tratamientos a lo largo de tantos años, son testimonios vivientes y verificables de los efectos de la intervención humana sobre el agroecosistema y de cómo es posible modificar/dirigir su comportamiento.

Hasta los últimos años, los ELD de la UIB han generado información mayormente de manejo del sistema de manera integral. Eso se ha logrado a través del trabajo de los investigadores formados participantes y de un gran número de Tesis de Grado y de Posgrado. No obstante, a lo largo de tantos años se ha podido identificar que el comportamiento de la dinámica de la MO en suelos de las características de los del SEB, es algo diferente que lo generalizadamente conocido para otros suelos. Además, se ha logrado generar información que no sostiene algunos conceptos referidos al efecto de las prácticas de manejo, generalmente adoptados con poca o ninguna validación, al menos, para las condiciones locales.

Para terminar de comprender los mecanismos y procesos que llevan a ese particular funcionamiento de estos suelos, es necesario profundizar en el conocimiento de aquellos procesos y mecanismos. Para ello, se han planificado y se están llevando a cabo estudios mediante el uso de técnicas isotópicas y a una escala más específica para entender el porqué del comportamiento de los suelos del SEB. Con ello podrán proponerse acciones, establecerse límites/umbrales y se generarán herramientas (modelos de simulación más ajustados, identificación de indicadores sensibles) que permitan hacer más eficiente y efectivo el manejo de los suelos. Si bien la focalización principal ha estado puesta sobre la fracción orgánica y su rol respecto al funcionamiento del suelo, se tiene la convicción de que a través del ajuste de manejo de dicha fracción se puede tender a una producción agropecuaria sustentable. Por lo tanto, el conocimiento más exhaustivo de cómo es la dinámica de la fracción orgánica permitirá mejorar la capacidad de orientar, incentivar, inhibir y regular procesos a través de combinaciones de prácticas de manejo, y de la definición de la intensidad y la oportunidad

de uso de cada una de ellas con el fin de preservar la funcionalidad del recurso suelo, la integridad ambiental y la seguridad alimentaria.

Bibliografía

- AAPRESID. 2016. Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa, Rosario, Santa Fe, Argentina. <http://www.aapresid.org.ar>. Último acceso noviembre de 2016.
- Aparicio, V.C. y J.L. Costa. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 96:155-165.
- Cárcova, J. y M.E. Otegui. 1997. Disponibilidad hídrica para el cultivo de maíz a lo largo del ciclo en Argiudoles típicos de Pergamino y Balcarce. *Actas "VI Congreso Nacional de Maíz"*, Pergamino, Buenos Aires, Argentina, julio 1997. Tomo III:180-185.
- Casas, R. y G. Albarracín (eds.). 2015. *El deterioro del Suelo y el Ambiente en Argentina*. FECIC. Buenos Aires Argentina.
- Castorina, S.L. 2014. Riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica potencial en el área de influencia de la Estación Experimental Balcarce del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Caviglia, O.P. y F.H. Andrade. 2010. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotech.* 3:1-8.
- CGCC. 2004. Atlas digital del Partido de Balcarce. Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata-Municipalidad de Balcarce. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. En CD.
- Costa, J.L. y V.C. Aparicio. 2015. Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. *Agr Water Manage.* 159:299-306.
- Costamagna, O.A., A.T. Gualati y G.A. Studdert. 2006. Breve reseña histórica del Ensayo de Rotaciones Mixtas de la Unidad Integrada Balcarce. Material "Jornada-Taller 30° Aniversario Ensayo de Rotaciones Mixtas y Laboratorio de Servicio de Suelo", Unidad Integrada Balcarce, Balcarce, Buenos Aires, Argentina, 21-22 de noviembre de 2006. En CD.
- Darwich, N. 1991. Estado actual y manejo de los recursos naturales en la Región Pampeana Sur. En: *Actas "Seminario Juicio a Nuestra Agricultura. Hacia el desarrollo de una agricultura sostenible"*. Instituto nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 14-15 de noviembre de 1991. Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina. p. 51-62.
- Diovisalvi, N.V., G.A. Studdert, G.F. Domínguez y M.J. Eiza. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 26:1-11.
- Domínguez, G.F., N.V. Diovisalvi, G.A. Studdert y M.G. Monterubbianesi. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on mollisols of the southeastern pampas. *Soil Tillage Res.* 102:93-100.

- Durán, A., H. Morrás, G. Studdert y X. Liu. 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chin. Geogra. Sci.* 21:511-530.
- García, G.V. 2015. Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis: relación con sistemas de cultivo de agricultura continua. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. Mar del Plata, Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- García, F.O., L.I. Picone e I.A. Ciampitti. 2014. Fósforo. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. p. 229-264.
- García, G.V., G.A. Studdert, M.N. Domingo y G.F. Domínguez. 2016. Nitrógeno mineralizado en anaerobiosis: relación con sistemas de cultivo de agricultura continua. *Ciencia del Suelo* 34:127-138.
- Hall, A.J., C.M. Rebella, C.M. Ghera y J.P. Culot. 1991. Field-crop systems of the Pampas. En: C. Pearson (ed.) *Field Crop Ecosystems, Ecosystems of the World*, 19:413-450.
- Irigoyen, A. 1993. Ocurrencia de heladas tempranas y tardías en el centro-sudeste de la Provincia de Buenos Aires. *Actas "II Jornadas Nacionales de Defensa Contra Heladas y Primer Seminario Internacional"*, Mendoza, Mendoza, Argentina. 23-26 de mayo de 1993. p. 161-163.
- Irigoyen, A.I., A.I. Della Maggiora y F.N. Cabria. 2004. Balance de agua seriado para tres perfiles de suelo del ambiente geomorfológico lomas interserranas de Balcarce (Arg.). *Actas "X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología"*, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. 13-15 de octubre de 2004. En CD.
- INTA. 1979. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja: 3757-31, Balcarce., Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Buenos Aires, Argentina.
- Luna, J.M. y G.J. House. 1990. Pest management in sustainable agricultural systems. En: C. Edwards, R. Lal, P. Madden, R. Miller, G. House (eds.) *Sustainable Agricultural Systems*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, EEUU. p. 157-173.
- Manuel-Navarrete, D., G.C. Gallopín, M. Blanco, M. Díaz-Zorita, D.O. Ferraro, H. Herzer, P. Laterra, M.R. Murmis, G. Podestá, J. Rabinovich, E.H. Satorre, F. Torres y E.F. Viglizzo. 2009. Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas. *Environ. Dev. Sustain.* 11:621-638.
- Mitchell, C.C., R.L. Westerman, J.R. Brown y T.R. Peck. 1991. Overview on long-term agronomic research. *Agron. J.* 83:24-29.
- Monterubbiansi, M.G. y M.G. Cendoya. 2001. Caracterización del régimen de heladas meteorológicas y agrometeorológicas en Balcarce (Argentina) en el período 1970-1999. *Rev. Facultad de Agronomía* 21:69-78.
- Power, J.F. 1994. Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Water Cons.*, 49(supl. N° 2):16-23.
- Quiroga, A.R. y G.A. Studdert. 2014. Manejo del suelo e intensificación agrícola: agua y materia orgánica, dos aspectos clave. En: H.E. Echeverría y F.O. García (eds.) *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. 2da Edición. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. p. 73-100.

-
- Rearte, D.H. 1996. La integración de la ganadería argentina. SAGPyA, INTA. Buenos Aires, Argentina. Pp. 48.
- Sainz Rozas, H.R., H.E. Echeverría y H. Angelini. 2011. Niveles de materia orgánica y pH en suelos agrícolas de la Región Pampeana y extrapampeana argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 2:6-12.
- San Martino, S., A. Della Maggiora y G. Monterubbianesi. 2002. El régimen de temperaturas máximas y mínimas y amplitudes térmicas en Balcarce (Argentina) y su relación con el ENOS y la ocurrencia de precipitaciones. *Rev. Arg. Agrometeorología* 2:89-96.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. USDA, Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, EEUU. 372 p.
- Studdert, G.A. 2006. Ensayos de larga duración de rotaciones y labranzas: la experiencia de la Unidad Integrada Balcarce. Taller "Sustentabilidad Agrícola: el rol de los Ensayos de Larga Duración". Material "Jornada-Taller 30° Aniversario Ensayo de Rotaciones Mixtas y Laboratorio de Servicio de Suelo", Unidad Integrada Balcarce, Balcarce, Buenos Aires, Argentina, 21-22 de noviembre de 2006. En CD.
- Studdert, G.A. y H.E. Echeverría. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1496-1503.
- Studdert, G.A., H.E. Echeverría y E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.

Ing. Agr. Horacio Forján e Ing.Agr. (MSc.) Lucrecia Manso.

En el centro-sur bonaerense se encuentra la región mixta triguera (área de influencia de la Chacra Experimental Integrada Barrow), que abarca una superficie de 2.300.000 hectáreas, formando parte de la gran unidad geomorfológica de la Pampa Austral Interserrana. El paisaje presenta extensas llanuras suavemente onduladas, a veces muy marcadas, generalmente caracterizadas por la presencia de un horizonte calcáreo a profundidad variable entre 50 y 100 centímetros. También existen áreas con suelos sin tosca lo cual hace que estos ambientes tengan en general mayor capacidad de almacenar agua para los cultivos (Figura 1).

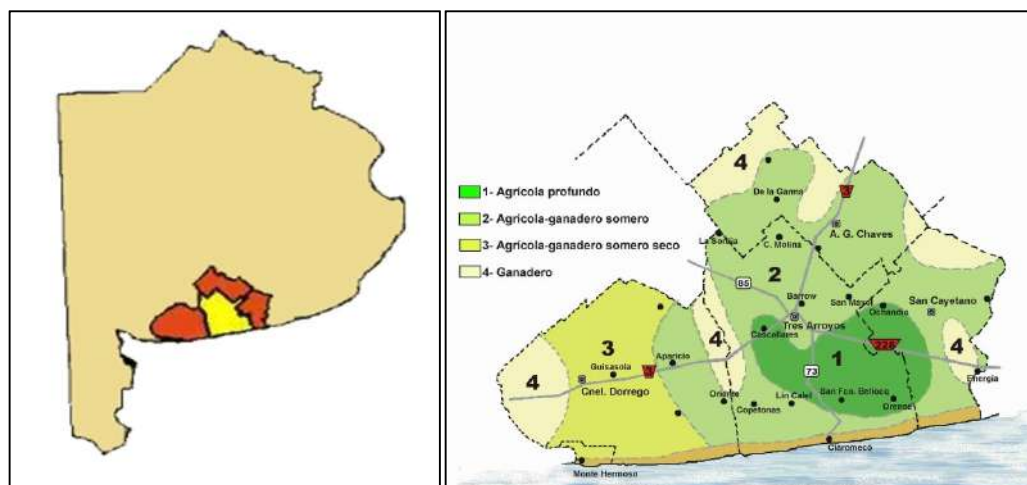


Figura 1. Ubicación de la región centro-sur bonaerense en la provincia y sus zonas agroecológicas.

Los suelos predominantes pertenecen al Gran Grupo de los Argiudoles, los cuales presentan una disminución gradual en el contenido de arcilla del horizonte B en sentido este-oeste. Los Paleudoles petrocálcicos (limitados en profundidad por la tosca) y Argiudoles típicos se hallan en gran parte de la región. Hacia el oeste predominan los suelos Hapludoles asociados a Argiudoles con escaso desarrollo del horizonte B y presencia de tosca a menos del metro de profundidad. En los ambientes bajos de toda la región existen suelos hidromórficos en los que se acumula agua (Natracuoles, Natralboles).

Climáticamente la zona se clasifica como mesotermal subhúmeda. Presenta un régimen hídrico con disminución de las precipitaciones desde el este hacia el oeste. El promedio histórico de lluvias alcanza los 756 milímetros. El déficit hídrico anual potencial oscila entre 229 y 255 mm (diferencia entre lluvias y evapotranspiración potencial), con mayor significancia histórica en los meses de noviembre, diciembre y enero (Figura 2).

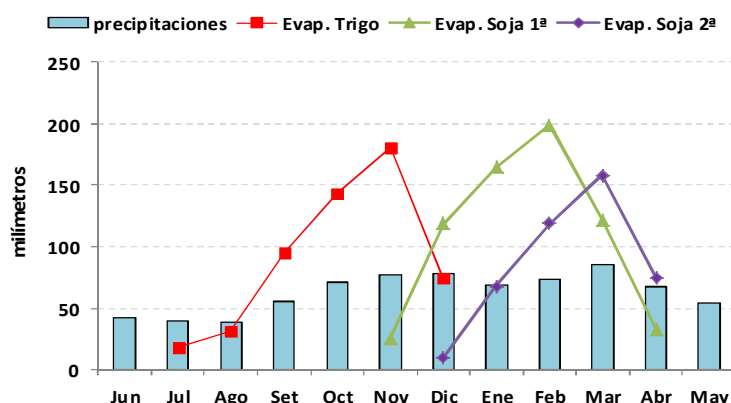


Figura 2. Precipitaciones y evapotranspiración (evap.) para los cultivos de trigo, soja de primera (1ª) y soja de segunda (2ª). Fuente: Borda, M. 2010. Agrometeorología Chacra Experimental Integrada Barrow.

Conociendo la capacidad de almacenaje de los suelos y la distribución de las lluvias es posible ajustar la rotación de la secuencia en función del consumo de los cultivos. Sin embargo, como en otoño, invierno y comienzos de primavera la demanda climática es baja, aquellos suelos con limitantes de profundidad llegan rápidamente a colmar su capacidad de almacenaje, aumentando el escurrimiento de las lluvias que ocurren en esas condiciones, resultando en eficiencias de barbecho relativamente bajas. Por otro lado, desde mediados de primavera y sin aportes pluviométricos de importancia, estos suelos pueden alcanzar rápidamente el límite mínimo de agua útil, aumentando la probabilidad de déficit de agua (Borda, 2012). Hacia el oeste se acentúa la disminución de las precipitaciones, reduciendo así las posibilidades de incorporar cultivos de verano en las rotaciones.

Las temperaturas máxima, media y mínima promedio anual son 20,4°C, 14,9°C y 7,4°C, respectivamente, caracterizando un ambiente templado con un período libre de heladas de 172 días. Las heladas van desde el 23 de abril hasta el 2 de noviembre (valores medios). El número promedio de heladas meteorológicas en el año es de 43, mientras que las heladas agronómicas suman 71.

Dentro de la región se han delimitado zonas ecológicas con la finalidad de ubicar áreas geográficas que presenten cierto grado de homogeneidad en cuanto a suelo y condiciones climáticas

predominantes durante el ciclo de los cultivos (Duhalde y Forján, 1985). En la Figura 1 se puede observar la predominancia de la zona agrícola-ganadera somera, la cual por sus características enunciadas, requiere de prácticas de manejo que contemplen sus limitaciones.

La ubicación de la Chacra Experimental Integrada Barrow (CEI Barrow) en esta zona, refleja la representatividad de los estudios realizados y de la información obtenida para gran parte de la región. El establecimiento de los ensayos de rotaciones y secuencias de cultivos en este ambiente, ha permitido un mejor conocimiento del comportamiento de los cultivos en relación con las características del medio. De ese modo se han podido explicar algunos de los resultados observados en la región a causa de diferentes manejos, y su incidencia sobre el rendimiento de los cultivos y calidad de sus granos, las variaciones en parámetros físicos, químicos y biológicos de los suelos, la evolución de las poblaciones de malezas, etc.

La producción agropecuaria regional. Cambios en el uso del suelo.

La región mixta cerealera bonaerense se caracterizó tradicionalmente por el predominio de un sistema de producción agrícola-ganadero que perduró durante mucho tiempo amparado en la estabilidad del agroecosistema (Barsky et al, 1991). El desarrollo de una agricultura en base a cereales de invierno con bajos costos de producción relativos y limitada dependencia de insumos energéticos externos al sistema, se complementó con una ganadería basada en pasturas perennes, verdeos y pastoreo de rastrojos. Eso le permitió mantenerse competitiva.

A comienzos de la década 1981/1990, comenzó a vislumbrarse un cambio. Muchos establecimientos agropecuarios modificaron el uso del suelo, aumentando la proporción de esquemas con mayor presencia de agricultura en respuesta a la mayor rentabilidad que ofrecían los granos con relación a la producción animal. El incremento de la productividad agrícola se logró con la incorporación y adaptación de tecnología en todos los cultivos (semillas de mayor potencial, herbicidas específicos, fertilizantes compuestos, etc.), obteniéndose resultados netos positivos en dicho período (Larre, 2002).

Sin embargo, en muchos casos, ese aumento se realizó utilizando métodos de laboreo excesivos, inadecuados e inoportunos, planificando rotaciones o secuencias de cultivos que no contemplaron la aptitud de los suelos, con incorporación de nuevos cultivos, principalmente de verano (Forján, 1999) y un escaso uso de fertilizantes (Melgar y Torres Duggan, 2002).

Ante esta situación se plantearon interrogantes sobre la evolución del sistema de producción en el tiempo y las consecuencias que un esquema mayoritariamente agrícola podía traer sobre los recursos naturales intervinientes (suelo-agua) y sobre la productividad de los cultivos. También se buscó conocer qué prácticas de manejo deberían emplearse para reducir el riesgo de degradación sin resignar rentabilidad.

Tratamientos estudiados para abordar esa problemática: Los ensayos de rotaciones de la Chacra Experimental Integrada Barrow.

En 1982 se diagramó el primer ensayo de rotaciones (1982-1996), el cual intentó reflejar lo que acontecía en la región ante el avance de la agricultura sobre los sistemas mixtos tradicionales. Se compararon rotaciones con pasturas versus situaciones de agricultura permanente (incluido monocultivo de trigo), determinando, a través de la variación de la materia orgánica (MO) del suelo, la longitud posible de los ciclos agrícolas y el período con pasturas necesario para recuperar la MO perdida con los cultivos de cosecha. El sistema de labranza empleado fue convencional (LC), arado de rejas, rastra de discos, rastra de dientes o vibrocultivador, respondiendo a la tecnología empleada en la región en ese momento.

En la década 1991/2000 el incremento de la producción agrícola continuó siendo sostenido, no sólo por el aumento de la productividad de los cultivos con mayor utilización de insumos (herbicidas, fertilizantes), sino también por la incorporación de mayor superficie sembrada y la prolongación de los ciclos agrícolas, como una manera de maximizar el beneficio (CEI Barrow, 2016).

Para reflejar los efectos del continuo avance agrícola sobre los sistemas regionales, y la masiva incorporación de los cultivos de cosecha gruesa en las secuencias, en 1993 se diagramó el ensayo rotaciones con labranzas donde se compararon secuencias de agricultura permanente (6 secuencias de cultivos con diferentes proporciones: cultivos de cosecha fina/cultivos de cosecha gruesa), ensayo que aún hoy continúa y que ha brindado valiosa información a través de estos años.

El objetivo del ensayo fue evaluar el impacto sobre el sistema de producción de diferentes secuencias agrícolas bajo un esquema de labores combinadas con variantes de fertilización nitrogenada. Las labranzas empleadas se ajustaron a los cambios productivos ocurridos en los sistemas regionales con el paso de los años. Correspondió a arado rejas, rastra de discos y rastra de dientes en los primeros años; arado cincel, rastra de discos y cultivador en años posteriores y rastra

de discos (2) y cultivador en la etapa final. En todos los años se ajustó la tecnología recomendada para cada cultivo. Las secuencias estudiadas en la comparación, representaron en algunos casos a las más comunes utilizadas en la región y en otros a situaciones factibles de ser implementadas en el momento del inicio del ensayo: 1- Trigo (*Triticum aestivum*)/Maíz (*Zea mays*); 2- Trigo/Girasol (*Helianthus annuus*); 3- Trigo/Soja (*Glycine max*); 4- Trigo/Trigo/Girasol; 5- Trigo/Maíz/Soja; 6- Trigo/Maíz/Girasol. En todas las secuencias estuvo presente el trigo como cultivo representativo de los cereales de invierno. Las variaciones estuvieron dadas por la presencia y/o repetitividad de los cultivos de verano.

Frente a los primeros pasos de adopción de la siembra directa (SD) en la región, en 1997 se inició el ensayo de comparación de labranzas (LC vs SD) partiendo de dos historias de uso previo: suelo descansado a partir de una pastura alfalfa (*Medicago sativa*)/pasto ovillo (*Dactylis glomerata*) de 4 años, y suelo con 12 años de historia agrícola.

Se empleó una rotación agrícola típica para la región (ciclos de 5 años Girasol/Trigo/Maíz/Girasol/Trigo). El objetivo fue evaluar el efecto de dos sistemas de labranza sobre los parámetros físicos y químicos del suelo y los rendimientos de los cultivos, en un ambiente edáfico sometido a diferentes intensidades de uso previo. A través de este ensayo se compararon los distintos manejos que comenzaban a convivir en la región, evaluando fundamentalmente la adaptación del sistema de SD al ambiente en estudio.

Las incógnitas planteadas sobre esta adaptación, fueron abordadas a partir de dos historias de uso del suelo. Estas situaciones diferenciadas permitieron evaluar la evolución a través de los años de distintos aspectos del sistema de producción (rendimiento de cultivos y calidad de granos, balance de nutrientes, poblaciones de malezas, propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, etc.) cuando fueron trabajadas con dos sistemas de labranza (LC y SD). A partir de 2007 la rotación comprendió 2 ciclos de Maíz/Soja/Trigo/Girasol/Trigo.

La trascendencia de este ensayo fue estratégica para la región, ya que permitió analizar la evolución de variables fundamentales en la sostenibilidad del sistema productivo regional a partir del cambio en la tecnología aplicada.

En 1998 se inició el ensayo de rotaciones en SD, el que fue implantado en un lote con menor profundidad de suelo (tosca a 50 cm), intentando representar los suelos regionales con esta característica. Por ese entonces, aquellos establecimientos agropecuarios situados en un ambiente

similar, buscaban incorporar mayor proporción de agricultura y con esta técnica, lograr mejorar aspectos relacionados al balance hídrico de los cultivos. El desafío era adquirir conocimientos y experiencias que llevaran a definir las estrategias de manejo que optimizaran el funcionamiento de los sistemas regionales.

El objetivo del ensayo fue evaluar en SD continua el efecto de distintas secuencias de cultivos sobre la producción y calidad de los mismos, dinámica de la población de malezas, enfermedades, plagas y sobre las propiedades del suelo. Se diagramaron cinco secuencias: tres exclusivamente agrícolas y dos mixtas, las que incluyeron pastoreo directo. Las agrícolas respondieron a los siguientes esquemas: 1- Agrícola conservacionista, 3- Agrícola de invierno para suelos limitados y 5- Agrícola intenso. Las mixtas fueron: 2- Mixto en rotación con pasturas (sin verdeos) y 4- Mixto tradicional con verdeos. Se establecieron ciclos de 6 años los que finalizaron con trigo en todas las secuencias. En el otoño siguiente, sobre el rastrojo de trigo común a todos los tratamientos, se realizaron las determinaciones físicas de suelo.

Los tratamientos sufrieron modificaciones al final de cada ciclo. Los mismos reflejaron los cambios a nivel de elección de cultivos ocurrido en la región donde, en los últimos años, se planteó un fuerte proceso de “sojización” con importante presencia de siembras de segunda (Tabla 1).

Tabla 1. Cultivos intervinientes en el ensayo Rotaciones en siembra directa

Secuencia	CICLO 1					
	Año 1 1998	Año 2 1999	Año 3 2000	Año 4 2001	Año 5 2002	Año 6 2003
1 Agrícola conservacionista	MAIZ	GIRASOL	TRIGO	MAIZ	GIRASOL	TRIGO
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos)	SOJA	TRIGO	PASTURA	PASTURA	PASTURA	TRIGO
3 Agrícola de invierno (para suelos limitados)	GIRASOL	TRIGO	GIRASOL	TRIGO	GIRASOL	TRIGO
4 Mixto: tradicional con verdeos.	TRIGO	AV/GIRASOL	TRIGO	AV/GIRASOL	TRIGO	TRIGO
5 Agrícola intenso	TRIGO	AV/SOJA	CZ/SOJA	CEB/SOJA	TRIGO/SOJA	TRIGO
Secuencia	CICLO 2					
	Año 1 2004	Año 2 2005	Año 3 2006	Año 4 2007	Año 5 2008	Año 6 2009
1 Agrícola conservacionista	GIRASOL	TRIGO	SORGO	TRIGO	SOJA	TRIGO
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos)	SOJA	CZ/SOJA	TRIGO	SORGO	SOJA	TRIGO
3 Agrícola de invierno (para suelos limitados)	CZ/SOJA	TRIGO	CEB/SOJA	CZ/SOJA	CEB/SOJA	TRIGO
4 Mixto: tradicional con verdeos.	Av Vi/GIRAS	TRIGO	Av Vi/GIRAS	TRIGO	Av Vi/SOJA	TRIGO
5 Agrícola intenso	SOJA	CEB/SOJA	CZ/SOJA	CEB/SOJA	CZ/SOJA	TRIGO
Secuencia	CICLO 3					
	Año 1 2010	Año 2 2011	Año 3 2012	Año 4 2013	Año 5 2014	Año 6 2015
1 Agrícola conservacionista	SORGO	GIRASOL	TRIGO	SORGO	SOJA	TRIGO
2 Mixto: rotación con pasturas (sin verdeos)	TRIGO c/ PAST	PASTURA	PASTURA	PASTURA	PAST/SOJA	TRIGO
3 Agrícola base oleaginosa	SOJA	CZ/SOJA	SOJA	CZ/SOJA	SOJA	TRIGO
4 Mixto: tradicional con verdeos (cultivo de cobertura)	Av Vi/GIRAS	TRIGO	Av Vi/GIRAS	TRIGO	Av Vi/SOJA	TRIGO
5 Agrícola intenso	SOJA	CEB/SOJA	TRIGO	SOJA	CEB/SOJA	TRIGO

Información obtenida

En todos los ensayos descriptos fueron empleados métodos y mediciones siguiendo los procedimientos y protocolos estandarizados para cada técnica en particular utilizados habitualmente en este tipo de ensayos (Santos et al, 2012).

Tabla 2. Variables medidas en los ensayos de rotaciones

De Suelo	De Cultivo
<i>Anualmente:</i> -Disponibilidad de nutrientes, acidez y agua a la siembra.	<i>Anualmente:</i> -Materia seca de biomasa - Rendimiento y sus componentes -Calidad de granos - Aporte de rastrojos.
<i>Al final de cada ciclo (cada 5-6 años):</i> -Densidad aparente -Penetrometría; -MO y sus fracciones. Balance de carbono. -Estabilidad de agregados. -Infiltración y escurrimiento. -Fauna edáfica (macro, meso y microfauna). -Comunidades fúngicas y actividad enzimática.	<i>Al final de cada ciclo:</i> - Perdurabilidad de rastrojos. -Evolución de la población de malezas, plagas y enfermedades. -Balance de nutrientes.

Interpretación y recomendación en base a los resultados

La alternancia planificada de diferentes cultivos (incluyendo también como cultivos a las pasturas y verdes), es una práctica comprobada para mantener la diversificación y potenciar el funcionamiento de los agroecosistemas. Su adopción presenta ventajas desde el punto de vista productivo y empresarial.

La secuencia de cultivos

El cultivo de trigo presenta su mayor área de siembra en el sur de la provincia de Buenos Aires, resultando ser el cultivo de mayor trascendencia en la región de influencia de la CEI Barrow. Sus rendimientos han estado marcados por variaciones interanuales que, entre otras razones, han sido asociadas a su implantación en diferentes ambientes productivos (Bergh et al, 1996; Kruger, 1996).

Esta sensibilidad a los cambios originados por el manejo, ha llevado a usarlo como un cultivo de referencia en todos los ensayos ya descritos (Forján y Manso, 2012).

Cuando se compararon los rendimientos del monocultivo de trigo frente a dos situaciones en rotación: a) con girasol (1 cultivo de invierno/1 cultivo de verano), o b) con maíz/girasol (1 cultivo de invierno/2 cultivos de verano), los resultados favorecieron a los esquemas en rotación (promedio $a=+240$ y $b=+380 \text{ kg.ha}^{-1}$, respectivamente) con respecto al monocultivo, corroborando los beneficios de la diversificación en la secuencia (Figura 3).

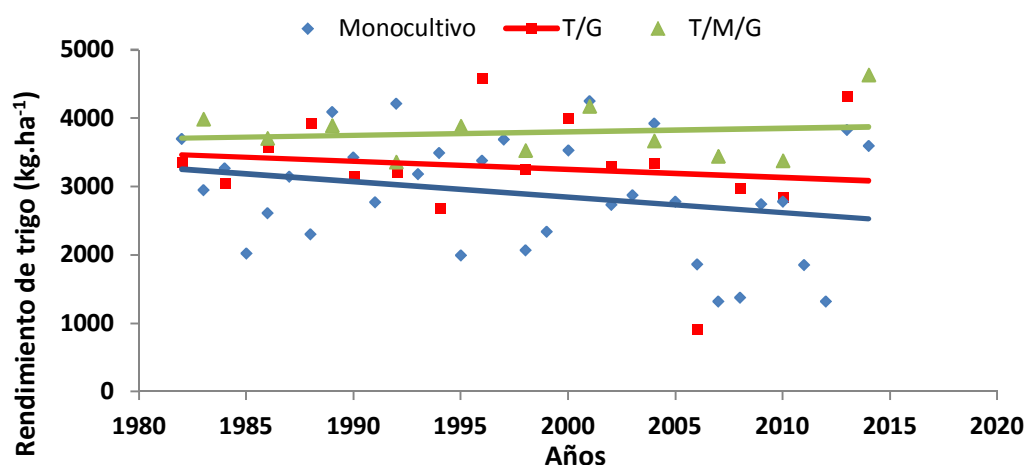


Figura 3. Comparación de secuencias agrícolas en rotación, para cultivos de trigo con similar tecnología. Referencias: Monocultivo: Monocultivo de trigo; T/G: secuencia trigo/girasol continua; T/M/G.: secuencia trigo/maíz/girasol continua; Rto: rendimiento. Fuente: Ensayo Rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow

Si bien a través de estos años, el mejoramiento genético permitió acrecentar el rendimiento potencial del grano, su expresión dependió del efecto ambiental y de la interacción genotipo-ambiente. Es así que, para un mismo ambiente, años con condiciones meteorológicas distintas produjeron diferentes respuestas para los mismos tratamientos (Figura 4).

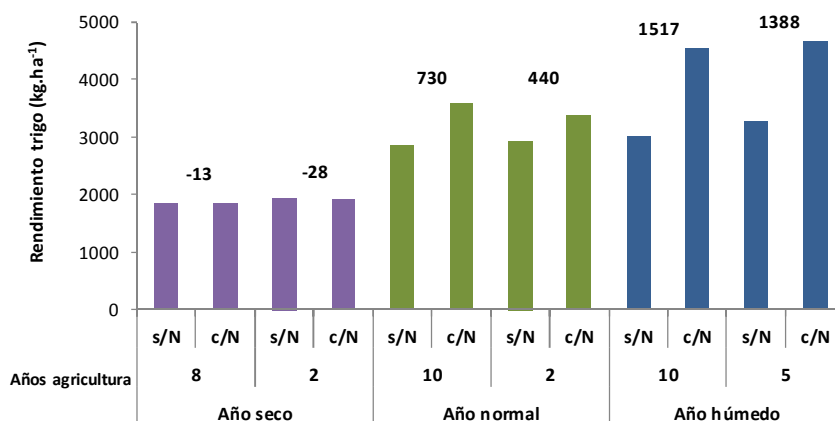


Figura 4. Respuesta al agregado de nitrógeno ($46 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) según años de agricultura con condiciones climáticas diferentes (s/N: sin nitrógeno, c/N: con nitrógeno). Fuente: Ensayo Rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Las labranzas

Efectos sobre el contenido de agua del suelo: El sistema de SD modifica el ambiente físico y químico del suelo respecto a la LC. Como no se efectúan laboreos, se produce en superficie la acumulación de rastrojos de los diferentes cultivos que integran la rotación, y en profundidad se desarrolla una red de canales y poros que mejoran sustancialmente la infiltración y la retención de agua. Este proceso requiere de varios años para ir alcanzando cierta estabilidad, permitiendo mejorar la dinámica del agua.

La existencia de residuos vegetales en superficie protege al suelo del impacto de la gota de lluvia, reduce la evaporación y favorece la infiltración, reduciendo el riesgo de erosión hídrica que se produce por escurrimiento hacia zonas más bajas del relieve. De este modo, se acumula más agua en el perfil del suelo (Manso et al, 2012). Esto resulta de suma importancia sobre todo para aquellos suelos con escasa profundidad como los de esta región.

Una buena cobertura disminuye la evaporación debido a la reducción de la temperatura del suelo y al efecto moderador de los rastrojos sobre la acción del viento. El mayor almacenaje de agua y la menor evaporación permiten disponer de más agua en el suelo para lograr un mejor desarrollo de los cultivos.

Luego de 10 años de agricultura bajo **SD y LC**, se presentaron marcadas diferencias en la disponibilidad hídrica a favor de la SD con respecto a la LC al momento de la siembra de cada cultivo

(Figura 5). En los últimos dos años evaluados, la escasa recarga del perfil en el otoño no permitió que esas diferencias fueran tan marcadas.

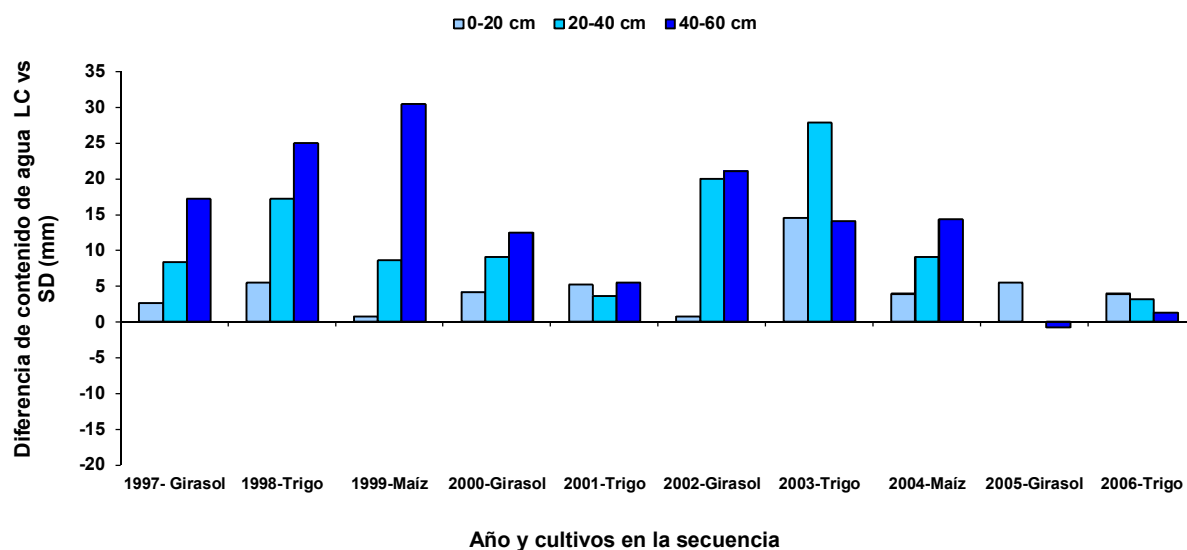


Figura 5. Diferencia en el contenido de agua en el momento de implantación de los cultivos a favor de siembra directa con respecto a labranza convencional (mm). Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Efectos sobre la disponibilidad de nutrientes: El laboreo del suelo produce una mayor mineralización de la MO, que se traduce en mayor oferta de nutrientes para los cultivos a implantar. El empleo de SD, en cambio, limita la disponibilidad de nutrientes por ausencia de remoción (Domínguez et al, 2005).

En el ensayo donde se **compararon LC y SD** bajo una rotación típica para la región, se analizó la oferta de nitrógeno (N) de nitrato (N-NO_3) previo a la siembra de los cultivos (desde 0 a 60 cm de profundidad), durante un período de 10 años.

En el suelo con prolongada historia agrícola previa se presentó una mayor oferta bajo LC desde el primer año, diferencia que se mantuvo en los años siguientes hasta desaparecer definitivamente en el décimo año (Figura 6a). La mineralización fue muy importante del año 2 al 6 donde se presentó la mayor diferencia entre labranzas ($67,2 \text{ kg.N ha}^{-1}$). Si bien en los años 7, 8 y 9 las diferencias se atenuaron, estas resultaron igualmente significativas a favor de la LC.

En el suelo más descansado, proveniente de antecesor pastura, la oferta bajo LC fue también mayor con respecto a SD hasta el año 8 (Figura 6b). Esa diferencia entre labranzas fue menos marcada en

esta situación que con el antecedente de una mayor historia agrícola, alcanzándose una diferencia máxima de $59,6 \text{ kg.N ha}^{-1}$ hacia el año 6, disminuyendo en el año 7 y desapareciendo en los 3 años finales. Si se comparan los valores promedio, la LC mineralizó $703,7 \text{ kg N ha}^{-1}$ durante los 10 años, un 47,8% superior a la SD.

Cuando se compararon las historias bajo LC, se pudieron observar diferencias entre ellas en los años 1, 2 y 6, donde el suelo más descansado ofreció una mayor disponibilidad, estabilizándose posteriormente (Figura 6c).

Bajo SD, con valores de mineralización muy inferiores, se dio la misma tendencia (Figura 6d). Se presentó un mayor suministro hasta el año 6, mostrando las ventajas de iniciar el ciclo agrícola con esta técnica en un mejor ambiente. La oferta bajo SD resultó inferior en ambas historias con relación a la LC, producto de la no remoción y menor mineralización.

En promedio, durante el período analizado, el suelo proveniente de pastura registró un aporte de $614,85 \text{ kg N ha}^{-1}$, un 9% superior al suelo con mayor historia agrícola.

Si bien la rotación empleada fue la misma para las dos situaciones en los diez años analizados, es importante mencionar que la diferente historia previa pudo haber generado variaciones en la dinámica de N por cuestiones térmicas y características de los residuos de los cultivos antecesores afectando la mineralización.

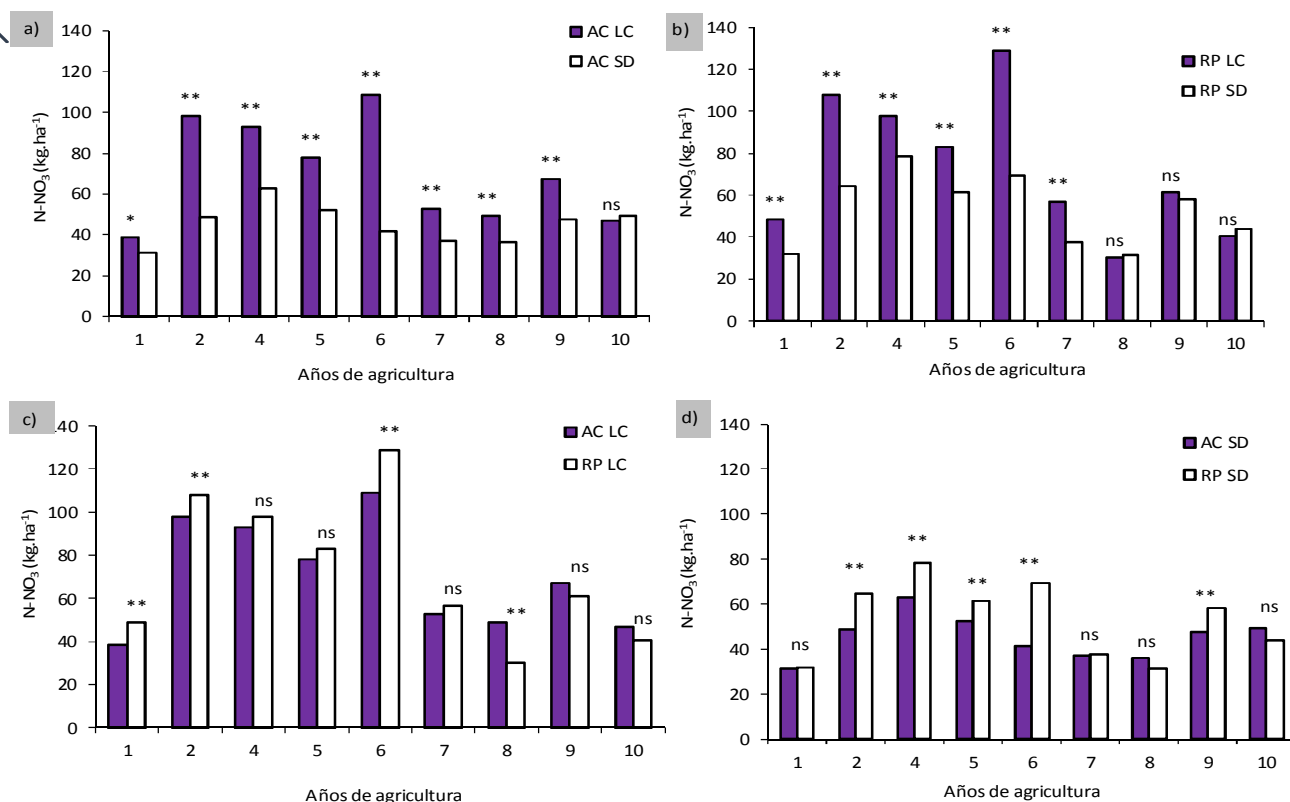


Figura 6. Evolución del contenido de nitrógeno de nitrato (N-NO_3) a la siembra de los cultivos (0-60 cm. de profundidad) para distintas historias previas (a-b) y labranzas (c-d) con el avance de la historia agrícola. Referencias=AC: agricultura continua; RP: rotación con pasturas; LC: labranza convencional; SD: siembra directa; ns: diferencias no significativas entre tratamientos; *diferencias significativas $p < 0,05$; **diferencias significativas $p < 0,01$. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Estos resultados mostraron un comportamiento diferencial para cada ambiente evaluado, donde la capacidad relativa de suministro de N varió en función del manejo a que fue sometido, poniendo en evidencia el efecto de los sistemas de labranza sobre la capacidad del suelo para entregar N a los cultivos. El laboreo permitió al suelo liberar una mayor proporción de N a partir de fracciones de la MO que quedaron expuestas por la remoción.

Ciclos agrícolas prolongados produjeron menores disponibilidades, debido probablemente, a una disminución del contenido de MO y consecuentemente del N, tal como también lo reportaron Studdert y Echeverría (2006) para suelos de Balcarce. El empleo de SD hizo evidente la menor capacidad del suelo para proveer N a los cultivos a través de los años de agricultura, indicando la necesidad de mayores dosis de fertilizante para lograr mantener los rendimientos.

Historia agrícola del lote:

Para evaluar el impacto de la agriculturización, los ensayos de larga duración de la CEI Barrow resultaron una fuente de información experimental que permitió comparar distintos ambientes y manejos en los sistemas productivos vigentes en la región. Para el caso específico del trigo, con estos ensayos se observó que, a lo largo de una historia agrícola prolongada, los rendimientos sufrieron una caída (Figura 7). Esta merma en los rindes se hizo más pronunciada cuando se emplearon secuencias de cultivos más extractivas de nutrientes.

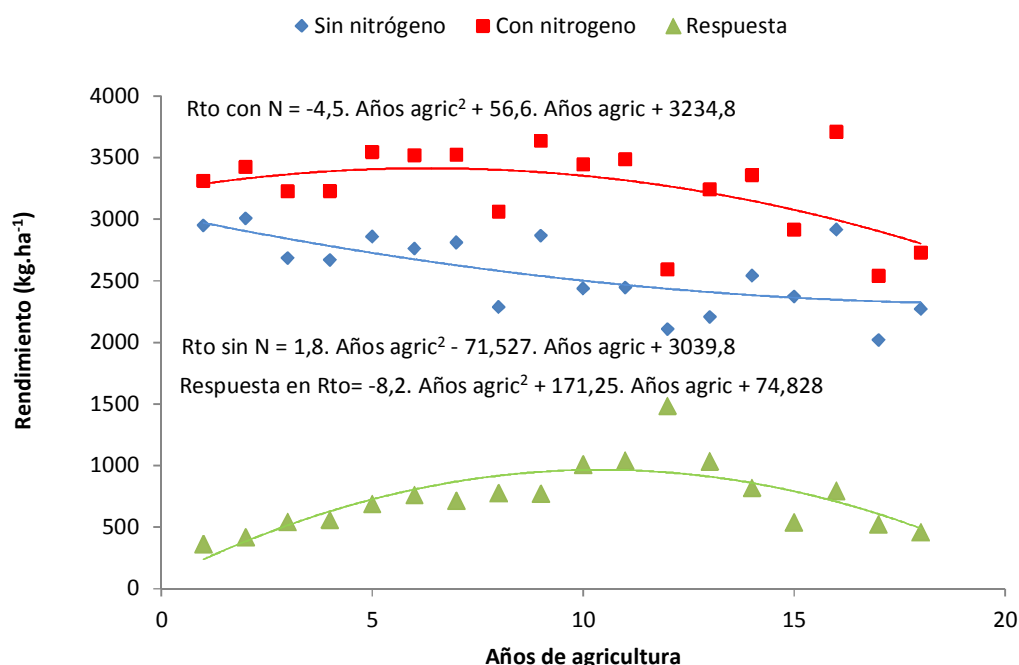


Figura 7. Variación de los rendimientos de trigo sin y con el agregado de nitrógeno, y respuesta al agregado de 46 kg.ha⁻¹ de N en función de los años bajo agricultura continua con labranza convencional (Rto: rendimiento; Años agric: años de agricultura). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Cuando la actividad agrícola se prolongó en el tiempo, los rendimientos de los cultivos comenzaron a disminuir. Entre las primeras causas que se detectaron apareció la pérdida de fertilidad química de los suelos, en especial, la deficiencia de N, confirmando la mayor dependencia de fertilizantes de los esquemas agrícolas (Forján y Manso, 2008).

Esto obligaría a un mayor uso de fertilizantes, fundamentalmente nitrogenados, además de los fosforados que habitualmente se aplican, buscando atenuar la pérdida de fertilidad de los suelos. De la figura 7 surge que cuando la historia agrícola con labranzas se extiende más allá de los 9 años,

resultaría necesario aumentar las dosis de fertilizante nitrogenado, ya que la respuesta a una dosis fija de fertilización comienza a declinar.

En síntesis, un suelo con prolongada historia agrícola demandaría mayores niveles de agregado de nutrientes para mantener los rendimientos estables. Esta mayor dependencia de insumos requiere una necesaria compatibilización del tipo de labranza, la elección de cultivos que integren la secuencia y una adecuada programación de la fertilización en la rotación. De este modo se favorecerá la sustentabilidad del sistema, conservando el recurso suelo y reduciendo la variabilidad de los rendimientos.

Cultivo antecesor

El cultivo antecesor puede modificar la disponibilidad de nutrientes (especialmente de N) y de agua en el perfil del suelo, para el cultivo siguiente en la rotación.

Los rastrojos de los cultivos antecesores también tienen una fuerte influencia. Como varían en cantidad y calidad, su presencia afecta la planificación de la fertilización nitrogenada del cultivo siguiente, no sólo por el aporte, sino también por la inmovilización de N que puedan realizar cultivos que dejan rastrojos con altas relaciones carbono (C)/N (C/N), como por ejemplo maíz, sorgo o los cereales de invierno. En este caso, los microorganismos del suelo, que utilizan N para formar su proteína, compiten con el cultivo, inmovilizando gran parte del nutriente que, así, no estará disponible. En cambio, si los rastrojos tienen una baja relación C/N como los de soja o girasol, la inmovilización del N mineral del suelo es mucho menor.

Sin embargo, las secuencias con mayor presencia de soja produjeron mayores caídas de la MO del suelo; este proceso también restringe la capacidad para mineralizar N. Por ello, el efecto favorable de corto plazo de los residuos de oleaginosas sobre la dinámica del N para el cultivo siguiente, enmascara las diferentes situaciones que se originarían en el largo plazo por la pérdida de fertilidad del suelo (Studdert y Echeverría, 2006).

La rápida descomposición de los residuos de cultivos depende también de la proporción de hidratos de C solubles presentes en los mismos. La celulosa es el componente de más fácil degradación por los microorganismos, a diferencia de los residuos con mayor proporción de lignina que demoran más tiempo.

Duración del barbecho: La duración del barbecho actúa, fundamentalmente, sobre la cantidad de agua que se puede almacenar hasta el momento de la siembra. El efecto varía con el cultivo antecesor e influye también sobre la dinámica de la descomposición de los residuos y la disponibilidad de N. Cultivos antecesores de cosecha gruesa o verano presentan barbechos más cortos previo a la siembra del trigo, período que coincide con bajas temperaturas y menor evaporación. En el caso del trigo u otros cereales de invierno como antecesores, el período de barbecho es más prolongado, favoreciendo la acumulación de agua, aunque las temperaturas del verano pueden aumentar la pérdida por evaporación. Para esta región, por lo general, durante el otoño se registra una buena recarga del perfil. Solamente se encuentran diferencias, en el agua disponible a la siembra de trigo, en aquellos años que las precipitaciones del otoño son inferiores a la normal (Tabla 3). En ese caso aquellos lotes que provienen de soja o maíz registran menor disponibilidad.

Tabla 3. Disponibilidad de nitrógeno y agua (0-60 cm) a la siembra del trigo con distintos cultivos antecesores.

Cultivo antecesor	Nitrógeno (kg.ha ⁻¹ N-NO ₃)	Agua total (mm)
Girasol	57,8	171
Maíz	37,6	165
Soja	74,5	153
Trigo	86,6	178

Fuente: Ensayo rotaciones con labranza. 2005. Chacra Experimental Integrada Barrow

Efecto sobre el rendimiento: Cuando el trigo no fue fertilizado con N, se observó un efecto del cultivo antecesor sobre el rendimiento. En base a esto y evaluando todas las situaciones originadas en los ensayos de larga duración, se pudo establecer que los antecesores que produjeron un mejor comportamiento en el trigo posterior fueron pastura, girasol, soja, colza (*Brassica napus*), cereales de invierno (avena (*Avena sativa*), trigo, cebada (*Hordeum vulgare*)) y maíz, en ese orden (Figura 8a). Cuando todas estas situaciones fueron comparadas con el agregado de fertilizante nitrogenado, las diferencias entre antecesores desaparecieron y los rendimientos se igualaron (Figura 8b).

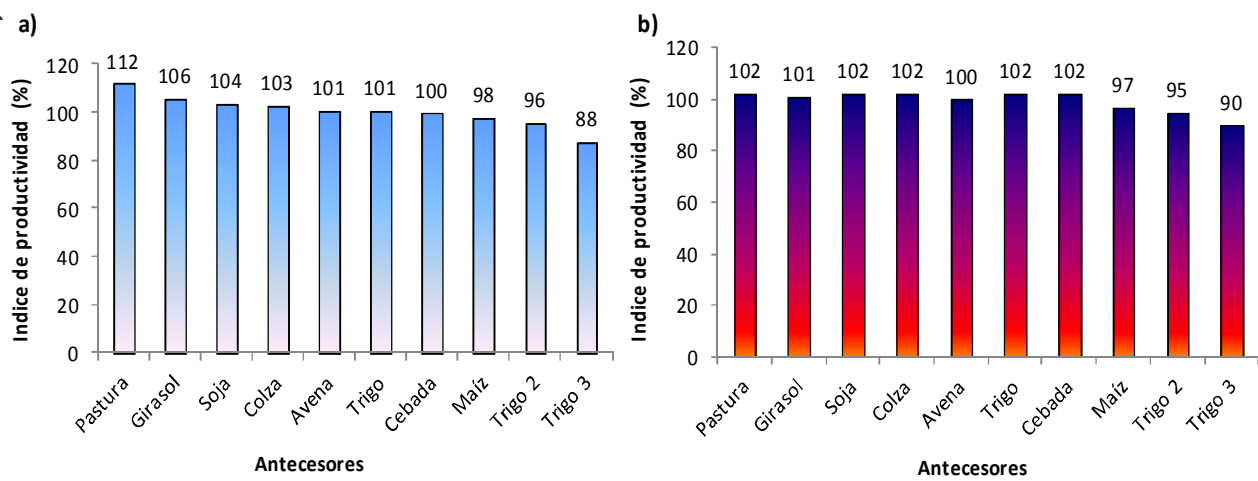


Figura 8. Efecto del cultivo antecesor sobre el rendimiento relativo de trigo sin nitrógeno (a) y con 46 kg.ha-1 de nitrógeno (b). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

El rendimiento del cultivo antecesor también es un parámetro de gran importancia por su incidencia en el balance de nutrientes del sistema (Lázzaro, 1996; Studdert y Echeverría, 2006). Altos rendimientos del antecesor requieren ajustar la fertilización dependiendo de la historia agrícola que presenta el lote. Las respuestas a la fertilización nitrogenada del trigo que se siembra serán diferentes de acuerdo con la historia agrícola del lote y el rendimiento del cultivo antecesor (Figura 9).

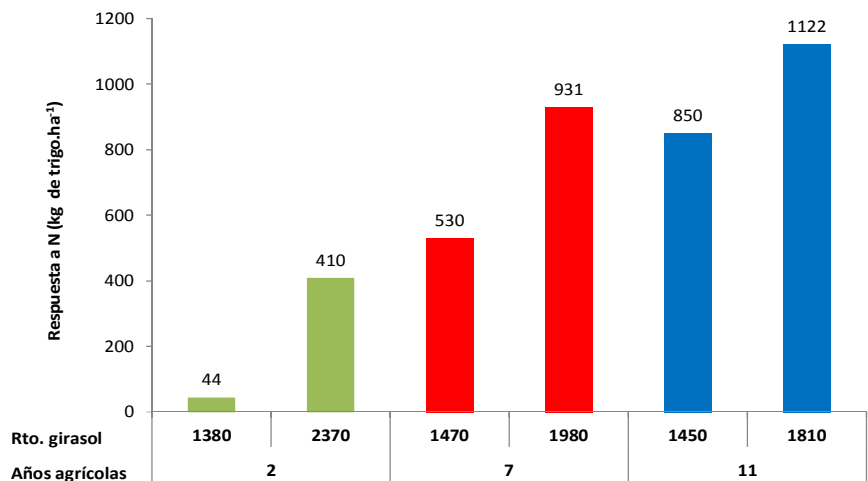


Figura 9. Incidencia del rendimiento del cultivo antecesor (girasol) sobre la respuesta de trigo a la aplicación de nitrógeno (N), en las situaciones con 2, 7 y 11 años de historia agrícola (Rto: rendimiento de girasol). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow

Cuando una pastura fue roturada para sembrar girasol y trigo al año siguiente (2º año de historia agrícola), la respuesta que se obtuvo ante la fertilización nitrogenada en trigo fue superior en la situación donde el girasol obtuvo un mayor rendimiento (Figura 9). Esa producción más elevada de grano de la oleaginosa necesitó un mayor consumo de nutrientes, por lo que los niveles en el suelo quedaron más reducidos. Si el rendimiento del girasol fue bajo, la extracción resultó menor y los niveles de nutrientes en el suelo fueron poco afectados. Por lo tanto, la respuesta a la aplicación de N al trigo fue muy baja y, en esta situación, no resultó económico ni necesario aplicar fertilizantes. Por otro lado, a medida que la historia agrícola previa fue más prolongada (7 y 11 años, Figura 9), las respuestas al agregado de N resultaron mayores cuanto más elevado fue el rendimiento del cultivo precedente.

Se puede resumir que la historia del lote y el cultivo antecesor tienen importancia a la hora de decidir la siembra de un cultivo en la secuencia, ya que inciden sobre el balance de los nutrientes que quedan disponibles para el cultivo siguiente. Un suelo descansado (pastura en su historia reciente), al ofrecer una mayor fertilidad, va a evitar o reducir la aplicación de fertilizantes, mientras que, en el otro extremo, un suelo con prolongada historia agrícola exigirá un mayor ajuste en los nutrientes y las dosis a aplicar. El tener presente estas consideraciones, nos permitirá ajustar previamente ciertas variables del cultivo que colaboren en el objetivo de alcanzar una producción estable.

La rotación con pasturas

La presencia de pasturas durante el ciclo ganadero de la rotación, provee una serie de ventajas, en especial sobre el suelo, que no siempre son tenidas en cuenta. Además de la productividad animal que se puede obtener con ellas, y que puede ser mejorada hasta niveles de eficiencia superiores a los actuales, la pastura produce un beneficio sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo. Su presencia contribuye a preservar el recurso y permitir que se pueda seguir realizando una producción sostenible sobre estos suelos, atenuando los efectos de la agricultura convencional (Forján, 2000).

Las pasturas de base alfalfa con gramíneas cumplen un rol muy importante en las rotaciones ya que, por sus características de producción de biomasa vegetal y de distribución de raíces en el suelo, garantizan la reposición de C orgánico e incrementan el pool de nutrientes para los cultivos. Esto, sumado a la acción física de sus raíces y al mantenimiento de una cobertura total del suelo, mejora

significativamente las propiedades físicas y químicas alteradas durante el ciclo agrícola, reduciendo los procesos de erosión y recuperando la calidad del suelo (Studdert et al, 1997).

Cultivos como trigo (Figura 8), maíz, girasol, y soja presentaron los mejores rendimientos cuando fueron sembrados en lotes provenientes de pastura, comparativamente con otros antecesores, reafirmando la positiva incidencia que una pastura de base alfalfa tiene sobre la dinámica del N para los cultivos que siguen en la secuencia. La capacidad de esta especie leguminosa de fijar N atmosférico a través de las bacterias que establecen simbiosis y forman nódulos en sus raíces (fijación biológica de nitrógeno, FBN), permite adicionar en forma biológica este nutriente al sistema. La concentración de N del suelo aumentó proporcionalmente con la duración de la leguminosa forrajera hasta el cuarto año, teniendo en cuenta que, por lo general, a partir de ese año se registran importantes pérdidas en el stand de plantas de alfalfa en las pasturas de la región (Forján, 2000).

El aporte de N por FBN en Barrow fue calculado en un 54% respecto del contenido total de N acumulado en biomasa aérea de alfalfa (Racca y Gonzalez, 2007). Para los suelos característicos de la región, la FBN, que es un proceso muy dependiente de la disponibilidad hídrica, presentó valores que oscilaron entre $102 \text{ kg N.ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para años con limitaciones hídricas y una producción de forraje de $5800 \text{ kg MS.ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta valores superiores a $200 \text{ kg N.ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ cuando la producción de forraje superó los $10000 \text{ kg MS.ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Duhalde, J. 2010. comunicación personal).

La disponibilidad del N fijado por la alfalfa para los cultivos que iniciaron el ciclo agrícola, se manifestó significativamente en los primeros 6 años de la secuencia (Figura 6), aunque dependió del tipo de labranza empleado. Para analizar la magnitud de ese beneficio, se evaluaron las respuestas a la fertilización nitrogenada de trigos que fueron implantados en diferentes momentos del ciclo agrícola luego de pasturas de distinta duración (Figura 10). Si bien ese efecto restaurador de las pasturas pareció relativamente corto en el tiempo, la magnitud de la respuesta a la fertilización estuvo íntimamente ligada al tipo de cultivo incluido en la rotación y a los rendimientos que se obtuvieron.

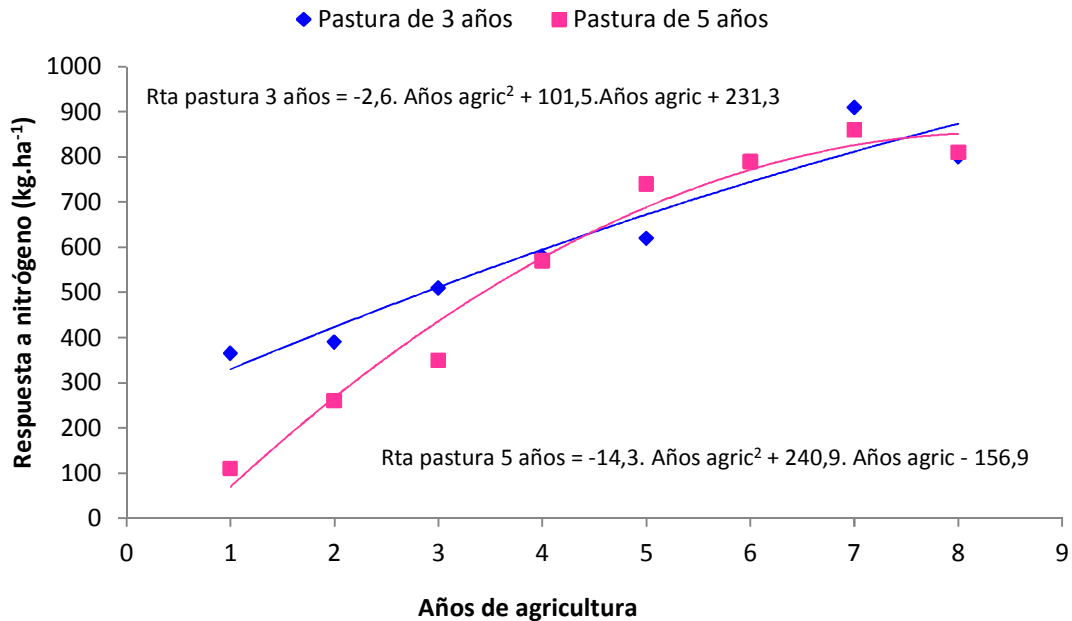


Figura 10. Respuesta de trigo a la fertilización nitrogenada luego de un período de 3 y 5 años de pastura (Rta: respuesta; Años agric: años de agricultura). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Además de la compensación de rendimiento registrada por la presencia de pasturas en la rotación, en los primeros años del ciclo agrícola también se observaron incrementos en los niveles de proteína en grano, factor que ha cobrado importancia desde su inclusión en el estándar de comercialización de trigo pan (Tabla 4). Estos resultados permitieron demostrar la importancia de la presencia de pasturas en la rotación a partir de un aporte eficiente y ambientalmente seguro de un elemento como el N, a través de la fijación biológica.

Tabla 4. Porcentaje de proteína en grano de trigo, según años de agricultura, con (Con N) y sin (Sin N) la aplicación de fertilizante nitrogenado. Fuente: Ensayo Rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Ubicación del trigo en la rotación agrícola luego de pastura	% proteína en grano	
	Sin N	Con N
1	13,6	14,1
2	13,1	14,0
3	12,7	13,6
4	11,9	12,6
5	9,4	10,4
6	8,4	9,3

Cultivos de cobertura

El reducido aporte de rastrojos de los cultivos oleaginosos y su elevada tasa de descomposición (baja relación C/N), origina balances negativos de MO, así como también, escasa cobertura de los suelos en aquellas rotaciones en las cuales son los cultivos predominantes. Una alternativa para incrementar el aporte de residuos en secuencias con alta participación de oleaginosas es la incorporación de cultivos de cobertura (CC). Éstos se implantan entre dos cultivos de cosecha, y no son pastoreados ni cosechados, por lo cual aportan abundante biomasa y al permanecer sobre la superficie, protegen al suelo de procesos erosivos (Ruffo y Parsons, 2004).

La presencia de un CC mejora la infiltración del agua de lluvia debido al incremento de macro y mesoporos originados por sus raíces; también disminuye la amplitud térmica en superficie, mejorando la eficiencia del uso del agua y aumentando la disponibilidad para el cultivo agrícola siguiente (Carfagno et al, 2013), siendo necesario ajustar el momento de secado. Otras ventajas de su utilización se relacionan con la posibilidad de i) disminuir la pérdida de nutrientes móviles, tales como N-NO_3^- y azufre (S) de sulfato, que ocurre principalmente en los otoños lluviosos; ii) cuando se emplean especies leguminosas, la FBN permite reducir el empleo de fertilizantes, y iii) la presencia de un sistema radical vivo que mantiene la actividad biológica del suelo, mejora aspectos relacionados a la fertilidad edáfica.

En el tercer ciclo del ensayo de **Rotaciones en SD**, fueron incluidos CC invernales, con el objetivo de incrementar los aportes de C, mejorar la infiltración y reducir las pérdidas por evaporación a través de la generación de cobertura. Las especies utilizadas fueron avena consociada con vicia (*Vicia sativa* L.), y se compararon los efectos de la incorporación del CC con una situación tradicional de la zona, como es el pastoreo del verdeo de invierno previo a la siembra del cultivo de cosecha gruesa.

Resultados de esta primera experiencia mostraron que la presencia del CC produjo un mayor consumo de N y una mayor eficiencia en la utilización del agua con relación al tratamiento pastoreado, aspectos que se vieron reflejados en la producción de biomasa y el rendimiento del cultivo siguiente en la secuencia (girasol) (Figuras 11 a y b). La continuación de esta práctica en el tiempo permitirá evaluar la evolución de la presencia del CC y sus efectos sobre el sistema de producción.

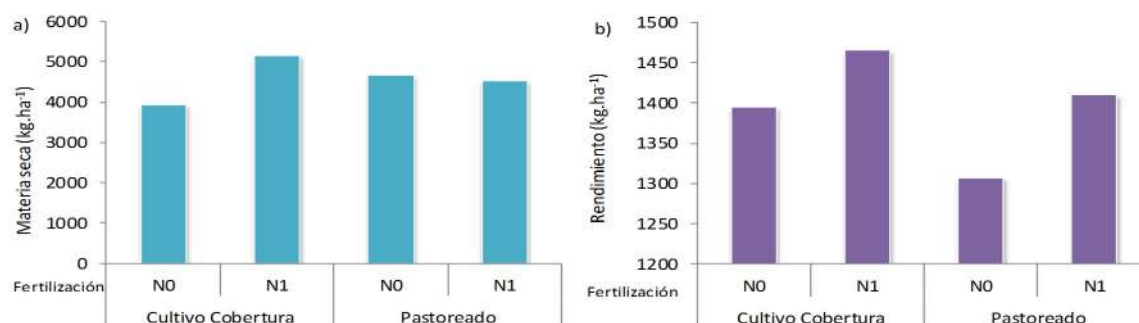


Figura 11. Producción de materia seca (a) y rendimiento de girasol (b), fertilizado con nitrógeno (N1) y sin fertilizar (N0), según manejo del cultivo de avena-vicia previo. Fuente: Ensayo rotaciones en SD. Chacra Experimental Integrada Barrow.

El doble cultivo. Siembras de “segunda”

En los últimos años se ha generalizado en la región la siembra de cultivos de verano inmediatamente después de cosechado el cultivo de siembra otoño-invernal. La práctica se ha visto favorecida por la difusión de la SD, y la buena rentabilidad de las oleaginosas estivales.

Sin embargo, la decisión de efectuar un cultivo oleaginoso de verano (soja o girasol) llamado “de segunda” sobre rastrojos de cereales de invierno (avena, cebada, trigo) o colza, implica la aceptación de implantarlo en un período que no es el óptimo. Las condiciones ambientales a las que es expuesto un cultivo sembrado tarde, varían con relación a la siembra en fechas tempranas, por lo que estos cambios inciden sobre el crecimiento, desarrollo y posterior rendimiento (Andrade y Sadras, 2000).

Diferencias en la incidencia de radiación, temperatura y duración del día (fotoperíodo) afectan, de distinta manera, las etapas fenológicas de cada uno de los cultivos, provocando reducción en los rendimientos, aún en ambientes sin limitaciones de humedad. Experiencias realizadas en la CEI Barrow determinaron una disminución de 28 kg·ha⁻¹·día⁻¹ cuando la siembra de soja se realizó después del 25 de noviembre. En la región de Balcarce se ha encontrado una reducción del rendimiento de hasta 60 kg·ha⁻¹·día⁻¹ con siembras posteriores al 25 de diciembre (Calviño et al, 2003; Caviglia, 2005). Esta afectación se fundamenta en un menor número de granos fijados por unidad de superficie y menor peso individual del grano. La tecnología disponible para atemperar esta disminución de rendimiento, se basa en aspectos de manejo de los cultivos tardíos como la densidad, el espaciamiento y la elección de cultivares.

A los condicionantes ecofisiológicos mencionados para los cultivos de “segunda”, debe agregarse la disponibilidad de agua en el momento de la siembra y el balance de agua durante todo el ciclo del

cultivo para que las oleaginosas puedan expresar su potencial productivo. En nuestra región, es muy común la escasez hídrica en el momento de la implantación, parámetro modificado generalmente por el tipo de cultivo antecesor de cosecha fina y su consumo en la etapa final del ciclo (Tabla 5). Esta disponibilidad inicial generalmente condiciona el éxito de la implantación del cultivo de “segunda”, agravado en muchos sectores de la región por la limitante en profundidad de los suelos, que disminuye la capacidad de almacenaje de agua.

Tabla 5. Contenido de agua en el suelo (% en peso) previo a la siembra de cultivos estivales de “segunda”. Fuente: Ensayo Rotaciones en Siembra Directa 2006/07. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Agua en el suelo (%)			
Profundidad	Antecesores		
	Colza	Cebada	Trigo
0 - 10 cm	11,6	12,8	12,3
10 - 20 cm	15,3	15,4	13,9
20 - 40 cm	11,1	13,4	12,7
+ de 40 cm	12,4	16,2	14,5

No obstante, debe tenerse en cuenta que cuando se intensifica la rotación, se incrementa la demanda anual de agua y nutrientes. Si bien la SD disminuye la evaporación, mejora la captación y almacenamiento de agua y, por lo tanto, permite disponer de mayor cantidad de milímetros de agua en el perfil, éstos deben ser estratégicamente utilizados para asegurar el éxito del doble cultivo.

En general, las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de segunda, presentan una buena distribución en función de su demanda, resultando favorecidos, además, porque el período crítico de floración se desplaza hacia momentos de menor evapotranspiración.

La nutrición del doble cultivo debe ser evaluada teniendo en cuenta las necesidades de ambos cultivos. Distintas experiencias realizadas en la región (Zamora et al., 2002), indican que cuando se intensifica la agricultura sobre estos suelos, las fertilizaciones balanceadas se presentan como más factibles desde el punto de vista de la sustentabilidad del sistema de producción, teniendo en cuenta la residualidad de nutrientes en el suelo.

Se pudo observar un mejor comportamiento de soja con respecto a girasol al sembrarlos paralelamente sobre rastrojos de cultivos de invierno. A su vez, la implantación sobre aquellos cultivos que desocupan el lote anticipadamente con relación al trigo (avena, cebada, colza), posibilitó

una menor pérdida de rendimiento potencial. Esto pudo verse en la mayoría de los años analizados, donde el rendimiento de soja de “segunda” sobre antecesor trigo alcanzó sólo el 46% del promedio de los antecesores cebada y colza, aún en aquellos años de muy baja producción de la soja, e independientemente de los rindes alcanzados por el cultivo de invierno previo (Tabla 6).

Tabla 6. Rendimientos (Rto) de soja de segunda y de diferentes antecesores. Campañas 2006/07 y 2007/08

Campaña	Cultivo invierno	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	Cultivo verano	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)
2006/07	Colza	740	Soja	2510
	Cebada	3745		2740
	Trigo pan	2445		1210
2007/08	Colza	1215	Soja	240
	Cebada	2380		230
	Trigo pan	1650		110

Fuente: Ensayo Rotaciones en SD. Chacra Experimental Integrada Barrow

Los márgenes económicos realizados mostraron una gran amplitud entre los valores registrados en las campañas evaluadas. Si bien los resultados presentados reflejan situaciones extremas, los mismos permiten visualizar la disparidad que se puede presentar en el resultado final (Figura 12). Al considerar todas las combinaciones para los rendimientos y precios tomados en cuenta al realizar el análisis, el mayor margen bruto correspondió, en gran parte de los años, al doble cultivo cebada-soja.

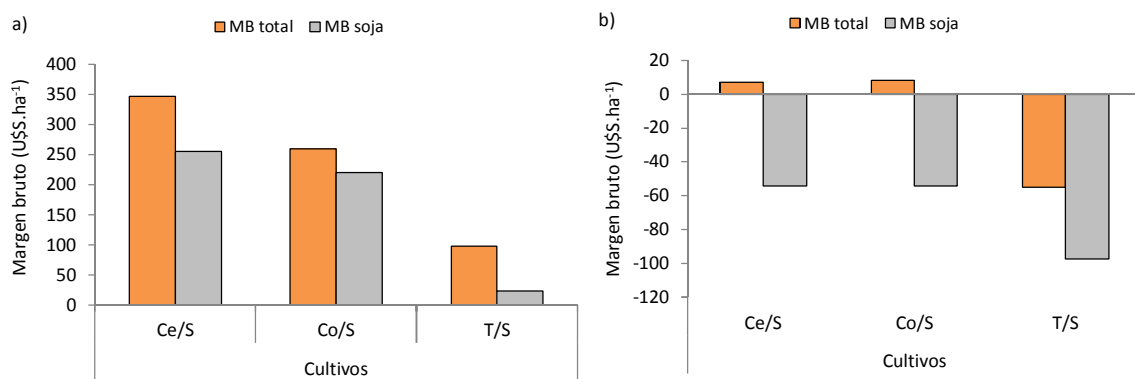


Figura 12. Margen bruto de los dobles cultivos cebada/soja (Ce/S), colza/soja (Co/S) y trigo/soja (T/S), para las campañas a) 2006/07 y b) 2007/08. Fuente: Ensayo Rotaciones en SD. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Se puede concluir que en los sistemas de producción de la región centro-sur de Buenos Aires, la búsqueda de mayor productividad con el doble cultivo anual se presenta como una alternativa

interesante por la eficiencia en el uso de los recursos (Forján y Manso, 2008) y su aporte a la diversificación e intensificación del sistema de producción. Sin embargo, las experiencias no han sido, en general, lo suficientemente exitosas como para recomendar en forma segura una siembra de este tipo.

Si bien el doble cultivo requiere un mayor aporte de insumos para lograr una segunda cosecha que muchas veces resulta incierta en la región, desde el punto de vista del mantenimiento productivo del sistema de producción, resulta una práctica beneficiosa ya que a lo largo del año se suma el aporte de rastrojos de dos cultivos, resultando en un balance positivo de C (Manso y Forján, 2006). En los últimos años se está evaluando la inclusión de gramíneas (maíz o sorgo tardío) como variante a cultivos precedentes como colza o arveja (*Pisum sativum*).

La rotación de cultivos y los nutrientes

En coincidencia con el incremento de la agricultura en la región, se comprobó la disminución de los niveles de fertilidad química de los suelos, a partir de la declinación de los rendimientos a medida que se prolongaron los ciclos con cultivos de cosecha. A la conocida respuesta a la fertilización fosfatada producto de los bajos niveles originarios de estos suelos, se sumó la respuesta de los cultivos, especialmente las gramíneas, a la aplicación de fertilización nitrogenada. En general, en toda la región pampeana, se mencionó a la pérdida de N edáfico como una de las causas del deterioro del suelo y se señaló a la remoción por parte de los cultivos como principal causa (Gudelj et al, 2006). El diagnóstico de fertilidad comenzó a ser empleado como una herramienta de suma importancia, considerando la demanda nutricional de los cultivos y la oferta del suelo.

El aumento del rendimiento potencial en todos los cultivos, por efecto de grandes progresos genéticos en ese aspecto, produjo aumentos de requerimientos (García y González San Juan, 2006) y déficit de nutrientes en el sistema (Ciampitti y García, 2009), representando un factor cada vez más limitante para la productividad. Por ello, la fertilización pasó a ser una práctica necesaria en la región. Posteriormente y considerando todos estos factores, se comenzó a analizar el balance entre fertilización y extracción, y a manejar el concepto de reposición de nutrientes para mantener o mejorar la fertilidad natural (Ferraris, 2003).

Extracción de nutrientes: De la información obtenida a partir de los ensayos de rotaciones de la CEI Barrow, se determinó la extracción de nutrientes de los cultivos empleados en distintos sistemas de producción. Ésta varió de acuerdo con el rendimiento obtenido, el nivel de proteína de los granos, la historia previa del lote y las condiciones meteorológicas, como se muestra en la Tabla 7 para el caso del N. Los resultados obtenidos mostraron poca variación en los niveles de extracción en cultivos como trigo y girasol, en los que el porcentaje de proteína estuvo inversamente relacionado al rendimiento. En cambio, la exportación resultó elevada para maíz y soja con directa dependencia del rendimiento obtenido.

Tabla 7. Extracción de nitrógeno (Extrac.N) por los cultivos en suelos con distinta historia previa: agricultura permanente (Agr. perm.) y rotación con pasturas-sistema mixto (S. mixto) para años con diferentes condiciones hídricas. Rto: rendimiento. Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas Ciclo 1 Chacra Experimental Integrada Barrow.

Cultivo	Historia	Año Normal			Año Seco			Año Húmedo		
		Proteína %	Rto (kg.ha ⁻¹)	Extrac. N (kg.ha ⁻¹)	Proteína %	Rto (kg.ha ⁻¹)	Extrac. N (kg.ha ⁻¹)	Proteína %	Rto (kg.ha ⁻¹)	Extrac. N (kg.ha ⁻¹)
TRIGO	Agr. perm.	10,9	2780	48,6	13,8	1920	41,8	9,7	3530	64,8
	S. mixto	11,3	2880	63,6	14,1	2160	48,7	10,2	3680	60
GIRASOL	Agr. perm.	12,3	2376	48,7	17,0	1605	40,9	12,8	2680	62,8
	S. mixto	14,6	2103	49,1	16,9	1280	34,8	16,0	2660	63,8
MAÍZ	Agr. perm.	8,1	4770	61,8	10,1	1680	27,1	7,9	7820	93,8
	S. mixto	10,9	4890	86,2	11,4	1710	31,2	9,4	7980	119,7
SOJA	Agr. perm.	31,8	1920	97,7	34,6	1240	68,6	31,4	2340	117,6
	S. mixto	36,3	1890	108,7	38,4	1170	71,9	34,0	2690	146,3

Cuando se analizó la extracción de los dos macronutrientes más importantes para la producción de granos, N y fósforo (P), durante 18 años en las secuencias agrícolas con labranzas, los valores variaron con el cultivo realizado y el rendimiento obtenido. Así, la exportación para cada secuencia presentó valores muy diferentes, según los cultivos que fueron incluidos (Figura 13).

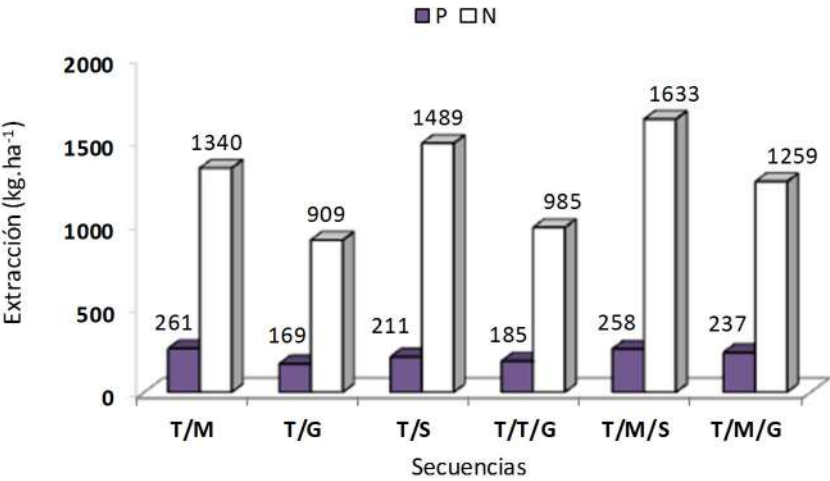


Figura 13. Exportación de fósforo (P) y nitrógeno (N) para cada secuencia en 18 años). T: trigo M: maíz G:girasol S:soja. Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

La composición de la secuencia y los rendimientos logrados incidieron directamente en la exportación de nutrientes. La concentración de la mayoría de los nutrientes en grano fue mayor en las oleaginosas que en las gramíneas y se incrementó asociada al contenido de proteína, siendo menor para maíz (Prot.:9,7%), y obteniéndose progresivamente mayores valores para trigo (Prot.:11,5%), girasol (Prot.:18,4%) y soja (Prot.:39,5%)*. Por tal razón, el grano de soja puede contener hasta el doble de concentración de muchos nutrientes con relación a los cereales (Berardo, 2004). Con los valores promedio se establecieron los niveles de exportación para cada cultivo (Figura 14).

*Análisis realizados en laboratorio de calidad industrial de la CEI Barrow.

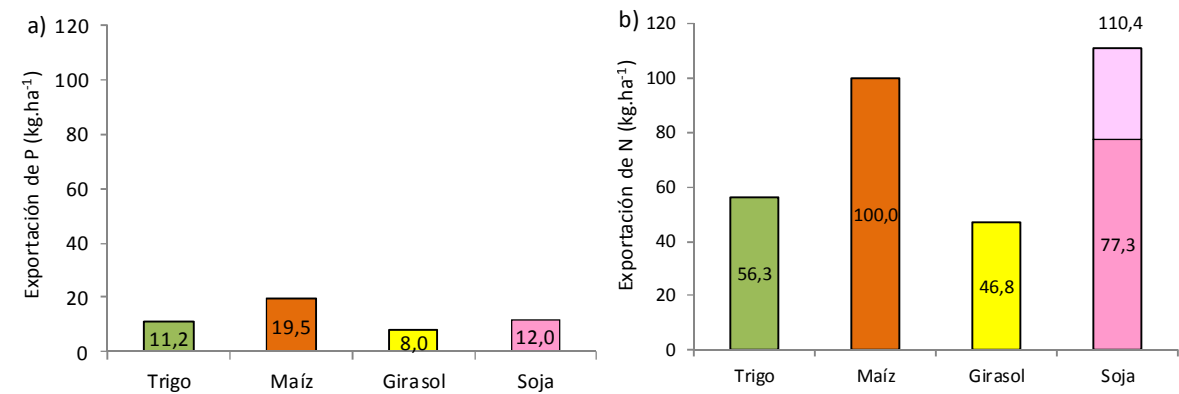


Figura 14. Exportación promedio anual de: a) fósforo (P) y b) nitrógeno (N) para cada cultivo. En soja se consideró la reposición por fijación biológica (30%=color más claro). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Aporte por fertilización: El aporte de nutrientes se realizó a través de niveles de fertilización considerados medio-altos con respecto a las dosis comúnmente empleadas en la región, tomando en cuenta el análisis de suelo previo y la expectativa de un rendimiento relativamente alto. Todos los cultivos fueron fertilizados con P a la siembra y sólo las gramíneas con N, aunque en el último ciclo también lo fue el girasol. Al momento de diagramarse este ensayo, otros nutrientes no resultaban deficientes y fueron provistos por el suelo a partir de la mineralización de la MO.

En el período analizado, en promedio para todos los años, se aplicaron 16 unidades ha^{-1} de P bajo la forma de fosfato diamónico (DAP) a la siembra para trigo y 18 unidades ha^{-1} para maíz, efectuándose un posterior aporte de 56 y 60 unidades ha^{-1} de N aplicados bajo la forma de urea, respectivamente. En el caso de las oleaginosas, promediando todas las situaciones, se aplicaron a la siembra 9 y 14 unidades ha^{-1} de P para girasol y soja respectivamente, como DAP. En el último ciclo, el girasol también fue fertilizado con N (promedio 34 unidades ha^{-1} de N como urea).

Balance de P y N: La dosis de fertilizante empleada cada año y para cada cultivo en relación a la exportación de nutrientes, permitió efectuar un balance con el propósito de establecer el nivel de reposición de P y N que se alcanzó en cada una de las secuencias. Se observó que, con las dosis empleadas, los niveles de P aplicados resultaron suficientes para reponer lo extraído por los cultivos en las distintas secuencias, durante el período evaluado. Para algunas secuencias, el excedente permitió elevar la concentración de este elemento en el suelo. Sin embargo, aparecieron notorias deficiencias de N, especialmente en aquellos tratamientos en que se incluyeron oleaginosas (principalmente soja) que no fueron fertilizadas con N, y cuando el maíz alcanzó rendimientos elevados, resultando escasas las dosis aplicadas (Tabla 8, Figura 15).

Tabla 8. Resultados del balance de fósforo y nitrógeno ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) para distintas secuencias bajo labranza convencional, en un período de 18 años (T: trigo; M: maíz; G: girasol; S: soja). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas Chacra Experimental Integrada Barrow

Secuencia	Fósforo	Nitrógeno
	$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	
T/M	33,1	-8,3
T/G	59,4	-85,0
T/S	65,2	-725,3
T/T/G	65,1	-12,6
T/M/S	18,6	-684,1
T/M/G	12,7	-264,8

Aquellas secuencias con mayor presencia de soja mostraron balances de N marcadamente negativos, lo cual se explicó por el elevado porcentaje de proteína que presenta su grano y el bajo aporte de fertilizante nitrogenado recibido. Este mayor desbalance de N se dio aun considerando una FBN estimada en 40% de las necesidades del cultivo para la región (González, 2002; Salvaggiotti et al, 2015), habiendo obtenido el nutriente restante del propio suelo (García, 2003; Forján, 2004) (Figura 15).

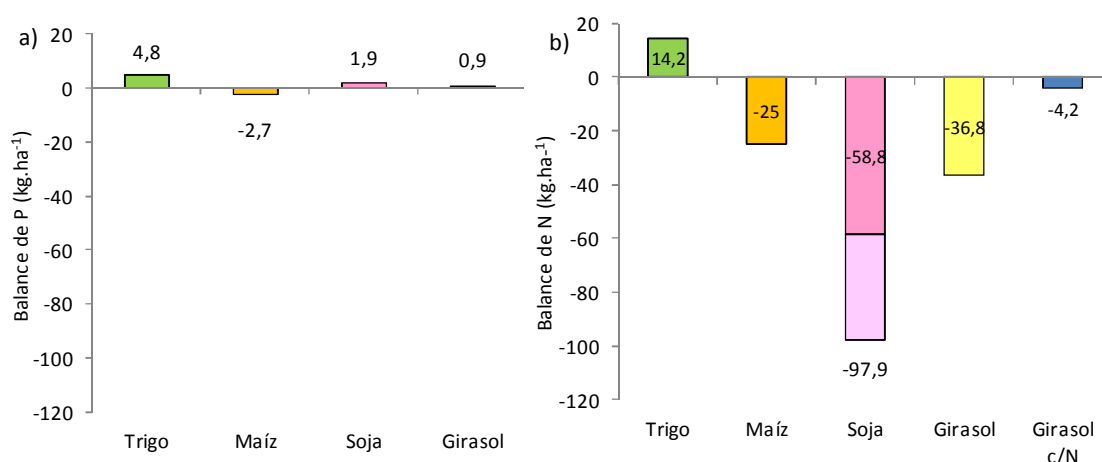


Figura 15. Balance de: a) fósforo (P) y b) nitrógeno (N), promedio para cada cultivo por año. En soja se consideró la reposición por fijación biológica (40%=zona más clara). (Girasol c/N: girasol fertilizado con nitrógeno). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Analizando los valores presentados en la Figura 15, se pudo estimar que, con las dosis de fertilizante utilizadas, se pudieron cubrir las necesidades de P de todos los cultivos. Para N, los niveles de fertilización aplicados resultaron suficientes para el cultivo de trigo, mientras que en maíz, el déficit presentado haría necesario un ajuste en la dosis (+25 unidades.ha⁻¹) para reponer lo que el cultivo extrajo en promedio. En girasol, la fertilización realizada en el último ciclo, estaría mostrando un valor de reposición cercano al necesario para cubrir los requerimientos de N. El cultivo de soja, en cambio, está asociado a un resultado deficitario en el balance de N del suelo como consecuencia de su incapacidad para fijar biológicamente todo el N que exporta con los granos y su falta de respuesta a la fertilización nitrogenada (Ferrari, 2010).

Para los rendimientos obtenidos en el estudio, el déficit de N en soja equivalió a una pérdida de 60 US\$.ha⁻¹ (considerando un costo de US\$ 1000.Mg⁻¹ N). Estos valores coinciden con estimaciones sobre el consumo de nutrientes realizadas en suelos de la Región Pampeana, confirmando balances negativos para soja (Ventimiglia et al, 2000; Ferraris, 2003; Cordone y Martínez, 2004). En la medida

que el cultivo de soja tuvo una mayor presencia en la secuencia, se acentuó el déficit de N, deteriorando la fertilidad del suelo y acelerando la mineralización y pérdida de MO.

Evolución de otros parámetros químicos: De los balances de nutrientes analizados surgió que los niveles aplicados de P permitieron reponer lo extraído por la mayor parte de los cultivos. Eso determinó un mantenimiento y en algunos casos, una mejora de los valores de este elemento cuantificados al final de la secuencia agrícola. Cuando se incluyeron esquemas mixtos con presencia de verdeos o pasturas de distinta longitud, los valores finales resultaron menores que los de los esquemas agrícolas (Tabla 9), ya que las pasturas fueron fertilizadas con P solamente en la implantación, confirmando la importante demanda de este elemento por parte de las forrajeras leguminosas y la exportación por el pastoreo (García, 2000).

Tabla 9. Valores de fósforo (P) y pH para distintas secuencias bajo labranza convencional.

Ensayo Pastura vs Agricultura continua			Ensayo Rotaciones con labranzas		
	P	pH		P	pH
<i>Inicial (1982)</i>	13,2	6,5	<i>Inicial (1994)</i>	17,3	6,3
<i>Secuencias (1993)</i>			<i>Secuencias (2011)</i>		
Agric. Normal	17,3 a	6,3	T/M	19,9 cd	6,3
Agric. Intensa	19,9 a	6,2	T/G	19,2 d	5,5
Mixto verdeos	12,0 b	6,3	T/S	23,0 a	5,7
Mixto P.C	7,2 cd	6,5	T/T/G	21,3 bc	5,7
Mixto P.L	9,8 bc	6,5	T/M/S	21,7 ab	5,7
			T/M/G	21,5 b	5,8

T:trigo; M:maíz; G:girasol; S:soja; P.C:pastura corta; P.L:pastura larga. Letras distintas indican diferencias significativas entre secuencias ($p=0.05$). Fuente: Ensayo rotaciones Chacra Experimental Integrada Barrow.

Otro parámetro de importancia es el nivel de acidez del suelo. Su variación se debe a factores naturales (lavado de bases de intercambio por las lluvias, reemplazo por cationes ácidos en la capa arable; descomposición de los residuos orgánicos que liberan ácidos; FBN que libera hidrógeno a la solución del suelo) o a causa de la acción del hombre (laboreo del suelo que aumenta las pérdidas de bases y la mineralización del N orgánico, lo que se traduce en aumento del ion hidrógeno y la caída del pH natural del suelo; y la aplicación de fertilizantes) (Campillo y Sadzawka, 2005). Los fertilizantes amoniacales (fosfato de amonio) y amídicos (urea), inducen a una acidificación debida al proceso de nitrificación del amonio. La intensidad de esta acidificación está regulada por la cantidad de fertilizante aplicado y el manejo dado al suelo.

En los ensayos con labranzas no se observaron diferencias significativas debidas a los distintos tratamientos empleados, aunque la acidificación aumentó con respecto al valor inicial. En cambio, bajo SD, los tratamientos agrícolas con mayor fertilización acumulada, aumentaron la acidez luego de 15 años (Tabla 10).

Tabla 10. Valores de pH para distintas secuencias luego de 15 años bajo siembra directa. (Suñer, 2015). Ensayo Rotaciones en Siembra Directa. Chacra Experimental Integrada Barrow (Conservac: conservacionista; Rot: rotación). Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas al $p=0,05$.

Secuencia	Manejo	Profundidad			
		0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	0-20 cm
1	Agrícola conservac.	6,1ab	6,0ab	6,1a	6,1
2	Rot con pasturas	6,4bc	6,3bc	6,4a	6,4
3	Agrícola de invierno	5,9a	5,9a	6,2a	6,0
4	Rot con verdeos	6,2ab	6,2ab	6,3a	6,2
5	Agrícola intenso	6,0ab	6,1ab	6,2a	6,1
Testigo	Parque	7,0c	6,8c	6,7a	6,8

Considerando todos los parámetros analizados en esta sección, y aceptando que las dosis de fertilizantes empleadas se corresponden con las aplicadas por un productor medio de la región, se infiere que la fertilización efectuada cubriría gran parte de las demandas en algunos nutrientes (P por ejemplo) mientras que en otros, como N, las dosis empleadas deberían ajustarse para las gramíneas y comenzar a considerarse en oleaginosas como girasol y colza. La planificación deberá efectuarse considerando los requerimientos de los cultivos pero también atendiendo a reponer lo que se exporta del sistema con los granos, con el propósito de mantener la fertilidad de los suelos y preservar la calidad ambiental, factores que deben ser considerados con el objetivo de lograr una mayor estabilidad del sistema productivo regional.

La rotación de cultivos y la materia orgánica del suelo

La MO es un componente fundamental del suelo, ya que de ella dependen muchas de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Está constituida por un 58% de carbono, por lo que comúnmente es indistinto hablar de MO humificada o carbono del humus (Alvarez y Steinbach, 2010).

La presencia de pasturas en la rotación es de vital importancia, ya que por sus características de producción de biomasa vegetal y de distribución de raíces, posibilita recomponer el contenido de MO

del suelo (Forján, 2000; Eiza et al, 2006). Bajo pastura hay menor remoción del suelo, elevada densidad de raíces, gran aporte de restos de biomasa aérea, lo que favorece la acumulación de MO (Puget y Lal, 2005). En base a la información obtenida en el primer ensayo (Rotación con pasturas versus situaciones de agricultura permanente) en el que se analizó la evolución de la MO de varias secuencias, se pudo establecer la variación de este parámetro a través del tiempo, ajustando la duración de los ciclos agrícolas y ganaderos. Estos resultados permitieron comprobar que, con el empleo de labranza, y para la combinación de cultivos agrícolas empleada, fue posible manejar el contenido de MO dentro de límites que permitieran mantenerlo en valores estables, lo que aseguraba la sustentabilidad del sistema de producción. Para las condiciones estudiadas, una duración máxima del ciclo agrícola de 7 años y una duración mínima del período bajo pastura de 3 años, permitieron mantener esa estabilidad, no comprometiendo el funcionamiento del sistema mixto (Figura 16). Valores similares fueron informados por Studdert et al. (1997) para suelos de Balcarce, con niveles de MO superiores. Una mayor longitud del período bajo pastura, posibilitó prolongar el ciclo agrícola, pero esta recomendación estuvo sujeta al mantenimiento de una elevada producción forrajera de la pastura. A su vez, la caída del contenido de MO por efecto del ciclo agrícola, varió con la combinación de los cultivos involucrados en la secuencia. La duración mínima de la pastura siguiente necesaria para recuperar el contenido inicial de MO, resultó ser de 3, 4 y 6 años para las secuencias maíz-trigo-girasol; trigo-girasol y trigo-soja, respectivamente (Forján, 2000).

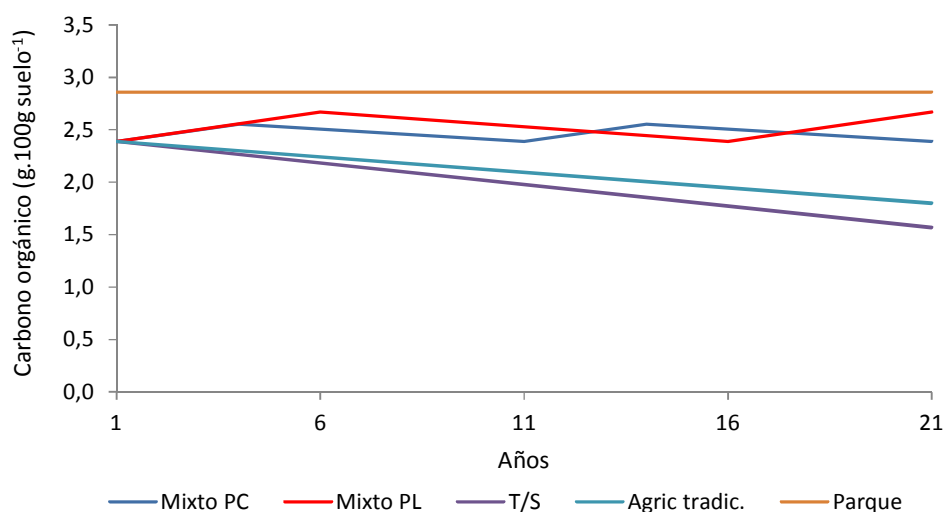


Figura 16. Evolución del Carbono orgánico con distintas rotaciones y en una condición sin disturbar (Parque) en 20 años (Mixto PC: mixto con pastura corta: 7 años agricultura/3 años pastura; Mixto PL: mixto con pastura larga: 10 años agricultura/5 años pastura; T/S: trigo/soja de primera continuo; Agric. Tradic.: agricultura tradicional). Fuente: Ensayo de rotaciones con pasturas versus situaciones de agricultura permanente con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Cuando se analizaron esquemas de agricultura continua (Ensayo rotaciones con labranzas y Ensayo rotaciones en SD), se observó que la mayor frecuencia de cultivos que aportaron gran volumen de rastrojos y raíces, con alta relación C/N, como las gramíneas (Tabla 11), permitió atenuar la tasa de disminución del contenido de MO.

Tabla 11. Producción de grano (Rto) y materia seca (MS) de residuos de distintos cultivos y su relación carbono/nitrógeno (C/N). Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

CULTIVO	Rto. (kg.ha ⁻¹)	MS rastrojos (kg.ha ⁻¹)	Relación C/N	Concepto de relación C/N
Trigo	3300	4620	102	Alta
Cebada	3400	4420	109	Alta
Avena	3700	5550	100	Alta
Colza	1700	2550	78	Intermedia
Girasol	2200	3740	71	Intermedia
Maíz	6800	9520	91	Alta
Sorgo granif.	4380	8540	88	Alta
Soja	2200	3300	45	Baja

Luego de 18 años de agricultura continua bajo LC, todas las secuencias evaluadas presentaron una disminución del Carbono orgánico total (COT) del suelo (Figura 17), y esa pérdida fue mayor cuando aumentó la presencia de soja en la rotación. En contraposición, la caída se atenuó al aumentar la frecuencia de cultivos que aportaron elevado volumen de rastrojos (maíz, trigo) con alta relación C/N (Forján et al, 2012). La secuencia trigo-soja fue la que presentó la mayor caída en el contenido de COT (33,7%), y la menor disminución correspondió a la secuencia trigo-maíz, con una disminución de 12,1%.

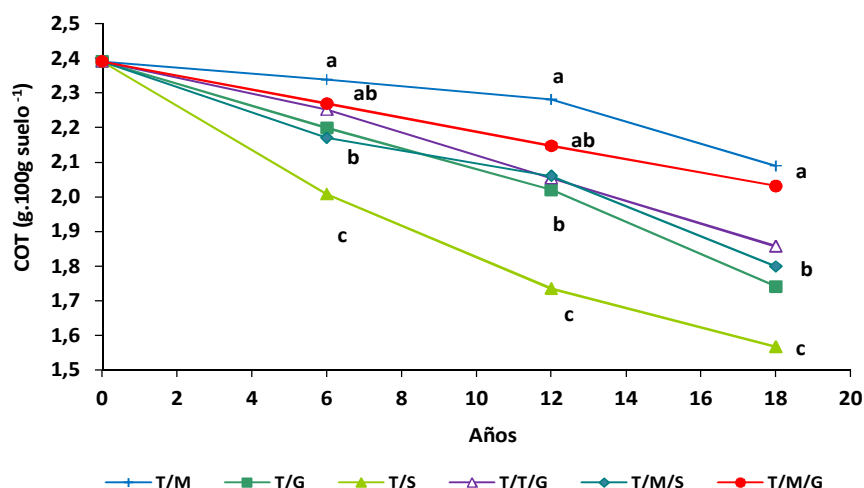


Figura 17. Evolución del contenido de carbono orgánico total (COT) durante un período de 18 años para distintas secuencias (T=trigo; M=maíz; G=girasol; S=soja) con labranza convencional. Letras distintas indican diferencias significativas entre secuencias para un mismo año ($p=0,05$). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Este comportamiento se relacionó directamente con el aporte de residuos de cada secuencia. Si bien en todas se evidenció una disminución del contenido de COT con los años, la pérdida fue diferente de acuerdo con el aporte que realizaron las gramíneas; cuanto mayor resultó su aporte, menor fue la caída (Figura 18a). Las secuencias con mayor presencia de oleaginosas fueron las de mayor impacto sobre la caída del COT del suelo, independientemente de la cantidad de residuos que aportaron (Figura 18b).

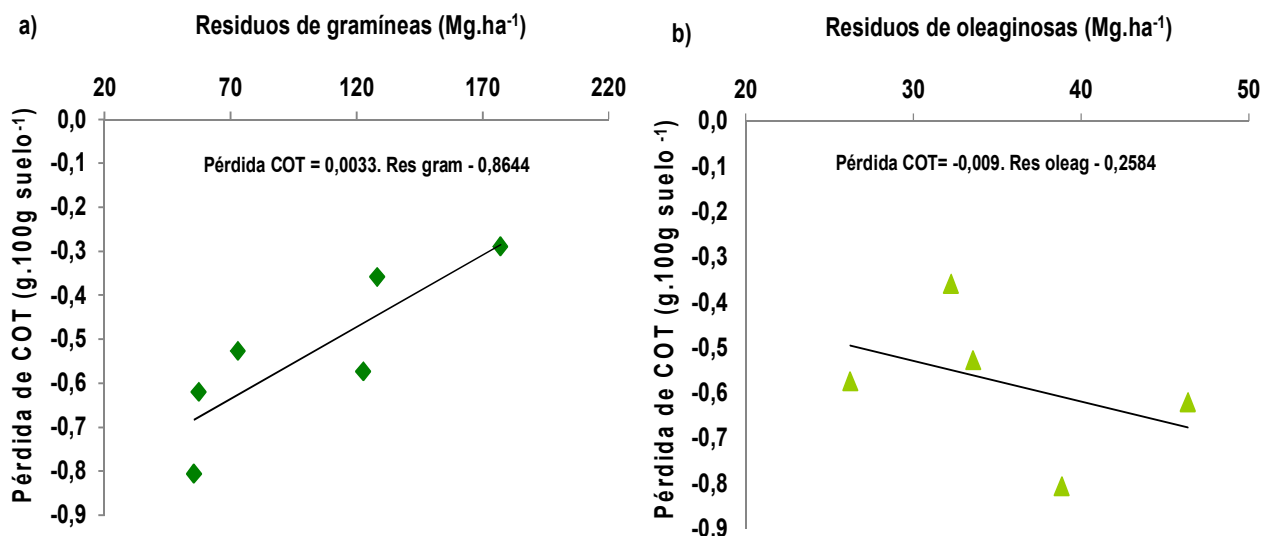


Figura 18. Relación entre el aporte total de residuos de gramíneas (a), oleaginosas (b) y la caída del carbono orgánico total (COT). Fuente: Ensayo rotaciones con labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

En SD la evolución de la MO a través del tiempo mostró incrementos fundamentalmente en los primeros 5 cm de suelo y obedeció principalmente a la presencia de gramíneas en las mismas (Figura 19).

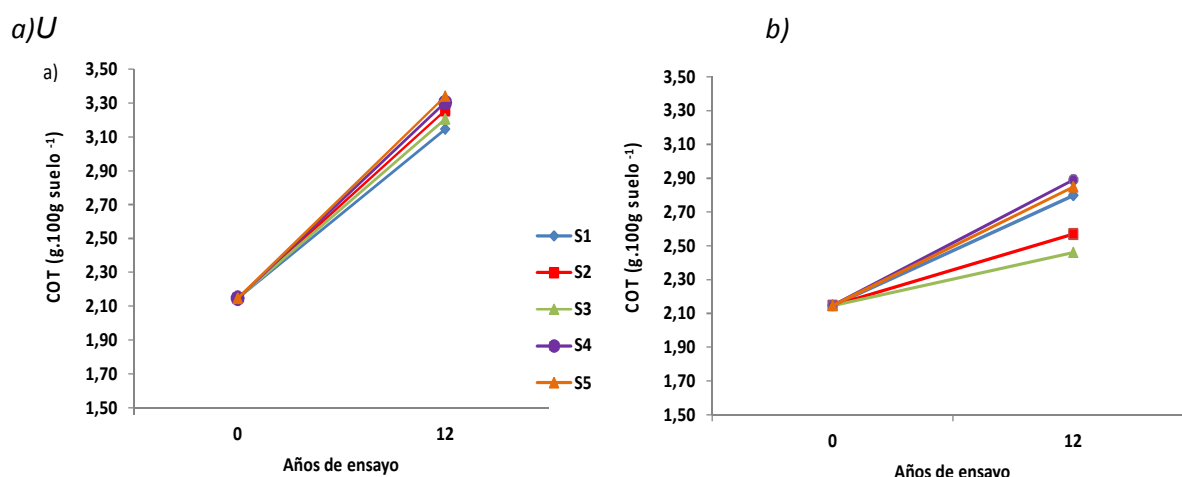


Figura 19. Evolución del carbono orgánico total (COT) durante un período de 12 años para distintas secuencias bajo siembra directa (S1, S2, S3, S4 y S5: secuencia 1: agrícola conservacionista; secuencia 2: mixto: rotación con pasturas (sin verdeos); secuencia 3: agrícola de invierno (para suelos limitados); secuencia 4: mixto, tradicional con verdeos y secuencia 5: agrícola intenso, respectivamente) a dos profundidades: a) 0-5 cm y b) 0-20 cm. Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa, Chacra Experimental Integrada Barrow.

Sistema de labranza: Los efectos que se presentaron en la variación de la MO no sólo fueron atribuidos a los cultivos incluidos en la rotación, sino también al tipo de labranza que se implementó. Las labranzas agresivas, como la LC, producen ruptura de macroagregados, lo que origina la pérdida de MO al exponer las fracciones protegidas dentro de éstos a la acción de los microorganismos (Tisdall y Oades, 1982). En cambio, bajo SD, la ausencia de remoción permite disminuir las pérdidas de C del suelo hacia la atmósfera (Figura 20), ya que se reduce la exposición de la MO a la acción de los microorganismos (Follet, 2001).

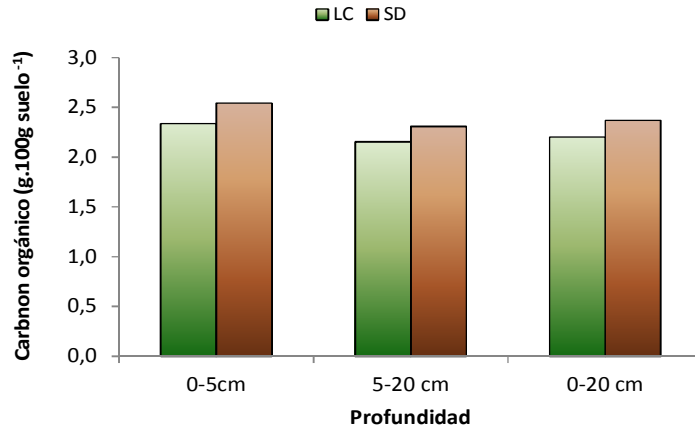


Figura 20. Contenido de carbono orgánico total bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD), en tres profundidades (0-20 cm corresponde al promedio ponderado de las profundidades restantes). Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

El sistema de labranza afecta la distribución de la MO en el perfil. Bajo LC, los residuos son incorporados y mezclados en la capa superficial, obteniéndose contenidos de MO homogéneos hasta la profundidad de laboreo. En cambio, el empleo de SD origina estratificación del CO (Figura 21), verificándose mayores contenidos en los primeros centímetros (Wander et al, 1994; Franzluebbers, 2002; Eiza et al, 2005; Galantini et al, 2006; Domínguez et al, 2009). Esto es debido a la falta de incorporación de los residuos y a que no se altera el ordenamiento natural de los componentes sólidos del suelo por ausencia de remoción (Quiroga et al, 1998).

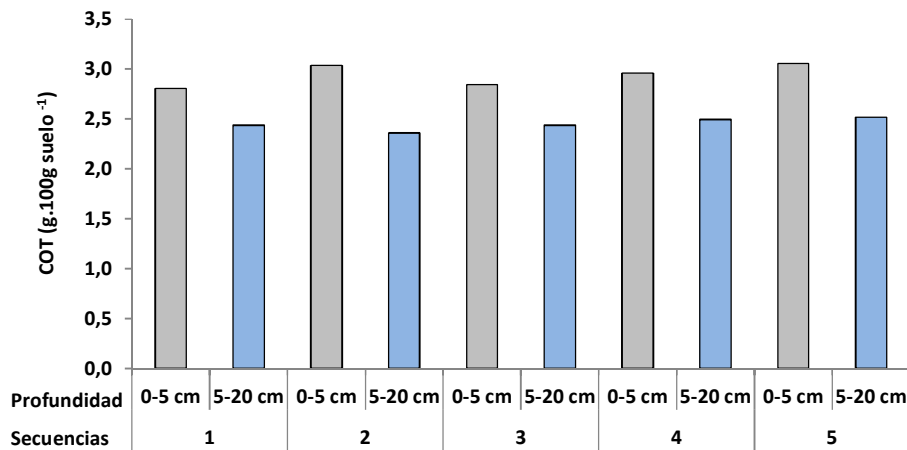


Figura 21. Contenido de carbono orgánico total (COT) a dos profundidades luego de 12 años bajo siembra directa, con diferentes secuencias de cultivos (1: agrícola conservacionista; 2: mixto: rotación con pasturas (sin verdeos); 3: agrícola de invierno (para suelos limitados); 4: mixto, tradicional con verdeos; 5: agrícola intenso). Fuente: Ensayo rotaciones en SD. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Fracciones de la MO: La MO está compuesta por fracciones de diferente labilidad, la MO particulada (MOP) o lábil y, la MO asociada a los minerales (MOA). La MOP (MO en la fracción del suelo mayor que 53 µm) consiste en residuos de plantas y animales parcialmente descompuestos con un rápido ciclado, es más sensible a los factores de manejo y posee gran importancia en la provisión de nutrientes. La MOA (MO en la fracción del suelo menor que 53 µm) está compuesta por productos de descomposición más procesados en íntima asociación con las partículas de suelo, tiene un lento reciclado y es importante en el secuestro de C y en el mantenimiento de la estructura del suelo (Duval et al, 2014).

La evaluación de la variación de la MOP en el tiempo, puede dar indicios en forma temprana de los efectos producidos por las prácticas de manejo. Numerosos autores (Wander et al, 1994; Eiza et al, 2006) citan la mayor sensibilidad de esta fracción respecto a la MO total (MOT) para distinguir situaciones de manejo, lo que permitiría utilizarla como un indicador de calidad del suelo. En forma coincidente con estos autores, cuando se evaluó el contenido de MOT, MOP y MOA en el ensayo de labranzas y el parque (condición sin disturbar) de la CEI Barrow (expresados en valores de carbono, Figura 22), se observó que las diferencias más notorias entre las situaciones evaluadas se presentaron en los niveles de MOP (Manso y Forján, 2006).

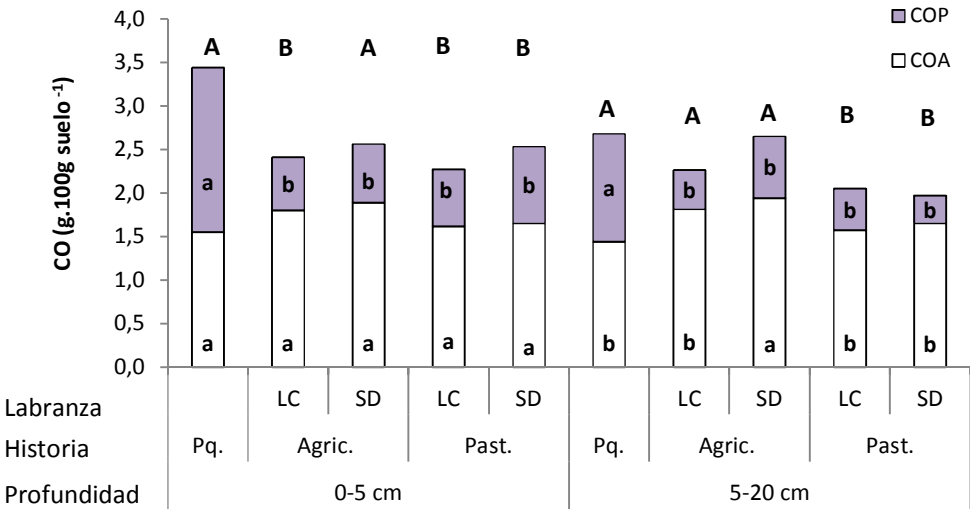


Figura 22. Contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT=COP+COA) en el parque (Pq.) e historia de pastura (Past.) y agrícola (Agric.) bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Letras minúsculas distintas indican diferencias estadísticas entre la condición sin disturbar (Pq.) y los tratamientos para cada profundidad y cada fracción de COT (COP y COA). Letras mayúsculas distintas indican diferencias significativas en el contenido de CO total entre el parque y los tratamientos en cada estrato. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Balance de C: Los principales efectos de la rotación de cultivos se dan en el largo plazo y están asociados a la dinámica de la MO en el suelo. El balance de C es la relación que se presenta entre la cantidad que ingresa al sistema como residuo vegetal (se considera que los residuos vegetales tienen en promedio un 40% de C en su composición) y la que se libera por respiración microbiana. Esta pérdida está constituida por la emisión de dióxido de C (CO_2), producida en la descomposición de los residuos y en la mineralización de la MO humificada (Álvarez y Steinbach, 2010). Este proceso aumenta con el laboreo.

La cantidad y calidad de los residuos vegetales difiere según los cultivos seleccionados para integrar la secuencia agrícola (Cordone et al, 1993) y su manejo posterior. En este aspecto, se han mencionado asociaciones con la fertilización nitrogenada (Campbell y Zentner, 1993; Eiza et al, 2005) provocando mejoras en el contenido de MO, y con las labranzas (Domínguez et al, 2005), lo que determina distintas tasas de descomposición según sean dejados en superficie o semi-incorporados al suelo. Varios autores (Studdert y Echeverría, 1998; Martellotto et al, 2001) han citado pérdidas de MO asociadas a una mayor presencia de cultivos de verano, especialmente soja, en las secuencias de cultivo, debido a que el C mineralizado anualmente no es compensado por la escasa cantidad y baja relación C/N de sus rastrojos.

Cuando el residuo que ingresa al suelo comienza a descomponerse, una parte del C de estos se mineraliza produciendo CO_2 , y la parte restante, se humifica (ingresa al C del suelo). A su vez, los microorganismos descomponen la MO provocando la mineralización del C.

En la Figura 23 se muestra el balance de C en el **Ensayo comparación de labranzas**, para maíz y soja. Se tuvieron en cuenta los aportes efectuados por ambos cultivos (biomasa de rastrojos y raíces) y la pérdida de C (de acuerdo al valor de MO, densidad aparente (DAP), espesor de suelo considerado y el coeficiente de mineralización). Bajo LC se logra un mayor aporte de C a través de los rastrojos, debido a que la humificación de los residuos de cultivo es mayor respecto a SD. Esto se debe a que los residuos son desmenuzados e incorporados al suelo a través de la labranza, lo que los hace más accesibles a la descomposición microbiana. Sin embargo, la pérdida de C bajo este sistema de laboreo (mineralización) también es superior respecto a SD, ya que la remoción rompe los agregados dejando más expuestas las fracciones de MO a condiciones oxidantes, originando la pérdida de C como CO_2 . En el caso de la soja, al producir un escaso volumen de rastrojos, el balance es negativo, aún con labranza conservacionista (SD).

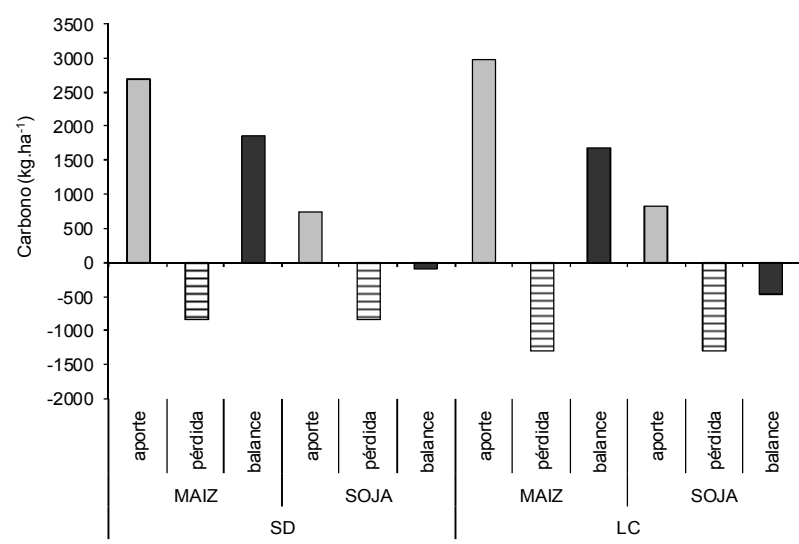


Figura 23. Balance de carbono en siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) para maíz y soja. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Cuando se realizó el balance de C para los diferentes cultivos intervinientes en las secuencias bajo SD de la CEI Barrow (Figura 24), se observó que para aquellos cultivos que aportaron mayor volumen de rastrojo (maíz, trigo, cebada) se obtuvieron balances positivos, mientras que las oleaginosas (girasol, y principalmente soja de primera y segunda) tuvieron valores negativos. En el caso del doble cultivo (gramíneas/soja), se logró un mayor aporte de residuos en un mismo año, por lo que el balance resultó mayor que el logrado con un solo cultivo en el mismo período.

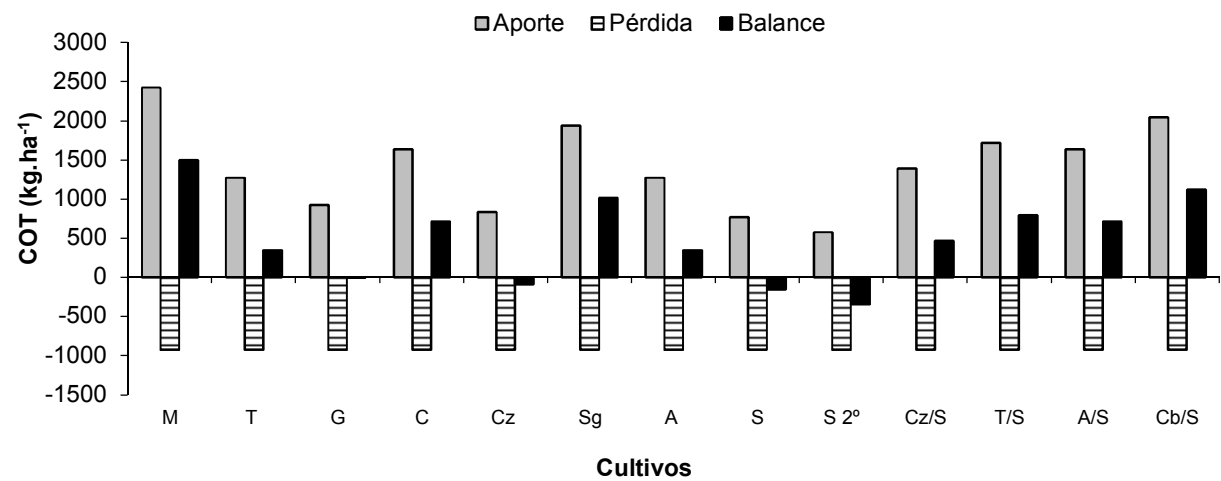


Figura 24. Aporte de carbono a través de los residuos de cultivos empleados en las rotaciones, pérdida anual de carbono y balance (M=maíz; T=trigo; G=girasol; Cb=cebada; Cz=colza; Sg= sorgo; A= avena grano; S=soja; S2ª=soja de segunda. /S= doble cultivo soja 2ª). Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

La rotación de cultivos y las propiedades físicas del suelo

Las labranzas modifican algunas propiedades físicas del suelo, como la estructura y su estabilidad (EE), la densidad aparente (DAP), la distribución de poros, la dinámica del agua y la resistencia mecánica a la penetración (RP) (Buschiazzi et al, 1998; Taboada et al, 2008). Éstas son también afectadas por la secuencia de cultivos empleada, principalmente debido a su influencia sobre la MO y al efecto de los diferentes sistemas radicales, los que inciden sobre la agregación y la porosidad (Tisdall y Oades, 1982).

Es comúnmente citado (Grant y Lafond, 1993; Lampurlanes y Cantero Martínez, 2003; Fabrizzi et al, 2005) que el empleo de labranzas conservacionistas, como SD, a través de los años suele causar compactación del suelo, lo que resulta en un aumento de la DAP y de la RP. En el ensayo que se compararon diferentes secuencias de cultivo **bajo SD**, luego de 12 años pudo observarse un incremento de la RP, a partir de los 7,5 cm de profundidad (Tabla 12). Sin embargo, los valores de DAP obtenidos al inicio del ensayo (1998) y en el año 2010, no mostraron grandes variaciones (Tabla 13), lo que indica sólo un incremento de la dureza del mismo sin una consecuente pérdida de porosidad.

Tabla 12. Resistencia mecánica a la penetración (RP) al inicio del ensayo bajo siembra directa (año 1998), promedio para todas las parcelas, y luego de 12 años (año 2010) para las cinco secuencias evaluadas (S1: agrícola conservacionista; S2: mixto, rotación con pasturas; S3: agrícola de invierno para suelos someros; S4: mixto, tradicional con verdeos; S5: agrícola intenso). Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

	RP (Mpa)								
Profundidad	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20
Año 1998	0,42	0,89	0,96	1,06	1,18	1,38	1,4	1,53	1,59
Año 2010									
S1	0,34	0,52	0,89	1,34	1,63	1,73	1,84	1,84	1,79
S2	0,28	0,58	0,95	1,46	1,64	1,75	1,78	1,74	1,64
S3	0,28	0,47	0,82	1,39	1,97	2,10	2,09	2,02	1,88
S4	0,26	0,46	0,91	1,29	1,64	1,93	2,05	1,96	1,88
S5	0,28	0,46	0,82	1,36	1,90	2,00	2,02	2,10	2,02

Tabla 13. Densidad aparente (DAP) al inicio del ensayo bajo siembra directa (año 1998), promedio para todas las parcelas, y luego de 12 años (año 2010) para las cinco secuencias evaluadas (S1: agrícola conservacionista; S2: mixto, rotación con pasturas; S3: agrícola de invierno para suelos someros; S4: mixto, tradicional con verdeos; S5: agrícola intenso). Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

DAP (Mg.m ⁻³)		
Profundidad	0-10 cm	10-20 cm
1998	1,07	1,24
2010		
S1	1,05	1,30
S2	1,08	1,27
S3	1,11	1,28
S4	1,07	1,26
S5	1,04	1,28

Por otra parte, en suelos bajo prácticas agrícolas con remoción (LC), la DAP superficial generalmente es baja, pero debajo de la profundidad de laboreo se pueden generar capas compactadas debido al uso de los implementos agrícolas (Larney y Kladviko, 1989). Bajo este sistema de labranza también se ha encontrado un incremento en los valores de RMP luego que se supera la profundidad de laboreo (Kruger, 1996).

En el ensayo de **comparación de labranzas**, luego de diez años, la RP fue mayor bajo SD respecto a LC desde los 5 cm hasta los 10 cm (Figura 25) (Manso et al, 2012), lo que estaría indicando un incremento de la dureza como consecuencia de una reconsolidación del suelo, debido a la ausencia de laboreos en el sistema conservacionista (Soane, 1990; Taboada et al, 2008). El incremento de la dureza también se observó en ambos sistemas de labranza a mayor profundidad, acercándose al valor de 2 MPa, considerado como umbral crítico para el crecimiento en longitud de las raíces (Grant y Lafond, 1993).

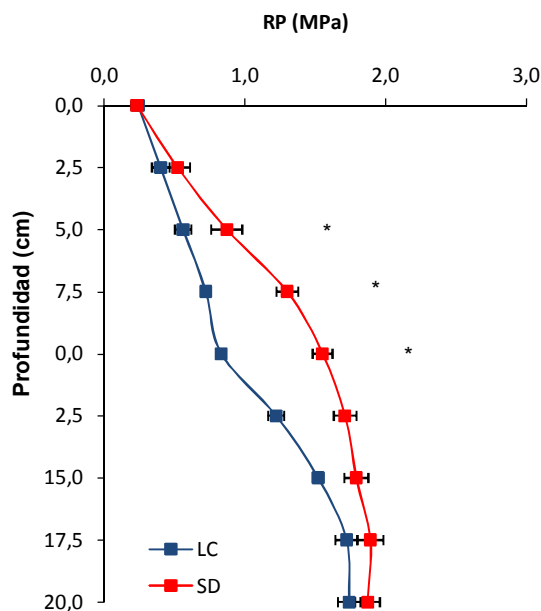


Figura 25. Resistencia a la penetración (RP) hasta 20 cm de profundidad para labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Los asteriscos (*) indican diferencias significativas entre sistemas de labranza ($p=0,05$). Las barras horizontales indican el error estándar de la media. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

En cambio, los valores de DAP en superficie (3-8 cm) no difirieron estadísticamente entre historias ni entre labranzas (Figura 26). No obstante, se observó una tendencia a mayor densificación bajo SD de 3 a 8 cm ($1,24$ vs. $1,29 \text{ Mg m}^{-3}$ para LC y SD, respectivamente) y con historia agrícola ($1,28 \text{ Mg m}^{-3}$) respecto a historia de pastura ($1,25 \text{ Mg m}^{-3}$), aunque posiblemente estas diferencias no tengan implicancias para el normal establecimiento del cultivo. A mayor profundidad (13 a 18 cm) la DAP fue similar en ambos sistemas de labranza ($1,43 \text{ Mg m}^{-3}$) y en ambas historias previas ($1,41$ y $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ para historia agrícola y con pastura, respectivamente).

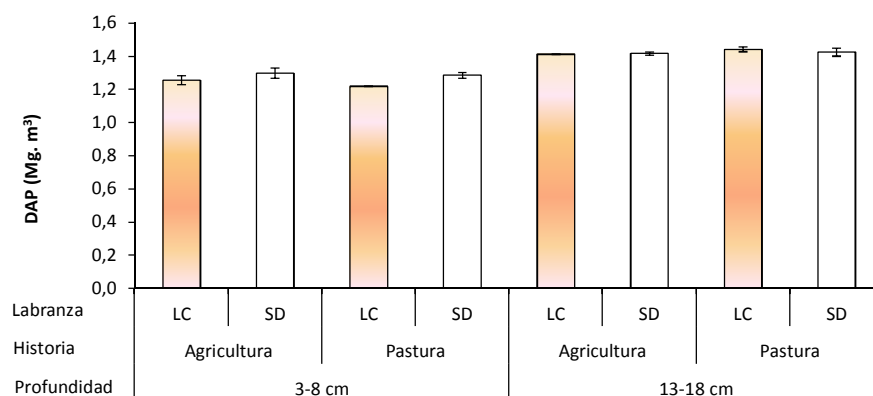


Figura 26. Densidad aparente (DAP) para las historias pastura y agricultura bajo los dos sistemas de labranza, siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), en los estratos de 3 a 8 cm y de 13 a 18 cm. Las barras indican el error estándar de la media. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

La estructura de un suelo se refiere a la organización de la fase sólida (fracción mineral y materia orgánica) en forma de agregados, con el espacio poroso (aire y agua) que existe en el mismo. Se mide a través de la diferencia entre el diámetro medio ponderado de los agregados en seco y el diámetro de los agregados luego de tamizarlos en agua. La EE es una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces, ya que el estado de agregación afecta el movimiento y la disponibilidad de ambos para las plantas (Dexter, 2004). La pérdida de estructura se ve reflejada principalmente en la formación de costras, en un mayor escurrimiento superficial y en la compactación superficial o subsuperficial.

Usualmente, bajo SD se observa mayor EE, lo que se atribuye al hecho de mantener el suelo cubierto por residuos, que protegen a los agregados del impacto de las gotas de lluvia, y a los mayores contenidos de MO observados bajo este sistema de labranza (Gudelj y Masiero, 2000; Taboada et al, 2008), considerada uno de los principales agentes que favorecen la agregación del suelo.

Al comparar **LC y SD** con dos historias de uso previo (pastura y agricultura), no se encontraron diferencias en los primeros 10 cm de suelo (Figura 27). Sin embargo, de 10 a 20cm sólo se registraron diferencias debidas al sistema de labranza empleado, donde SD presentó mayor estabilidad (CDMP: 2,44mm) respecto a LC (CDMP: 3,17 mm) (Manso et al, 2012).

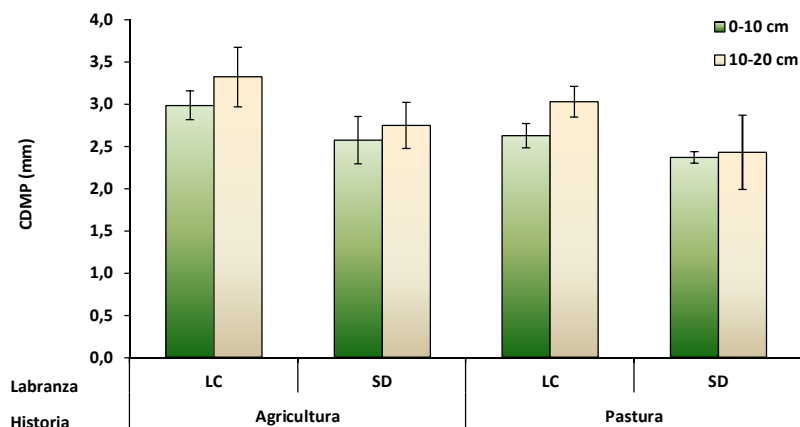


Figura 27. Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) en los estratos de 0-10 cm y de 10-20 cm de profundidad, según historia previa (pastura y agricultura) y sistema de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)). Las barras indican el error estándar de la media. Fuente: Ensayo comparación de labranzas. Chacra Experimental Integrada Barrow.

La EE de un suelo también puede expresarse a través del índice de estabilidad de agregados (IEA), el cual es el cociente entre el valor del CDMP de un suelo de referencia (cuasi prístino o sin disturbar) y el CDMP de los tratamientos evaluados, expresado como porcentaje.

Luego de 10 años de agricultura continua (1 cultivo por año) bajo **LC y SD**, el IEA fue muy bajo para ambos sistemas de labranza (20% y 24% de 0-10 cm, y 18% y 22% de 10-20 cm, para LC y SD, respectivamente), respecto al parque de la CEI Barrow (IEA: 100%). Estos valores indican que los agregados de estos suelos con uso agrícola poseen alrededor del 20% de la estabilidad del mismo suelo sin disturbar. La mayor EE en el parque estaría asociada a la ausencia de remoción por labores mecánicas, a la acción física de las raíces de las diferentes especies que crecen en forma permanente en él y a la liberación de mucílagos que favorecen la estabilización de agregados (Perfect et al, 1990).

Sin embargo, en el ensayo **bajo SD**, luego de 12 años, la pérdida de estabilidad en superficie respecto a la condición sin disturbar (parque) no fue tan pronunciada como en el ensayo de comparación de labranzas (Echeverría et al, 2012). Los IEA oscilaron entre 53% y 36%, dependiendo de la secuencia de cultivos empleada, presentando mayor estabilidad aquella que incluyó pasturas en la rotación, y la menor, la secuencia agrícola que contó con un solo cultivo por año, S1 (Figura 28).

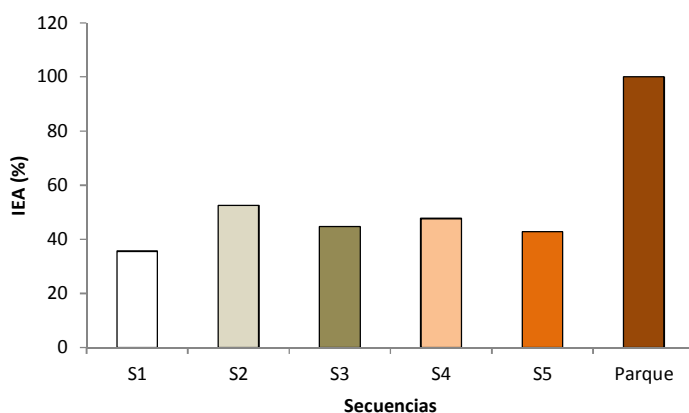


Figura 28. Índice de estabilidad de agregados (IEA) en los primeros 5 cm de suelo para diferentes secuencias de cultivo bajo siembra directa durante 12 años (S1: agrícola conservacionista; S2: mixto, rotación con pasturas; S3: agrícola de invierno; S4: mixto con verdeos; S5: agrícola intenso). Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. (Echeverría et al., 2012). Chacra Experimental Integrada Barrow.

La rotación de cultivos y las diferentes labranzas empleadas modificaron algunas propiedades físicas del suelo, condicionando las relaciones entre suelo y plantas. En general, se observó un incremento de la DAP en subsuperficie, acentuándose bajo SD y con antecesor pastura. Los valores de RMP se incrementaron con los años y fueron en la mayoría de los casos superiores bajo SD, corroborando la ocurrencia de cambios originados por los distintos manejos empleados. Sin embargo, las diferencias significativas medidas entre variables edáficas para secuencias o entre tratamientos, no siempre se reflejaron en los rendimientos obtenidos por los cultivos en los períodos analizados.

Impacto de diferentes secuencias de cultivos sobre la fauna y flora edáficas

Además de las modificaciones en propiedades físicas y químicas, la secuencia de cultivos modifica la actividad biológica (Nesci et al, 2006), y los microorganismos presentes en el suelo responden de manera integrada y sensible a los cambios producidos en el ambiente por los distintos manejos aplicados (Turco et al, 1994).

Los microorganismos del suelo (biota), usan los residuos de plantas y animales y los derivados de la MO como alimento. Mientras más alta sea la producción de biomasa del cultivo (y su posterior aporte de rastrojos), mayor será la población microbiana del suelo.

Los sistemas de producción agrícola en los cuales los residuos son dejados sobre la superficie, como en SD o mediante el uso de CC, estimulan el desarrollo y la actividad biológica (Moreno et al, 2011). Los productos de desecho resultantes, contribuyen a la formación de la MO del suelo.

Por otro lado, los microorganismos también descomponen la MO. En este proceso, interactúan directamente en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes (N, P, azufre (S) y otros), liberándolos dentro del suelo en formas que pueden ser usadas por las plantas.

La función más importante es aquella acción combinada de hongos, actinomicetes, bacterias e individuos pertenecientes a la mesofauna, que transforman los residuos en humus. Por esta razón, se entendió la necesidad de analizar la actividad biológica de los suelos bajo estudio como componentes específicos del agroecosistema, buscando entender el impacto de los distintos manejos sobre la calidad del suelo y la sustentabilidad de las prácticas agronómicas.

Actividad biológica del suelo

Muchas de las reacciones bioquímicas, involucradas en el ciclado y disponibilidad de nutrientes y en la transformación de la MO, son catalizadas por enzimas. Es conocido que la mayor parte de estas enzimas derivan de los microorganismos. Se han encontrado correlaciones entre la actividad microbiana del suelo y los niveles de actividad enzimática (Alvear et al, 2006), por lo que éstas podrían ser utilizadas como indicadoras de alteraciones de la dinámica microbiana del suelo, debido a que son los microorganismos los que ejercen una gran influencia en numerosas reacciones de los ciclos del C, N, P y otros elementos. La actividad metabólica es la responsable de procesos como la mineralización y la humificación de la MO, así como de las transformaciones donde se involucra a la propia biomasa microbiana del suelo. La actividad biológica del suelo es factible de ser medida indirectamente a través de la respiración basal (RB), y de actividades enzimáticas como deshidrogenasa (Dh), ureasa (Ur) y fosfatasa (Ph) (Tian et al, 2010).

Las enzimas del suelo tienen un rol fundamental en todos los procesos de descomposición de la MO (Sinsabaugh et al, 2000). Generalmente, las actividades enzimáticas declinan con la profundidad y están estrechamente relacionadas con la actividad microbiana del suelo y la disponibilidad de C y N en el mismo.

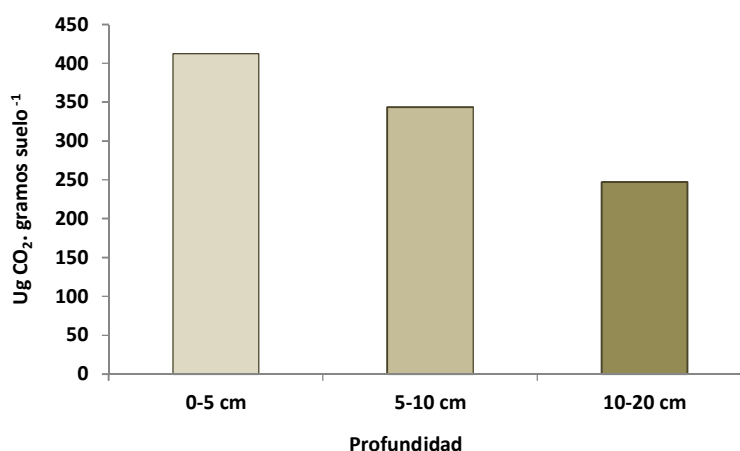


Figura 29. Efecto de la profundidad sobre la respiración basal (RB) del suelo. Fuente: Ensayo Rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow

En el ensayo **Rotaciones en SD**, la RB reflejó diferencias significativas entre las profundidades de muestreos. La mayor actividad biológica se observó para los primeros cinco centímetros del suelo (Figura 29), similar a lo ocurrido con la MO en este ensayo, donde el mayor contenido de residuos existente incrementó la biomasa microbiana (Jenkinson y Ladd, 1981).

De igual modo, las actividades de Ph y Dh presentaron diferencias entre las profundidades, no así la Ur. Como era esperable, son propiedades biológicas muy dinámicas, por lo que su seguimiento tendría la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o de mejoría de los suelos (Bandick, 1999).

Fauna edáfica

La fauna edáfica está constituida mayormente por invertebrados. La microfauna es de tamaño pequeño, por lo que sólo puede ser vista bajo microscopio. Se alimenta de otros microorganismos y de los desechos del resto de la fauna. La mesofauna es visible al ojo humano, pero de tamaño tan reducido que sólo puede percibirse observando atentamente. Es la encargada de fragmentar físicamente el rastrojo, afectando la estructura del suelo a través de sus excrementos, que luego son ingeridos por las especies de la macrofauna para absorber sus compuestos asimilables. Esta última es la de mayor tamaño, dentro de la cual se encuentran las lombrices (*Lumbricus terrestres*) y los ciempiés (quilópodos). Poseen el mayor potencial para causar efectos directos sobre las propiedades funcionales del suelo, ya que consumen y redistribuyen los residuos orgánicos en el perfil, lo cual

incrementa el área superficial y la disponibilidad de sustrato para los microorganismos (Lavelle et al, 1997). Son grandes constituyentes de la estructura del suelo ya que, además, cavan galerías o construyen nidos, afectando la porosidad y el flujo del agua y aire.

La densidad, diversidad y actividad poblacional de esta fauna pueden ser afectadas por el sistema de labranza y la secuencia de cultivos, entre otros, ya que se generan cambios en el medio físico, químico y biológico debido a modificaciones en el contenido de agua, temperatura, aireación, y el contacto entre los materiales orgánicos y las partículas minerales del suelo (Bedano y Ruf, 2007). A su vez, cada especie responde de manera diferente, ya que mientras algunos son favorecidos por estos cambios, otros se ven perjudicados o se mantienen invariables (Kladivko, 2001).

Luego de 12 años, se tomaron muestras en el ensayo **Rotaciones en SD** hasta 20 cm de profundidad, para obtener la fauna edáfica de cada rotación, y determinar los índices ecológicos de Dominancia, Equitatividad y Diversidad (Magurran, 1988; Carrasco, 2012) (Figura 30). En la rotación agrícola conservacionista (Secuencia 1: un cultivo por año), fueron registradas las mayores poblaciones de ciempiés y milpiés (diplópodos). Específicamente, estos últimos prefieren habitar sitios poco disturbados, que coinciden con los de esta rotación: baja presión de cultivos, barbechos largos, menor cantidad de labranzas que las otras dos rotaciones agrícolas. La presencia de milpiés es deseable en un sistema, debido a que por ser detritívoros cumplen un papel muy importante en la degradación de rastrojos, en el reciclado de nutrientes y en la incorporación de la MO en el suelo (Pruett y Guaman, 2001).

A su vez, ecológicamente, esta rotación generó una de las poblaciones edáficas más equilibradas, es decir, que fue más equitativa la cantidad de individuos de cada una de las especies, sin una dominancia visible y donde la mayoría de ellos pertenecieron a unas pocas especies. Así, la Diversidad y Equitatividad, fueron de las más altas (Figura 30), caracteres deseables, ya que indican mayor diversidad de especies y mayor grado de similitud en cuanto a número de individuos dentro de cada especie. Alrededor del 70% de la comunidad encontrada pertenece a los llamados “geófagos” (Figura 31), es decir especies cuya actividad tiene un efecto directo sobre las propiedades del suelo.

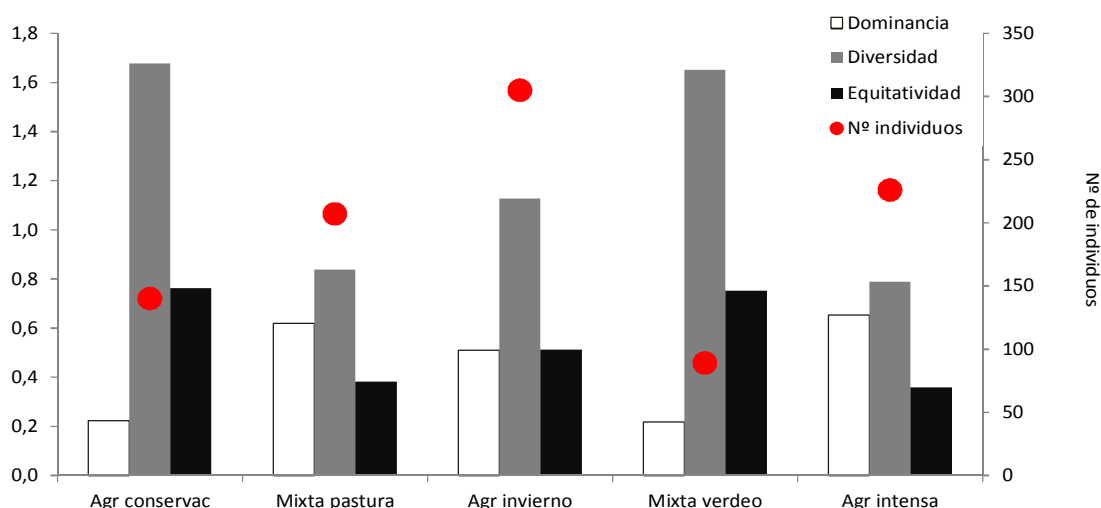


Figura 30. Abundancia (Nº de individuos) e Índices ecológicos de Dominancia, Diversidad y Equitatividad. Fuente: Carrasco, 2012. Rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

En la rotación mixta con pasturas (Secuencia 2), fueron muy predominantes los enquitreidos (*Enchytraeus albidus*), por lo cual el índice de Dominancia resultó ser elevado. Asimismo, en relación a ello, la Diversidad fue baja lo mismo que la Equitatividad (Figura 30). Es decir, que si bien fue una rotación donde se recolectaron numerosos individuos (alrededor de 200), más de tres cuartas partes de los mismos fueron enquitreidos, indicando que fue un sistema altamente dominado por estos anélidos, que aunque favorecen al ciclado de P y la formación del suelo, es mejor contar con un equilibrio en el número de individuos de cada especie, para lograr un adecuado funcionamiento del sistema, y generar la sinergia de la unión de efectos de cada una. En este tratamiento, la proporción de geófagos fue superior al 80% (Figura 31).

En la rotación agrícola con predominancia de cultivos de invierno (Secuencia 3), se detectó un predominio de los enquitreidos por sobre el resto de las especies (Figura 30). Por otro lado, tuvieron gran importancia también los colémbolos. Asimismo, fue la única rotación donde no se hallaron ciempiés, cuya alimentación se basa en la depredación de pequeños insectos. También fueron escasos los ejemplares de milpiés que, como se mencionó, se alimentan de rastrojo, y prefieren sitios poco perturbados. En lo que respecta a los grupos funcionales, alrededor del 80% de los individuos fueron geófagos (Figura 31).

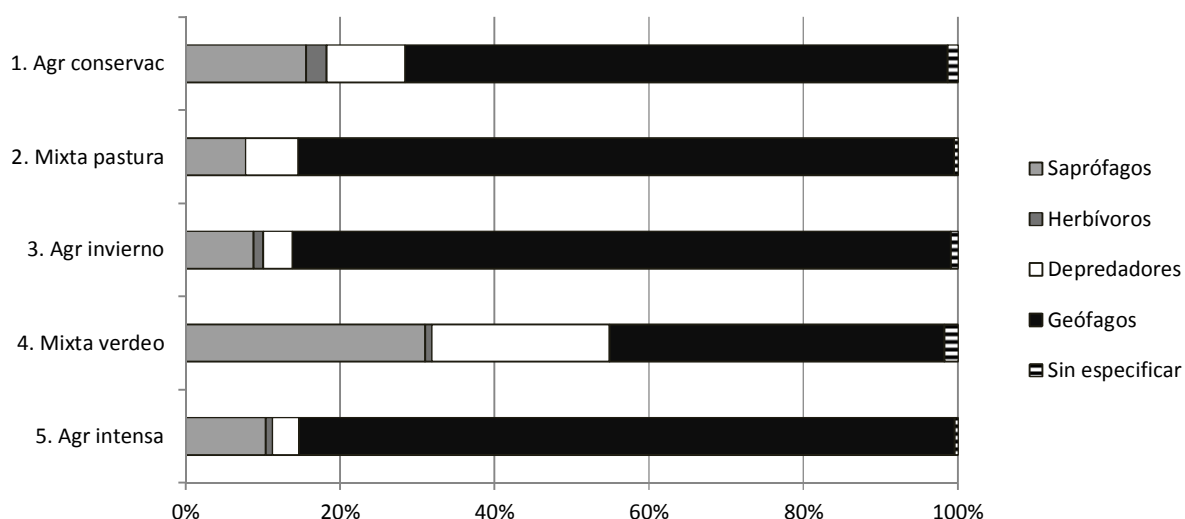


Figura 31. Composición porcentual de los diferentes grupos funcionales: saprófagos, herbívoros, depredadores y geófagos para cada rotación. Fuente: Carrasco, 2012. Rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

La otra rotación mixta, basada en verdeos de invierno (Secuencia 4), específicamente de avena-vicia, seguida luego por girasol, e intercalando trigo entre años, favoreció el equilibrio dentro de la comunidad edáfica, es decir que fue más homogénea la cantidad de individuos que presentó cada especie, por lo que el índice de Dominancia fue bajo con respecto a las otras rotaciones. A su vez, el índice de Diversidad se vio favorecido en esta secuencia (Figura 30). De todas formas, es importante considerar que fue la rotación que presentó el menor número de individuos, básicamente debido a la baja presencia de enquitreidos. Con todo esto, el grupo funcional de los geófagos no fue tan relevante como en las otras secuencias, sin llegar al 50% de representatividad; aquí fueron importantes los saprófagos, es decir los que fragmentan los rastrojos, constituidos por especies de colémbolos (artrópodos hexápodos), milpiés y bichos bolita; así como también los depredadores, representados en este caso por otras especies de colémbolos y ciempiés (Figura 31).

La última rotación de este ensayo, correspondió a una secuencia agrícola intensa (Secuencia 5), con alta proporción de doble cultivo con soja. Este contexto generó un ambiente con predominancia de enquitreidos en la población, lo que derivó en un índice de Dominancia elevado y bajos índices de Diversidad y Equitatividad (Figura 30). Predominó el grupo funcional de los geófagos (principalmente enquitreidos), con alrededor del 80% (Figura 31). La proporción restante correspondió casi totalmente a los saprófagos o fragmentadores del rastrojo.

En líneas generales se observó que la presencia de individuos del grupo funcional de los herbívoros fue escasa, y los pocos individuos colectados fueron bichos bolita. Asimismo, el número total de ejemplares obtenidos en las muestras dependió en gran medida del número de enquitreidos colectados. Se observó que la cantidad de individuos muestreados en las secuencias 1 y 4 fue menor, correspondiendo a las muestras que presentaron menor número de enquitreidos. El tipo de cultivo integrante de cada secuencia y el manejo realizado provocó la variación observada en los distintos tratamientos.

Comunidad fúngica del suelo

Dentro de la microflora del suelo se encuentran los hongos, grupo sumamente abundante que pueden subsistir como saprófitos, parásitos y simbioses. Los hongos degradan MO compleja, obtienen el N del amonio o del nitrato y también de proteínas, ácidos nucleicos y otros compuestos orgánicos nitrogenados (Mahafe y Kopper, 1997). Por ello, la abundancia y estructura de la comunidad fúngica depende de la composición química de los residuos de plantas incorporados al suelo y de factores ambientales. Así, los hongos constituyen más del 50 % de la comunidad microbiana en suelos agrícolas (Atlas y Bartha, 1998). Participan activamente en la formación de amonio y compuestos nitrogenados simples, en la formación de humus a partir de restos orgánicos frescos, e influyen sobre la formación de agregados estables mediante la penetración de sus hifas y uniendo mecánicamente las partículas del suelo.

En general, se ha observado que los sistemas de labranza, tienen diferentes efectos sobre la comunidad de hongos del suelo. La composición y dinámica de dicha comunidad están asociadas no sólo a la labranza sino también al manejo del cultivo (secuencia de cultivos, aplicación de agroquímicos), y condiciones agrometeorológicas, entre otros. Es complejo detectar un único efecto que sea atribuible sólo al tipo de labranza.

Se ha dicho que la SD aumenta la diversidad de especies fúngicas, con alta densidad de poblaciones en los primeros 5 cm del suelo, lo que se relaciona con la disponibilidad de nutrientes y la actividad de la microbiota celulolítica. Así, como aumenta el número de propágulos de saprófitos, también puede hacerlo el número de propágulos de fitopatógenos (Calderón et al, 2000).

Como otros organismos del suelo, los hongos son un nexo importante en las relaciones suelo-planta-herbicida-fauna-hombre, como degradadores y como bioindicadores, ya que las variaciones en

número y diversidad pueden ser una buena señal de los cambios en la actividad biológica del suelo luego de la aplicación de los pesticidas.

En el ensayo **comparación de labranzas** se estudió la variación intra-anual de la comunidad de hongos en suelos con diferentes historias de uso y sistemas de labranza. La mayor riqueza de especies se observó en lotes provenientes de pastura y bajo SD. Sin embargo, éste parámetro no sólo dependió de la historia del lote o la labranza, sino de las condiciones meteorológicas.

El índice de diversidad mostró también el valor más alto en suelos de pastura, independientemente del sistema de labranza. La dinámica del mismo fue variable en el tiempo. Se observó que la composición y abundancia de la comunidad cambió con la época de muestreo. Los géneros *Fusarium*, *Aspergillus* y *Nectria* resultaron los más representativos.

En el ensayo **Rotaciones en SD**, luego de 12 años, el número de especies presentes detectado a través del índice de riqueza de especies fue modificado tanto por la época como por la profundidad de muestreo. Las variaciones en riqueza y diversidad a lo largo de las estaciones, son fluctuaciones que se asocian a los cambios en las condiciones meteorológicas propias de las mismas. En invierno se estimaron valores mayores de estos índices; esto se relacionó a las características ambientales como temperaturas y precipitaciones. Se registró una mayor humedad relativa y menores temperaturas y precipitaciones respecto al verano y otoño. Estas condiciones favorecen la germinación de esporas y el crecimiento del micelio fúngico.

Con respecto a la profundidad de muestreo, de 0-5 cm se presentó la mayor riqueza, siendo significativamente distinta a las de 5-10 y 10-20 cm. Ésta situación se debe a que quedan residuos en la superficie lo que favorece la retención de humedad y disminución de la temperatura del suelo. Todo esto promueve el desarrollo de un ambiente propicio para que los hongos persistan y crezcan en esta porción del suelo. A mayor profundidad, la especialización de nichos aumenta y, por lo tanto, aquellas especies que comparten los mismos nichos, compiten entre sí por éstos. Las especies competitivamente favorecidas en los 5-20 cm fueron aquellas que poseen la característica de ser frecuentes en suelos, tanto cultivados como no cultivados y ser celulolíticas por excelencia, entre otras *Aspergillus fumigatus*, *Allescheriella crocea*, *Cladosporium cladosporioides*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, *Humicola fuscoatra*, *Penicillium funiculosum* y *Penicillium chrysogenum*.

Si bien las secuencias de cultivos no influenciaron los parámetros de diversidad, es relevante poder señalar y detallar que géneros como *Fusarium*, *Trichoderma* y *Penicillium* se observaron con mayor

abundancia relativa en las diferentes épocas del año. En la secuencia 1 (tratamiento conservacionista), la comunidad fúngica hallada presentó géneros de potencialidad antagónica de patógenos como *Trichoderma*. Del mismo modo, en las secuencias mixtas (tratamientos 2 y 4), además de *Trichoderma sp.*, se detectó otro género antagonista de patógenos: *Gliocladium*. En la secuencia de agricultura intensa (secuencia 5) se observó mayor presencia de cepas patógenas de cultivos y con posibilidad de generar micotoxinas.

Describir y comparar las comunidades de hongos en lotes agrícolas permitiría establecer relaciones entre las variaciones comunitarias y las características de lotes y así determinar la estructura de las comunidades fúngicas que caracterizan las diferentes condiciones de manejo, y analizarlas en relación con características físicas y agronómicas de los lotes, para definir dispositivos de manejo. Al presente, en nuestro país es escasa la información acerca del impacto de la actividad agrícola sobre la microbiota del suelo en los agroecosistemas (Schalamuk et al, 2007; Silvestro et al, 2011).

Efecto de las rotaciones de cultivos sobre las malezas

En una rotación, cuando se alternan los cultivos, se generan determinados ambientes que favorecen el desarrollo de ciertas malezas y perjudican a otras. En este contexto, la secuencia de cultivos ejerce una presión de selección sobre la comunidad de las malezas, afectando la dinámica de sus poblaciones. La diversificación de cultivos proporciona una mayor flexibilidad para controlar las malezas como también lo hace la complementación del control con el uso de diferentes herbicidas en el barbecho y el empleo de CC (Istilart y Forján, 2012).

Ciertas malezas tienden a asociarse con determinados cultivos, debido a la recurrencia en las prácticas de manejo. El cambio a un cultivo diferente interrumpe este ciclo, y modifica la presión de selección por determinadas especies. En general, las rotaciones diversificadas conducen a los mejores resultados, ya que no permiten que se manifiesten repetidamente las mismas condiciones que contribuyen al crecimiento poblacional de determinadas especies que se convierten en poblaciones dominantes. Además, pueden variarse los herbicidas, lo que posibilita que no se produzca la aparición de malezas resistentes o incrementos de las malezas tolerantes a herbicidas (Doucet et al, 1999).

La importancia de rotar cultivos sobre las poblaciones de malezas se pudo comprobar en los ensayos de rotaciones de la CEI Barrow. Los efectos de los sistemas de siembra, la rotación con pasturas y la

diversificación de los cultivos en el ciclo agrícola, con aplicaciones de distintos principios activos, mostraron diferencias en la evolución de la población de malezas.

En el ensayo **Rotaciones con pasturas versus situaciones de agricultura permanente**, la situación inicial indicó la presencia de cebadilla (*Avena fatua* L.), poligonáceas como sanguinaria (*Polygonum aviculare* L.) y enredadera anual (*Polygonum convolvulus* L.) y crucíferas como nabón (*Raphanus sativus* L.) y mostacilla (*Rapistrum rugosum* L.), con valores de abundancia que variaron de 13 a 65 pl.m⁻². Después de 6 años, la sanguinaria disminuyó en general en todas las rotaciones, y las especies pertenecientes a la familia de las crucíferas presentaron una reducción del 53,6 %.

En las rotaciones donde se incluyeron más años con cultivos de verano, se observó un mayor efecto supresor sobre cebadilla. Por su parte, caapiquí (*Stellaria media* L.) y no me olvides (*Anagallis arvensis* L.), incrementaron la densidad de sus poblaciones, siendo superior en las rotaciones con pasturas, en las cuales también se observó un considerable aumento de apio cimarrón (*Ammi majus* L.), verónica (*Verónica pérsica* Poir) y ortiga mansa (*Lamiun amplexicaule* L.). Estas malezas resultan muy difíciles de controlar en pasturas de leguminosas consociadas con gramíneas perennes. Respecto al relevamiento anterior, aparecieron especies de dicotiledóneas llamadas “nuevas” como: manzanilla (*Matricaria chamomilla* L.), únicamente en la rotación integrada por 5 años con pasturas perennes, y quínoa (*Chenopodium album* L.) en la rotación trigo / girasol continuo.

En el monocultivo de trigo, tratamiento que se mantiene bajo labranzas desde hace 34 años, se observó la evolución de la densidad de cebadilla. El comportamiento de la misma mostró la marcada capacidad de persistencia y reproducción de la maleza en esta región, aún luego de las aplicaciones realizadas que disminuyeron su población. La persistencia puede deberse a su capacidad de adaptación al cultivo. Existe una semejanza de la maleza con el cultivo de trigo relacionada con los requerimientos ambientales y una semejanza vegetativa y reproductiva entre las plantas de ambas especies que asegura su supervivencia (Mortimer, 1990).

Luego de 10 años en el ensayo de **Comparación de labranzas LC vs. SD** (2 ciclos de girasol/trigo/maíz/girasol/trigo), sobre historia previa contrastante (suelo descansado y suelo con historia agrícola prolongada), se observó una mayor presencia de malezas en los tratamientos con LC, especialmente bajo historia previa de agricultura prolongada. Una posible explicación de este resultado es la existencia de un gran número de especies adaptadas al laboreo debido al número de años que se había empleado esta práctica (Istilart et al, 2015). Además, es razonable pensar que el

uso de productos químicos puede reducir la diversidad de malezas. Los resultados obtenidos son coincidentes con otros trabajos llevados a cabo en el sur de la provincia de Buenos Aires (Istilar y Yanniccari, 2011), y en la región pampeana norte (Tuesca et al, 2001), donde el número de malezas fue superior en lotes de labranza convencional que bajo siembra directa.

En la secuencia analizada, con predominio de cultivos de verano, se favoreció la difusión de dicotiledóneas, siendo gramón (*Cynodon dactylon* L. Pers.) la única gramínea presente. Algunas especies como quínoa, apio cimarrón y las pertenecientes a la familia de las Asteráceas como diente de león (*Taraxacum officinale* L.), cerraja (*Sonchus oleraceus* L.), abrepuño (*Centaurea solstitialis* L.) y cardos, fueron más abundantes en las parcelas de SD. Generalmente, las especies de esta familia son de dispersión anemófila; algunos autores indican que el sistema de SD favorece la difusión de sus semillas (Tuesca et al, 2001).

Con la incorporación de la SD se creó una nueva relación entre todos los factores que interactúan vinculados con el desarrollo de los cultivos y las malezas. Deben considerarse aspectos como la composición de la comunidad de malezas; elección y dosis del herbicida; tecnología de aplicación y uso de coadyuvantes; alternancia en el uso de los herbicidas; herbicidas residuales; cultivos tolerantes a los herbicidas. Pero para el sistema de SD es también muy importante estudiar el control cultural de malezas porque es un aporte sumamente económico e incluye entre otros aspectos: rotación de cultivos y cultivares adecuados; densidad de plantas; reducción de la separación entre hileras; residuos vegetales en superficie; uso de cultivos de cobertura, etc. Esto implica que es necesario realizar un análisis de cada caso a fin de poder elaborar una estrategia de manejo adecuada al mismo.

En el ensayo **Rotaciones bajo SD** se evaluó el efecto de cinco secuencias de cultivos durante 2 ciclos (1998-2003 y 2004-2009) sobre la presencia de malezas, mediante censos realizados al final de cada ciclo de 6 años en el cultivo de trigo.

Luego del primer ciclo se determinaron 23 especies; la riqueza varió de 6 a 13 especies siendo las más diversificadas las rotaciones 1 (agricultura conservacionista), 2 (mixto: rotación con pasturas) y 5 (agrícola intenso). Las malezas gramíneas más importantes por su constancia y densidad fueron: raigrás (*Lolium multiflorum* Lam.) y cebadilla, y entre las latifoliadas, verónica, cerraja, presentes en cuatro rotaciones, apio cimarrón, en tres, y las pertenecientes a la familias de las asteráceas: falso cardo negro (*Carduus acanthoides* L.) y cardo negro (*Cirsium vulgare* Savi Ten.).

En el segundo ciclo de rotaciones (2004-2009), la riqueza fue más homogénea, varió de 7 a 8 registrándose un total de 16 especies, siendo las de mayor constancia, raigrás, cebadilla, pensamiento silvestre (*Viola arvensis* Murray), verónica, sanguinaria, ortiga mansa (*Lamium amplexicaule* L.) y perejilillo (*Bowlesia incana* Ruiz y Pavón).

Del análisis conjunto de las malezas observadas en cada ciclo de rotaciones surgió que, después de 12 años, algunas malezas persistieron como: cebadilla, raigrás, apio cimarrón, pensamiento silvestre, verónica, no me olvides (*Anagallis arvensis* L.) y sanguinaria. También las pertenecientes a la familia de las asteráceas como senecio (*Senecio madagascariensis*), cerraja y cardo pendiente (*Carduus nutans*).

Las especies que estuvieron presentes al final del primer ciclo y no se detectaron al final del segundo fueron: cardo asnal (*Silybum marianum* L.Gaerth), diente de león, falso cardo negro, cardo negro, crepis (*Crepis setosa*), manzanilla, caapiquí, alfalfa, mostacillas (*Rapistrum rugosum* L.All y *Sisymbrium officinale*), tutia (*Solanum sisymbriifolium* Lam.), malva cimarrona (*Anoda cristata*) L. Schltldl) y enredadera anual (*Polygonum convolvulus*).

En el segundo ciclo surgió otro grupo de especies consideradas “nuevas”, no registradas en el ciclo anterior como abrepuño amarillo, quínoa, mastuerzo (*Coronopus didymus* L. Smith), y algunas de difícil control, como ortiga mansa y lecherón (*Euphorbia dentata* Michx), que aparecieron en todas la rotaciones, y perejilillo en tres secuencias.

Es importante destacar que la situación mixta 2 terminó sin la presencia de dos gramíneas importantes, como raigrás y cebadilla. Esto posiblemente se deba a la inclusión de 3 años de pasturas destinadas a pastoreo, que interrumpieron el ciclo de las malezas evitando la producción de semillas, principal fuente de difusión (Bentley, 1990). Posteriormente, en el segundo ciclo, la siembra consecutiva de dos cultivos de verano, sorgo y soja, agotó el banco de semillas de las mencionadas especies.

El número de aplicaciones de herbicidas efectuadas y de ingredientes activos utilizados en el último ciclo, fue superior en todas las rotaciones respecto del ciclo inicial (Tabla 14). En ambos, el Glifosato resultó el herbicida con mayor aplicación, respecto del total de productos empleados, aumentando su participación en el último ciclo, con un incremento promedio de 42,5%. La necesidad de adicionar el uso de nuevos principios activos para el control de gramíneas tanto en cultivos de cereales (Tralkoxidin, Clodinafop, Pinoxaden) como en cultivos de verano (Haloxifop, Propaquizafop) indica la

dificultad creciente para controlar las especies malezas de esta familia. De los herbicidas hormonales, el 2,4 D también tuvo un incremento, lo que indicaría una mayor abundancia de malezas pertenecientes a la familia de las asteráceas.

Tabla 14. Pulverización de herbicidas en cada rotación: frecuencia y principios activos empleados. Ensayo rotaciones en siembra directa. (S1: agrícola conservacionista; S2: mixto, rotación con pasturas; S3: agrícola de invierno; S4: mixto con verdes; S5: agrícola intenso. Part glifosato: participación de glifosato). Chacra Experimental Integrada Barrow.

Herbicidas	CICLO 1998-2003						Herbicidas	CICLO 2004-2009					
	Secuencias					Total		Secuencias					Total
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
Glifosato	9	6	10	10	9	44	Glifosato	14	15	13	11	15	68
Metsulfuron	2	1	3	4	3	13	Metsulfuron	3	2	4	3	3	15
Dicamba						0	Dicamba	3	3	4	3	5	18
Picloran	2	1	3	4	3	13	Picloran						0
2,4 D			1			1	2,4 D	3	2	4	3	3	15
2,4 DB		1				1	2,4 DB						0
Fluorocloridona	2		3	2		7	Fluorocloridona	1			2		3
Acetoclor	4		3	2		9	Acetoclor	1			2		3
Atrazina	2					2	Atrazina	1					2
Bromoxinil		1				1	Bromoxinil						0
							Clodinafop	1			1	1	3
							Haloxifop		1	1		2	4
							Propaquizafop			1			1
							Pinoxaden			1		1	1
							Tralkoxidin					1	1
Aplicaciones	14	7	15	15	11		Aplicaciones	19	18	20	15	23	
Aplicaciones /año	2,3	1,2	2,5	2,5	1,8		Aplicaciones /año	3,2	3	3,3	2,5	3,8	
n° ingredientes activos	6	5	6	5	3		n° ingredientes activos	8	5	7	7	8	
Part glifosato(%)	57	71	60	60	73		Part glifosato(%)	74	83	65	73	65	
l.ha ⁻¹ Glifosato	18	11	20	20	18		l.ha ⁻¹ Glifosato	31	34	29	25	34	

El mayor número de aplicaciones y la necesidad de ampliar el listado de productos en algunas secuencias, indica la dificultad de basar el control de malezas solamente en el control químico, y la importancia de diversificar para atenuar ese efecto.

Sobre este mismo ensayo en SD se evaluó la abundancia de malezas en el cultivo de soja previo a terminar el tercer ciclo de rotación. El tratamiento con cobertura de avena y vicia como antecesor presentó el menor número de especies de malezas, pero al sacar la cobertura con el pastoreo, ese número aumentó (Figura 32).

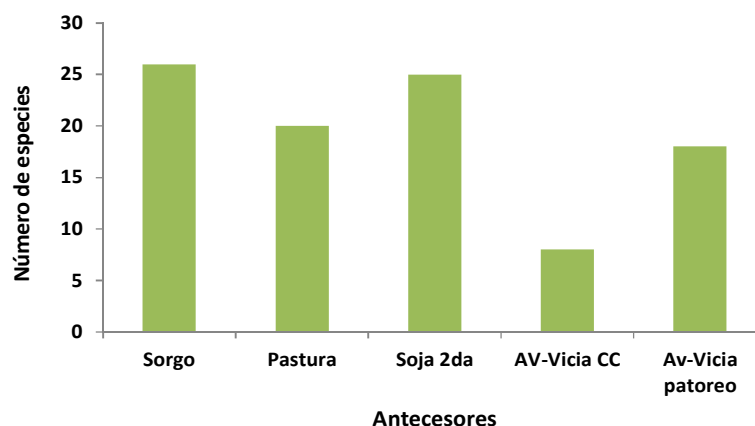


Figura 32. Riqueza (Nº de especies inventariadas por tratamiento). CC: cultivo de cobertura; Av-vicia: avena con vicia. Fuente: Ensayo rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Para rama negra, en particular, se efectuó un análisis de la varianza para evaluar diferencias entre secuencias. La mayor abundancia correspondió a la rotación con antecesor sorgo; esto se puede explicar debido a que el barbecho se realizó en octubre donde la maleza, por su tamaño, ya demuestra tolerancia al herbicida. En cambio, las rotaciones con cultivo de cobertura y pastura fueron las que menos plantas de esta especie tuvieron (Figura 33).

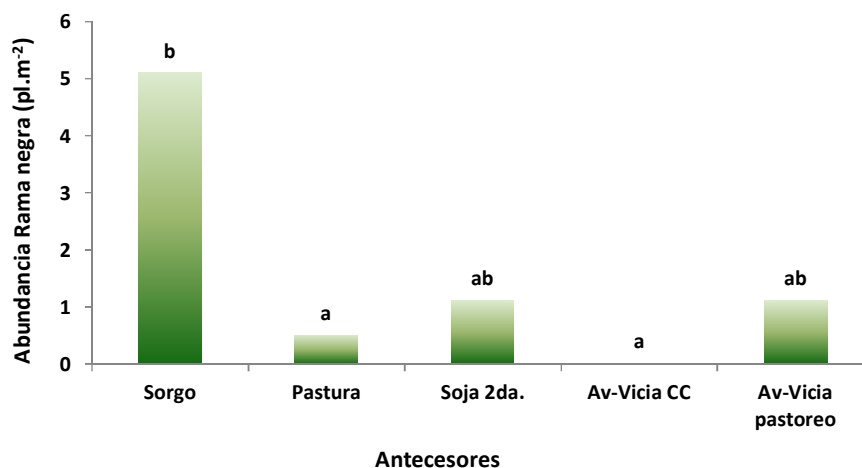


Figura 33. Número de plantas de rama negra (*Conyza sumatrensis*) por metro cuadrado (pl.m⁻²) en soja, según diferentes antecesores. (CC: cultivo de cobertura, Av-Vicia: avena y vicia consociadas). Fuente: Rotaciones en siembra directa. Chacra Experimental Integrada Barrow.

Los resultados obtenidos en este ensayo refuerzan el concepto que para lograr un buen control, este debe ser integrado, donde se complementen la rotación de cultivos con otras prácticas que incluyan un control químico en el momento adecuado.

Insectos de suelo en siembra directa. Variación con la secuencia de cultivos

Entre las consecuencias de adoptar el sistema de SD, numerosos trabajos mencionan el aumento de poblaciones de insectos de suelo (Aragón, 2004), los cuales encontrarían un ambiente más favorable para multiplicarse (suelos compactos con rastros en superficie) sin ser afectadas por los laboreos y el posterior control biológico por aves.

Dentro de estos, los más nombrados como causantes potenciales de producir daños a los cultivos resultan ser los llamados gusanos blancos del suelo, aunque también se ha comprobado su efecto benéfico para el sistema, a partir del desarrollo de las larvas y la construcción de galerías, las cuales facilitan la aireación del suelo, la infiltración del agua y el reciclaje de nutrientes (Gassen, 2001; Aragón, 2004).

Los gusanos blancos corresponden a un grupo de coleópteros de la familia Scarabaeidae, los cuales habitan en la tierra al estado larval produciendo daños durante este período, tomando la forma de escarabajos al estado adulto.

Relevamientos realizados por Iannone (2007) en el núcleo pampeano, indicaron la existencia de un variado número de especies de gusanos blancos, encontrándose normalmente en mayor cantidad a *Diloboderus abderus*, *Philochloenia bonariensis* y *Cyclocephala signaticollis*. Su abundancia relativa dependió principalmente del sistema de siembra y la rotación.

Estudios realizados por INTA Pergamino en el norte de la provincia de Buenos Aires (Iannone, 2007), permitieron determinar que la cantidad de gusanos blancos se incrementó en una relación aproximada de 3 a 4 veces al pasar del sistema de labranza convencional a una SD de tres o más años, y a su vez, de ésta a las pasturas perennes. El número promedio de larvas de gusanos blancos (gb) fue de 3 a 5 gb.m⁻² en sistema convencional, 14 gb.m⁻² en SD, y 50 gb.m⁻² en pasturas.

De todas las especies del complejo de gusanos blancos, se destaca *Diloboderus abderus*, conocido vulgarmente como "bicho torito" o "bicho candado". Su presencia puede tener un alto impacto sobre la producción de los cultivos, mientras que las otras especies del complejo no llegan a producir un daño equivalente. Sus larvas afectan fundamentalmente a especies gramíneas, como cultivos de trigo y maíz en SD y forrajeras perennes.

El ciclo de vida del bicho torito se cumple en el término de un año. Se encuentra presente en el suelo desde marzo como larvas del primer estadio, luego en abril aparecen las larvas del segundo para así llegar en mayo-junio al tercer y último estadio larval, donde adquieren el máximo tamaño y se

produce la mayor demanda de alimentos (daños al cultivo). Este es el más largo y se extiende hasta fines de octubre, principios de noviembre, cuando se transforman en estado de prepupa y finalmente en adultos para emerger del suelo en diciembre.

En la región, en las primeras etapas de un cultivo de trigo, los daños no resultan importantes debido a que las bajas temperaturas que ocurren en pleno invierno obligan a las larvas a profundizar en el suelo. A partir de encañazón y principalmente en espigazón del cultivo, podrían presentarse los daños más graves, ya que la actividad de las larvas aumenta con la temperatura del suelo.

Las larvas inicialmente pueden dañar semillas o alimentarse de material vegetal ubicado cerca de su lugar de nacimiento (consumen raíces, tallos y hojas). A medida que las larvas crecen, las galerías en el suelo alcanzan mayor diámetro (15-20 mm) y profundidad, llegando generalmente a los 20-30 cm.

Monitoreo e identificación

Resulta importante en el sistema de SD tener el conocimiento sobre la presencia de gusanos blancos en el lote. El muestreo, identificación y posterior cuantificación de las especies encontradas en un monitoreo, es un dato importante para tomar la determinación de proteger al cultivo con terápicas insecticidas de semilla. Métodos posteriores tienen baja efectividad y alto impacto ambiental, sobre todo en siembras tempranas, donde las temperaturas de suelo y del ambiente son lo suficientemente bajas como para retrasar la emergencia y el crecimiento del cultivo, condiciones éstas donde se manifiestan los mayores daños por este tipo de plagas.

Tomando como referencia el ensayo **rotaciones en SD**, luego de 12 años y donde en la campaña 2009 todas las situaciones fueron sembradas con trigo (final del 2º ciclo), se realizó un muestreo en el mes de julio previo a su siembra, a los efectos de determinar posibles variaciones en la presencia de gusanos blancos por efecto de los diferentes cultivos empleados previamente.

Se realizaron muestreos superficiales de 0,25 m² raspando con pala, para determinar la existencia de perforaciones en el suelo efectuadas por los gusanos, lo cual permitió, con un posterior muestreo en profundidad en cada galería, confirmar la especie presente. La identificación se realizó consultando la publicación de Alvarado (1979).

Conociendo que *Diloboderus abderus* es la especie más perjudicial por su frecuencia, abundancia y voracidad del último estadio larval, y que es común encontrar otras especies de gusanos blancos de

menor impacto agronómico y otros tipos de insectos de suelo, en los últimos años se ha creado una equivalencia, definida como índice DILAB donde se estima el daño de otras especies en relación a un valor 1 para *Diloboderus abderus* (Baydir News, 2010).

Se estima que el daño de 1 *Diloboderus* equivale al daño de: 6 *Ciclocephala sp.*, *Anomala sp.*, o *Philocloenia sp.*, 3 *Pantomorus leucoloma* (gusano arroz), 1 gusano alambre (*Conoderus spp.*, *Discynetus gagates*, *Agriotes spp.*).

La información disponible hasta el momento indica que, la cantidad de larvas presentes de bicho torito que justifican el control es de 4 gb.m⁻² para maíz y 5 a 6 gb.m⁻² para trigo (Aragón, 2004; Iannone, 2007). Considerando estos valores, los tratamientos evaluados en el ensayo presentaron en general, una baja presencia de *Diloboderus*.

Tabla 15. Recuentos de insectos (individuos.m⁻²) previo a la siembra de trigo

Secuencia	<i>Diloboderus abderus</i>	<i>Cyclocephala sp.</i>	<i>Philocloenia sp.</i>	<i>Pantomorus sp.</i>	Gusanos alambre	INDICE DILAB
1	1,0	6,0	4.5	0,0	1,0	3,75 bc
2	2.5	6.5	6.5	2,0	1,0	6.33 a
3	1,0	9,0	5,0	0,0	1,0	4.33 b
4	1,0	8,0	6.5	1.5	1,0	4.92 ab
5	0.5	6,0	3,0	0.5	0.5	2.67 c

Fuente: Ensayo de rotaciones en SD. 2009. Chacra Experimental Integrada Barrow.

El mayor número de individuos se dio con otros gusanos blancos, como *Cyclocephala sp.* y *Philochloenia sp.* (Tabla 15). Aunque estas especies presentan un menor impacto en comparación con *Diloboderus*, la cantidad de individuos presentados incidió sobre el índice DILAB, lo que permitió orientar sobre la real situación de cada tratamiento. Las situaciones con mayor índice correspondieron a los dos sistemas mixtos (2=rotación con pasturas y 4= rotación con verdeos de invierno), resultando con menor índice el tratamiento 1 (secuencia conservacionista= 1 cultivo por año) y el tratamiento 5 (agricultura intensa= 20 cultivos en 12 años). En la zona núcleo, estudios realizados por Iannone (2007) señalan que según las rotaciones de cultivos en SD, la población de gusanos blancos disminuyó el 33% cuando el antecesor fue soja en comparación con maíz (11 gb.m⁻² y 16,3 gb.m⁻², respectivamente). En nuestro caso, todas las situaciones presentaron como antecesor inmediato soja y en el caso específico del tratamiento 5, en nueve de los doce años evaluados el cultivo de soja estuvo presente como cultivo de primera o de segunda.

En cuanto al índice DILAB, distintos estudios han determinado que el umbral de acción para trigo es de 4-5, para maíz 2-3 y para girasol 2-3 DILAB.m⁻².

También es importante destacar que en el sistema de SD, el control biológico de estos gusanos cumple un papel muy importante. Existe una gran diversidad de enemigos naturales que adquieren un rol fundamental en el equilibrio de las poblaciones de estos insectos. Los enemigos naturales, como la misma plaga, sufren fluctuaciones en el tiempo debidas, en general, a variaciones ambientales. Investigaciones sobre el control biológico han permitido identificar una importante diversidad de enemigos naturales de *Diloboderus abderus* en la región pampeana. Estos incluyen entre otros a hongos patógenos, avispas parásitas y larvas de moscas predatoras (Aragón, 2004).

Consideraciones finales - Acciones a futuro

Los resultados obtenidos en los ensayos de larga duración de la CEI Barrow, permitieron evaluar desde un punto de vista sistémico, las modificaciones que ocurren con la aplicación de distintos manejos a los sistemas productivos regionales. También posibilitaron el inicio de nuevas líneas de trabajo.

A través de los mismos se demostró la importancia de la rotación de cultivos como una herramienta que contribuye a estabilizar los sistemas de producción. Para el caso de la región en estudio, la elección de los cultivos que componen la secuencia resultó fundamental para manejar los niveles de MO de la capa arable del suelo. Una mayor presencia de gramíneas benefició el aporte mientras que el predominio de oleaginosas en la secuencia, especialmente soja, provocó importantes disminuciones. La magnitud de esa pérdida se acentuó cuando se emplearon labranzas.

El sistema de labranza aplicado tuvo una gran importancia, alterando el sistema de distintas maneras. Sus efectos sobre propiedades físicas y microbiológicas del suelo como así también sobre la MO y la oferta de nutrientes deben ser ajustados.

Estos resultados alertan sobre la pérdida de fertilidad de estos suelos, situación que puede revertirse con la inclusión de pasturas en la rotación o la planificación de secuencias que no impliquen balances negativos de MO, con lo cual se lograría evitar la posible degradación del recurso suelo y mantener sustentable al sistema de producción.

En SD es importante planificar la secuencia de cultivos para potenciar sus resultados. La periodicidad e intensidad con que se repiten los cultivos influyen sobre la cantidad y calidad del rastrojo aportado al suelo, el consumo relativo de diferentes nutrientes, el volumen de suelo explorado por las raíces, el consumo de agua, el control de patógenos y plagas, etc. La SD genera importantes cambios cualitativos y cuantitativos a nivel del suelo, puesto que la cobertura con rastrojos y la no remoción, generan un hábitat con condiciones de humedad y temperatura totalmente diferente al hallado en LC.

Bajo SD, la dependencia de la fertilización nitrogenada fue más importante ya que la mineralización de MO desde el suelo disminuyó por efecto de la eliminación de la labranza y por consiguiente, la oferta de N. Esa mayor demanda de N para conseguir iguales rendimientos se produjo especialmente durante los primeros años de establecido el sistema. Sin embargo, los estudios actuales estarían mostrando que el mantenimiento de una SD diversificada en el tiempo permitiría incrementar el contenido de MO en los horizontes superficiales y su mineralización, por lo cual la posterior oferta de N orgánico podría ser igual o mayor que la de LC.

Considerando el avance del cultivo de soja en las secuencias de la región en los últimos años, resulta necesario insistir sobre la adopción de diversas alternativas que permitan equilibrar el balance de N como: incrementar la proporción de gramíneas para grano con posibilidades de obtener respuesta a la aplicación de N; aumentar la proporción del doble cultivo (gramínea/soja) que permite reponer N al cereal y realizar soja posteriormente; o incluir CC invernal (gramínea/leguminosa) aprovechando la posibilidad de incorporar N al sistema a través de la FBN de la leguminosa.

Considerar el balance de nutrientes conociendo los requerimientos nutricionales de los cultivos, resulta una herramienta de gran utilidad para diagramar eficientes estrategias de fertilización. Los resultados obtenidos, al analizar las secuencias propuestas para la región, estarían alertando sobre la necesidad de ajustar la dosis de N para algunos cultivos.

La evolución de las poblaciones de malezas, y el incremento del uso de herbicidas para el control de nuevas apariciones, demuestran claramente que el manejo de malezas resulta insuficiente cuando se tiene en cuenta un único método de control. El control químico es una estrategia de corto plazo, circumscripita sólo a eliminar las malezas para disminuir la competencia estacional que ejercen sobre los cultivos. Para preservar el ambiente y ayudar a retrasar la aparición de malezas resistentes a herbicidas, es necesario implementar estrategias de manejo integrado. Las mismas deben estar

sustentadas en el conocimiento del comportamiento ecológico de la dinámica de las malezas, que incluyan, además de rotaciones diversificadas de cultivos de invierno y de pasturas, el mejoramiento de otras prácticas agronómicas como el uso de la habilidad competitiva de los cultivares, época de siembra, CC, manejo de los sistemas de labranzas, control biológico, etc.

La gran diversidad de géneros y especies de hongos, merece especial atención en la continuidad de su estudio en el tiempo. Es necesario observar las posibles variaciones estacionales que ocurran, a los efectos de detectar cambios en la dinámica de la comunidad. Asimismo, muchos de estos géneros deberán ser corroborados como potenciales fitopatógenos a través de pruebas de patogenicidad. En el caso de géneros como *Trichoderma* y *Penicillium*, se continuarán con estudios referidos a la potencial producción de metabolitos secundarios para ser utilizados como agentes biocontroladores. Continuar con este tipo de estudios permitirá evaluar el uso potencial de la comunidad fúngica como indicadora de calidad de suelos, a fin de contribuir al manejo de cultivos de importancia agronómica en la Argentina.

Rotaciones sustentables

La necesidad de analizar la empresa agropecuaria con una visión de sistema de producción nos hace entender que para su funcionamiento deben armonizarse aspectos productivos, económicos y ambientales.

La base para lograr altas producciones sustentables consiste en mantener los niveles de MO del suelo. La rotación con pasturas perennes con base de alfalfa, sigue siendo una herramienta de fundamental importancia para recuperar las propiedades edáficas perdidas en la fase agrícola.

De mantenerse la prolongación de los ciclos con cultivos de cosecha (esquemas estrictamente agrícolas), es necesario integrar la SD, la fertilización y la rotación de cultivos. La SD permite disminuir los procesos erosivos, mejorar el balance de agua e intensificar la producción. La fertilización posibilita recuperar el nivel nutricional óptimo para incrementar la producción y a su vez generar aumentos de biomasa para mejorar el aporte de rastrojos. Pero el verdadero fundamento de la sustentabilidad es la rotación de cultivos, ya que solamente con alta proporción de gramíneas puede alcanzarse el aporte de C necesario para equilibrar las pérdidas de MO.

La actual producción agropecuaria exige un mejor conocimiento de los componentes del agroecosistema (físicos, biológicos y socioeconómicos), de las interrelaciones que ocurren entre ellos

y el impacto ambiental que éstos producen. Es necesario avanzar hacia una tecnología que abarque al sistema en general, cuyo objetivo central no sea alcanzar un rendimiento máximo, sino una estabilidad de largo plazo. El término sustentabilidad implica una agricultura racional, la cual pretende mantener la capacidad productiva del sistema.

Obtener sistemas agrícolas de bajos insumos, diversificados y eficientes en el uso de la energía, es la meta que debemos alcanzar. El desafío que se presenta para los próximos años va a estar orientado a tratar de lograr un aumento de la productividad de los sistemas agropecuarios en concordancia con la conservación de los recursos naturales.

Para ello, es importante conciliar las necesidades de corto plazo que obedecen a la rentabilidad, con las de mediano y largo plazo que apuntan a la sustentabilidad del sistema de producción. Se debe alcanzar un equilibrio entre producción y conservación. De nada vale producir de manera económicamente rentable cuando se degradan los recursos. Es necesario incorporar el costo ecológico para lograr alcanzar una producción sostenible en el tiempo, que sea económicamente viable y financieramente posible.

Se deben aprovechar los procesos naturales generados a partir del propio manejo, como incorporación de rastrojos, reciclaje de MO y nutrientes, y fijación de N a través de especies leguminosas. Para alcanzar rendimientos elevados será necesario el empleo de fertilizantes en forma eficiente de acuerdo con la demanda y el momento de utilización de cada cultivo. Se debe aumentar al máximo el uso productivo del agua almacenada en el suelo, evitando el escurrimiento y mejorando la infiltración de las precipitaciones.

La aplicación de pesticidas debe efectuarse conociendo el ciclo de las plagas y efectuando un uso más racional y eficiente de los productos. El control de malezas debe tener en cuenta la residualidad y su posible efecto contaminante. Estos controles químicos deben ajustarse a un manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas, articulado con rotaciones que corten sus ciclos biológicos, realizados fundamentalmente con el menor impacto sobre el ambiente.

La diversificación del sistema podrá ser mejorada en el tiempo mediante rotaciones y secuencias de cultivos alternadas, y en el espacio, en forma de CC, intercultivos, sistemas agrícola-ganaderos. Todo esto va a permitir alcanzar una mayor estabilidad del sistema de producción, disminuyendo las posibilidades de riesgo que se presenten debido a variaciones en el clima o de mercado.

En consecuencia, el objetivo futuro de alta productividad que se requiere para generar alimentos, deberá estar respaldado por una tecnología que concilie mayor productividad con calidad y conservación de los recursos.

Diagramando rotaciones de cultivos coherentes en cuanto a diversificación e intensidad en relación al ambiente productivo, efectuando labranzas conservacionistas, prácticas de manejo racionales y una nutrición de los cultivos fundamentada en balances, es como se podrá conservar el suelo y mejorar la estabilidad de los actuales sistemas de producción.

Bibliografía

- 1- -Alvarado L. 1979. Insectos de suelo. Ciclo de vida de *Diloboderus abderus* (Bicho torito o candado). Su relación con el manejo de cultivos. INTA Carpeta de producción vegetal. Información N° 17. Estación Experimental Pergamino.
- 2-Alvarez R; Steinbach H; Lavado R; Gutiérrez Boem F. 2006. Balance de carbono en suelos cultivados. En: Materia orgánica: Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos. Cap. 5(55-67)
- 3-Alvear M; Pino B; Castillo R; Trasar-Cepeda C; Gil-Sotres F. 2006. Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un alfisol del sur de Chile. J. Soil Sc. Plant Nutr. 6: 38-53.
- 4-Andrade F y Sadras V. Ed. 2000. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Unidad Integrada INTA Balcarce-UNMDP. Ed. INTA.
- 5-Aragon J., 2004. Control del gusano blanco en trigo. Trigo: Actualización 2004. Información para Extensión N°85. EEA INTA Marcos Juárez.
- 6-Atlas R; Bartha R. 1998. Microbial Ecology Fundamentals and Applications. Fourth Edition. Benjamin Cummings Publishing Company. Menlo Park, Ca. USA. pp. 694.
- 7-Bandick A; 1999. Field management effects on soil enzymes activities. Soil Biol Biochem. 31: 1471-1479.
- 8-Barsky, O. 1988. La agricultura pampeana: transformaciones productivas y sociales. INDEC/INTA/IICA. Buenos Aires (422 pag.).
- 9-BaydirNews. 2010. Boletín digital Bayer. Gusanos de suelo. Actualidad técnica. cropscience.bayer.com.ar/novedades/detalle.php?contentID=23-52k
- 10-Bedano J; Ruf A. 2007. Soil predatory mite communities (Acari: Gamasina) in agroecosystems in central Argentina. Applied Soil Ecology 36: 22-31.
- 11-Bentley R. 1990. Managing grass weeds in a rotational cropping system. Proceedings of the Ninth Australian Weeds Conference, Adelaide, pp. 243-5.
- 12-Berardo A. 2004. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable. Informaciones agronómicas del cono sur. INPOFOS 23:23-25.
- 13-Bergh R; García F; Ferrari L; Rizzalli R. 1996. Actas XV Congr. Arg. Ciencia del Suelo.

- 14-Borda M. 2004. Demandas hídricas de los principales cultivos de la región centro-sur bonaerense. *Revista AgroBarrow* Nº 35. Pp 15-18.
- 15-Borda M. 2012. Las sequías históricas. Página web Chacra Experimental Integrada Barrow. <http://anterior.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/agrometeo/otrostrabajos/sequias2010.pdf>
- 16-Buschiazzi D; Panigatti J; Unger P. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49(1-2):105-116.
- 17-Calderón F; Jackson L; Scow K; Rolston D. 2000. Microbial responses to simulated tillage in cultivated and uncultivated soils. *Soil Biology & Biochemistry.* 32:1547-1559.
- 18-Calviño P; Sadras V; Andrade F. 2003. Development, growth and yield of late-sown soybean in the southern Pampas. *European Journal Agronomy* 19: 265-275.
- 19-Campbell C; Zentner R. 1993. Soil organic matter as influenced by crop rotations and fertilization in an aridic haploporoll. *Soil Sci. Soc. A.J.* 57:1034-1040
- 20-Campillo R; Sadzawka A. 2005. La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. www.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33853.pdf.
- 21-Carfagno P; Eiza M; Babinec F; Quiroga A. 2013. Inclusión de cultivos de cobertura en la dinámica hídrica de hapludoles y haplustoles del oeste de la provincia de Buenos Aires y noreste de La Pampa. En: Alvarez C; Quiroga A; Santos D. y Bodrero M. (eds). *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción.* pp 36-49.
- 22-Carrasco N. 2012. Impacto de diferentes secuencias de cultivos sobre la macro y mesofauna del suelo. En: Forján H. y Manso L. (eds). *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta Cerealera del centro sur bonaerense. 30 años de experiencias.* Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina pp 75-77.
- 23-Caviglia O. 2005. Intensificación de la agricultura en el sudeste bonaerense por la incorporación del doble cultivo trigo-soja. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Mar del Plata. Unidad Integrada Balcarce.
- 24-Chacra Experimental Integrada Barrow. 2016. Estimaciones anuales de área sembrada, 2002-2015. Informes técnicos anuales.
- 25-Ciampitti I; García F. 2009. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. IPNI Cono sur. En: www.ipni.net/ipniweb/portal.
- 26-Cordone G; Ferrari M; Ostojic J; Planas G. 1993. Caracterización de los residuos de cosecha de los principales cultivos del norte de la Provincia de Buenos Aires. En: *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mendoza, Octubre 1993.* Pp. 191-192.
- 27-Cordone G; Martínez F. 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones agronómicas del cono sur. INPOFOS* 24:1-4.
- 28-Dexter A. 2004. Soil physical quality. Part. I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120(3-4):201-214.
- 29-Domínguez G; Studdert G; Echeverría H. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. En: Echeverría, H.E.; García F.O. (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos.* Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp 207-229.

- 30-Domínguez G; Diovisalvi N; Studdert G; Monterruvianesi M. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on Mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102(1):93–100.
- 31-Doucet C; Weaver S; Hamill S; Zhang J. 1999. Separating the effects of crop rotation from weed management on weed density and diversity. *Weed Sci.* 47: 729-735.
- 32-Duhalde J; Forján H. 1985. Caracterización agroecológica y productiva de la zona mixta triguera. Documento de circulación interna. Chacra Experimental de Barrow. 8 pp.
- 33-Duval M; Galantini J; Wall L; Martínez J; Iglesias J; Canelo S. 2014. Fracciones orgánicas como indicadores de calidad de suelos bajo siembra directa. En: Galantini J (ed.) *Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del su y sudoeste bonaerense*. Pp 69-75.
- 34-Echeverría N; Querejazu S; De Lucia M; Silenzi J; Forján H; Manso M. 2012. Estabilidad y carbono orgánico de agregados bajo rotaciones en siembra directa. *Actas XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo- XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, abril 2012.
- 35-Eiza M; Fioritti N; Studdert G; Echeverría H. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ci. Suelo* 23(1):59–68.
- 36-Eiza M; Studdert G; Fioritti N.; Domínguez G. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en Molisoles de Balcarce. *Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Salta-Jujuy, septiembre de 2006. En CD.
- 37-Fabrizzi K; García F; Costa J; Picone L. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81(1): 57-69.
- 38-Ferrari M. 2010. Nuestros actuales sistemas de producción agrícola son ambientalmente sustentables?. *Informaciones agronómicas del cono sur*. INPOFOS 48:6-10.
- 39-Ferraris G. 2003. Nutrientes absorbidos por los cultivos pampeanos. EEA INTA Pergamino. En: *Artículos técnicos*. Página web Proyecto Fertilizar INTA.
- 40-Follet R. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Tillage Res*61:77-92
- 41-Forján H. 1999. Intensificación agrícola en la región. *Rev.AgroBarrow* Nro.25 (9-11).
- 42-Forján H. 2000. Rotaciones en sistemas mixtos: la pastura perenne base de la agricultura sustentable en la región. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación; INTA Centro Regional Buenos Aires Sur. Material didáctico N° 1. 11 p.
- 43-Forján H. 2004. Balance de nutrientes en secuencias agrícolas de la región sur bonaerense. *Informaciones agronómicas del cono sur*. INPOFOS 21: 8-11
- 44-Forján H; Manso L. 2008. Factores a considerar previo a la siembra de trigo. *AgroBarrow* N°40.
- 45-Forján H; Manso L. 2008. El doble cultivo. *AgroBarrow* N°42.
- 46-Forján H; Manso L. 2012. (Eds). *Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro sur bonaerense. 30 años de experiencias*. 102 pp.

- 47-Forján H; Manso L; Zamora M. 2012. Evolución del contenido de materia orgánica en rotaciones agrícolas. Actas XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo- XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, abril 2012. En CD.
- 48-Franzluebbers A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil Till. Res. 66(2):95-106.
- 49-Galantini J; Landriscini M ; Hevia C. 2006. Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo en siembra directa. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, septiembre de 2006. CD.
- 50-García F. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. INPOFOS cono sur. Publicación Jornada Fertilidad 2000 (Pp.40-43).
- 51-García F. 2003. Balance de nutrientes en la rotación: Impacto en rendimientos y calidad del suelo. Publicación 2º Simposio de Fertilidad y Fertilización en Siembra Directa. Aapresid, Proyecto Fertilizar e INPOFOS.
- 52-García F; González San Juan M. 2010. Balances de nutrientes en Argentina. Cómo estamos? Cómo mejoramos?. Informaciones agronómicas del cono sur 48:1-5.
- 53-Gassen D. 2001. Beneficios de escarabeídos en lavouras sob plantio direto. Pp. 159-168 en: -Díaz Rosello R. (coord.). Siembra directa en el cono sur. PROCISUR. Montevideo. 450 pp
- 54-González N. 2002. Nutrición nitrogenada del cultivo de soja. Uso de inoculantes. Actas de 19ª.Jornada de Actualización Profesional. INTA-FCA UNM del Plata-CIAM.
- 55-Grant C; Lafond G. 1993. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on clay soil in southern Saskatchewan. Can. J. Soil Sci. 73(2):223-232.
- 56-Gudelj O; Masiero B. 2000. Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. Actas 17º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, abril de 2000. En CD.
- 57-Gudelj V; Galarza C; Ferrari M; Senigagliaesi C; Berardo A; Darwich N; Echeverría H. 2006. La fertilización en cultivos extensivos de la región pampeana argentina: aportes del INTA. Informaciones agronómicas del cono sur. INPOFOS 30: 19-21
- 58-Iannone N. 2007. Manejo de gusanos blancos en el cultivo de trigo. Sistema de Alerta – Servicio Técnico – INTA Pergamino 07-06-2012.
- 59-Istilar C; Yannicari M. 2011. Análisis de la evolución de las malezas en cereales de invierno durante 27 años en la zona sur de la pampa húmeda argentina. Actas Congreso, XX Congreso ALAM, Viña Del Mar, Chile. 1 (487:486).
- 60- Istilar C; Forján H. 2012. Efecto de las rotaciones de cultivos sobre las malezas. En: Forján H; Manso L. (Eds). Rotaciones y secuencias de cultivos en la región mixta cerealera del centro sur bonaerense. 30 años de experiencias. 102 pp.
- 61- Istilar C; Forján H; Manso L; Yannicari M; Gigón R. 2015. Efecto conjunto de la historia del lote y los sistemas de labranza sobre las poblaciones de malezas luego de 10 años de rotación de cultivos en el sur de la provincia de Buenos Aires. En: Actas XXII Congreso Latinoamericano de Malezas ALAM y 1er. Congreso Argentino de malezas ASACIM. Capítulo Manejo de Malezas pp 29.

-
- 62-Jenkinson D; Ladd J. 1981. Microbial Biomass in Soil: Measurement and Turnover. In: Paul EA, Ladd JN, editors. Soil Biochemistry. Vol. 5. New York: Marcel Dekker. pp. 455–471.
- 63-Kladivko E. 2001. Tillage systems and soil ecology. Soil Till. Res. 61 (1): 61-76.
- 64-Krüger H. 1996. Informe Técnico 58. INTA Bordenave
- 65-Krüger H. 1996. Compactación en Haplustoles del Sudoeste Bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. Ci. Suelo 14(2):104-106.
- 66-Lampurlanes J; Cantero-Martínez C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. Agron. J. 95(3):526-536.
- 67-Larney F; Kladivko E. 1989. Soil strength properties under four tillage systems at three long-term study sites in Indiana. Soil Sci. Soc. Am. J. 53:1539-1545.
- 68-Larre J. 2002. Tesis de grado. Facultad Agronomía. UBA. Agriculturización en la región pampeana. Análisis de su evolución en zonas mixtas a través de datos secundarios 65 pp.
- 69-Lavelle P; Bignell D; Lepage M; Wolters V; Roger P; Ineson P; Heal O; Dhillon S. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. Eur. J. Soil Biol. 33:159-193.
- 70-Lázaro L. 1996. Determinación del rendimiento de trigo ante cambios en la disponibilidad de nitrógeno generada por distintos cultivos antecesores. Tesis de Ms. Sc. Programa de post-grado en Prod. Vegetal. Fac. Cs. Agr. UNMdP.
- 71-Magurran A. 1988. Ecological diversity and its measurement. Princeton University Press. Princeton, New Jersey. Pp. 179.
- 72-Mahaffe W; Kopper J. 1997. Temporal changes in the bacterial communities of soil, rhizosphere, and endomicorrhiza associated with field-grown cucumber (*Cucumis sativus* L.). Microb. Ecol. 34:210-223.
- 73-Manso L; Forján H. 2006. Dinámica de la materia orgánica y balance de carbono bajo siembra directa. AgroBarrow Nº 36.
- 74-Manso L; Forján H; Studdert G; San Martino S. 2012. Efecto de sistemas de labranza contrastantes sobre algunas propiedades de un molisol de Tres Arroyos bajo distintos usos previos. Rev. FCA UNCuyo 44(1): 85-99.
- 75-Martellotto E; Salas H; Lovera E. 2001. Sustentabilidad de los sistemas agrícolas en la provincia de Córdoba: Factores que la condicionan. Boletín técnico INTA Manfredi (12 p.)
- 76-Melgar R; Torres Duggan M. 2002. Evolución histórica y perspectivas del mercado argentino de fertilizantes. En: Productos y Servicios en el Comercio Moderno de Fertilizantes. 276 pp. INTA Pergamino.
- 77-Moreno M; Silvestro L; Forján H; Manso L; Berón C; Arambarri A. 2011. Ocurrencia de especies fúngicas en un suelo del centro- sur bonaerense: respuesta a diferentes manejos agrícolas. XII Congreso Argentino de Micología, Posadas, Misiones, Argentina.
- 78-Mortimer A. 1990. The biology of weeds. Pages 1-43 in R. J. Hance and K. Holly. editors. Weed control handbook: principles. Eighth edition. Blackwell Scientific, Oxford. England
-

- 79-Nesci A; Barros G; Castillo C; Etcheverry M. 2006: Soil fungal population in preharvest maize ecosystem in different tillage practices in Argentina. *Soil & Tillage Research*, 91:143-149.
- 80-Perfect E; Kay B; Loon W; Sheard R; Posajok T. 1990. Rates of change in soil structural stability under forages compared to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (1): 179-186.
- 81-Pruett C; Guaman I. 2001. Principios de manejo integrado de plagas y biocontrol en siembra directa. En: *Siembra Directa en el cono sur. Documentos PROCISUR. MCA.* p. 121-141
- 82-Puget P; Lal R. 2005. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil Tillage Res.* 80:201-213
- 83-Quiroga A; Ormeño O; Peinemann N. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos En: Panigatti, J; Marelli, H; Buschiazzi, D; Gil, R. eds. *Siembra Directa. Hemisferio Sur.* pp. 237-243.
- 84-Racca R; González N. 2007. Nutrición nitrogenada de la alfalfa e impacto de la fijación biológica del nitrógeno. En: *El cultivo de la alfalfa en Argentina.* Pp.67-79.
- 85-Ruffo M; Parsons A. 2004. Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Boletín INPOFOS* N°21 (Pp.13-15).
- 86-Salvaghiotti F; Collino D; Perticari A; Piccinetti C; Ovando G; Urquiaga S; Racca R. 2015. El aporte de la fijación biológica de nitrógeno en el cultivo de soja en Argentina. Resumen de: *Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina. Plant Soil* 392 (1-2):239-252.
- 87-Santos D; Wilson M; Ostinelli M. 2012. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. *Protocolos básicos comunes. Ediciones INTA (70 pp.)*
- 88-Schalamuk S; Chidichimo H; Cabello M. 2007. Variación en la composición de especies de Glomeromycota (Fungi) en cultivos de trigo bajo distintos sistemas de labranza. *Boletín de la Soc. Argentina de Botánica.* 42: 45-53.
- 89-Silvestro L; Moreno M; Forján H; Arambarri A. 2011. Comunidad celulolítica de hongos del suelo bajo siembra directa en Barrow, Buenos Aires. *Cellulolytic fungal community of soil under zero-tillage in Barrow, Buenos Aires province. XXXIII Jornadas Argentinas de Botánica.*
- 90-Sinsabaugh R; Reynolds H, Long T. 2000. Rapid assay for amidohydrolase (urease) activity in environmental samples. *Soil Biol Biochem* 32:2095–2097.
- 91-Soane B. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Till. Res.* 16(1-2): 179-201.
- 92-Studdert G; Echeverría H. 1998. Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. En: *Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Villa Carlos Paz, mayo 1998.*
- 93-Studdert G; Echeverría H. 2006. Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de nitrógeno para el trigo en la rotación. *Ciencia del Suelo* 24:89-96.
- 94-Studdert G; Echeverría H; Casanovas E. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1466-1472.
- 95-Suñer, L. 2015. Tesis doctoral. Universidad da Coruña, España. Formas de fósforo edáfico como indicadores del efecto de las prácticas de manejo en la región pampeana argentina. (151 pag.)

-
- 96-Taboada M. 2008. Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física En: Taboada, M.A.; Álvarez, C.R (eds.). Fertilidad física de los suelos 2º ed. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
- 97-Taboada M; Micucci F; Alvarez C. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: Taboada, M.A.; Álvarez, C.R (eds.). Fertilidad física de los suelos 2º ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp. 94-153.
- 98-Tian L; Dell E; Shi W. 2010. Chemical composition of dissolved organic matter in agroecosystems: Correlation with soil enzyme activity and carbon and nitrogen mineralization. *App. Soil Ecology*. 426-435.
- 99-Tisdall J; Oades J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33(2):141-161.
- 100-Tuesca D; Puricelli E; Papa J. 2001. A long-term study of weed flora shifts in different tillage systems. *Weed Research*, 41: 369–382.
- 101-Turco R; Kennedy A; Jawson M. 1994. Microbial indicators of soil quality. In: Doran, J.W. (Ed.) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science of Society of America, Special Publication 35, Madison, WI. pp. 73-90.
- 102-Ventimiglia L; Carta H; Rillo S. 2000. Exportación de nutrientes en campos agrícolas. *Informaciones agronómicas del cono sur*. INPOFOS nº7.
- 103-Wander M; Traina S; Stinner B; Peters S. 1994. Organic and conventional management effects on biologically-active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* -58(4):1130-1139.
- 104-Zamora M; Baez A; Iriarte L. 2002. Colza/Soja de segunda como componente de una rotación bajo siembra directa. *Informe técnico de cosecha gruesa 2002/2003*. CEI Barrow.pp 25-29.

Secuencias de cultivos con trigo en el Sudoeste Bonaerense

Hugo R. Krüger, Josefina P. Zilio, Franco D. Frolla

INTA EEA Bordenave.

Descripción regional

La región semiárida del sudoeste de la provincia de Buenos Aires se ubica sobre el flanco sur del sistema de Sierras Australes (Figura 1). Incluye una serie de planicies suavemente onduladas, piedemontes y mesetas de baja altura, interrumpidas, en sectores, por antiguos valles fluviales.

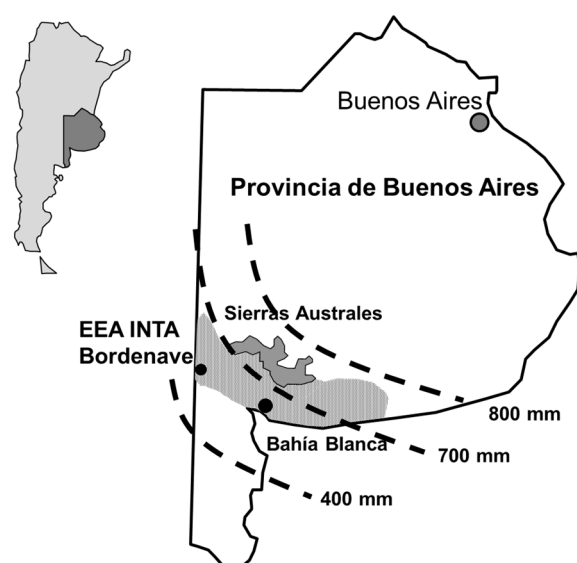


Figura 1 - Ubicación y área de influencia del experimento.

En el paisaje, elaborado sobre sedimentos recientes de origen eólico, dominan materiales loésicos, arenosos y arcillosos, que dan lugar a suelos fértiles del orden Molisoles. Principalmente sobre el oeste, los sedimentos arenosos formaron suelos Entisoles, de características menos favorables para la producción agrícola.

Un factor común a toda la región es la presencia de un horizonte subsuperficial consolidado por carbonato de calcio (horizonte petrocálcico), que se conoce genéricamente como “tosca” y limita la profundidad efectiva de los suelos. Acompaña en forma general al relieve aflorando en las partes

elevadas o sus bordes, y profundizando en los bajos, con una profundidad media cercana al metro (SAGyP– INTA, 1989).

Las parcelas que dan origen a esta información se localizan en la Estación Experimental Bordenave del INTA, en el partido de Puán (S 37°51'55" S, 63°01'20" W), sobre una asociación de suelos cuyo componente principal fue clasificado originalmente como *Haplustol éntico* (Gómez *et al.*, 1981), y reclasificado en el sistema taxonómico actual como *Paleustol petrocálcico* (Amiotti N., *com. pers.*). Sus principales características se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 – Características del suelo en el sitio del experimento (Gómez *et al.*, 1981).

Horizonte	A1	AC	C1	C2	Tosca
Profundidad (cm)	0-23	23-37	37-61	61-100	100+
Carbono orgánico (%)	0,86	0,37	0,29	0,15	-
Nitrógeno total (%)	0,069	0,046	-	-	-
Arcilla (%)	6,1	11,2	10,6	6,9	-
Limo (2-50 μm) (%)	16,6	10,6	8,7	9,0	-
Arena muy fina (50-100 μm)	8,1	5,5	6,1	4,8	-
Arena fina (100-250 μm)	57,1	58,0	59,1	67,8	-
Arena media a gruesa (250-1000 μm)	12,1	14,7	15,5	11,5	-
Equivalente humedad (%)	10,8	11,8	11,2	8,4	22,3
pH (agua 1:2,5)	7,2	7,3	7,6	7,8	-
CIC (mEq 100 g ⁻¹)	11,0	12,1	10,8	9,9	18,3

El clima de la región es continental templado, con una temperatura media anual de 15°C. Las precipitaciones se concentran en otoño y primavera, con una estación seca a fines del invierno y una semiseca a mediados del verano. La zona semiárida está comprendida entre las isohietas de 600-700 mm año⁻¹ en su extremo noreste, y de 400-500 mm año⁻¹ en su extremo sur. El período medio libre de heladas comprende los meses de diciembre, enero y febrero, aunque es posible la ocurrencia de estos eventos aún en ese período. Los vientos dominan del sector norte, y presentan intensidades importantes en todas las épocas del año, con un máximo en primavera.

La precipitación media anual en el sitio del experimento es de 660 mm (serie 1911-2016), aunque la variabilidad es la característica principal del clima regional. Las variables meteorológicas (principalmente precipitación y temperatura) se manifiestan en forma de ciclos irregulares, que oscilan positiva o negativamente respecto a las medias. Esto determina la alternancia de períodos

secos y fríos –desfavorables para la actividad agropecuaria, y condicionantes de procesos de erosión del suelo – con períodos cálidos y húmedos, que generan condiciones propicias aunque con potencial ocurrencia de procesos de degradación química de suelos, inundaciones y anegamientos.

Los sistemas productivos locales, tradicionalmente de tipo mixto con dominancia variable de la ganadería bovina sobre la agricultura y menor actividad ovina, han ido incrementando gradualmente la superficie agrícola. La cría y recría son las principales actividades ganaderas suplementadas, generalmente, con forrajes secos y granos. Las pasturas polifíticas con base en alfalfa, antes relativamente abundantes, son ahora escasas con tendencia a desaparecer, y se complementan con pasturas perennes de pasto llorón (*Eragrostis cúrvula* (Schrader) Ness), o agropiro (*Thinopyrum ponticum*), y pastizales naturales en diversa condición. Las condiciones edafoclimáticas configuran un riesgo relativamente alto para cultivos de cosecha de verano, pero los cultivos forrajeros como sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.), maíz (*Zea Mays*; L.), moha (*Setaria italica* (L.) P.Beauv.), y mijo (*Panicum miliaceum*; L.), se han incrementado en los últimos años por un aumento en las precipitaciones estivales. Los cultivos de cosecha invernales: trigo (*Triticum aestivum* (L.) Thell), cebada (*Hordeum vulgare*; L.), y avena (*Avena sativa*; L.), ocupan mayor superficie relativa junto con cultivos forrajeros anuales: avena, centeno (*Secale cereale* (L.) M.Bieb.), cebada y triticales (*xTriticosecale*, Wittmack). La siembra directa está siendo adoptada en forma creciente, aunque la labranza convencional basada sobre herramientas de discos (rastra y arado-rastra), mantiene vigencia, especialmente en el sur de la región.

Los procesos erosivos son frecuentes y en distintas épocas del año por una combinación de factores climáticos y escasa cobertura de los suelos, sea por sobrepastoreo o labranza. En la última década, un episodio climático seco y frío produjo importantes fenómenos de erosión eólica en todo el sur de la provincia. La degradación química de los suelos, por balances negativos de materia orgánica y fósforo, también representa una consecuencia negativa de la actividad agropecuaria (Krüger *et al.*, 2015).

Objetivos del experimento

Al momento de iniciarse el experimento el diagnóstico describía sistemas productivos mixtos con excesiva superficie destinada al cultivo de trigo. La falta de barbechos reducía la acumulación de agua en el suelo y determinaba mala implantación de los cultivos y bajos rendimientos (Glave A, com.

pers.). En la parte ganadera, la baja superficie con pasturas perennes y la utilización de residuos de cosecha y pastos naturales para la alimentación animal determinaba variabilidad en la producción forrajera, favoreciendo el sobrepastoreo y la erosión eólica en años secos.

En consecuencia, los objetivos originales de la experiencia consideraron aportar conocimientos que permitieran una mejor planificación de la empresa rural:

- 2 estudiar secuencias de cultivos que, manteniendo al trigo como cultivo base, incrementaran los rendimientos y mejoraran la productividad del sistema,
- 2 analizar sus efectos sobre la calidad del suelo,
- 2 y estudiar su relación con factores climáticos, principalmente la precipitación.

Tratamientos

Con algunas modificaciones y variaciones en el tiempo los tratamientos originales pueden describirse como:

1.2Secuencias pastura-agricultura (Past/Tgo). Cinco años de pastura mixta de alfalfa (*Medicago sativa*; L.) y gramíneas, seguidos de cinco años de trigo.

2.2Alternancia de verdeos anuales de invierno (avena, centeno o triticale consociados con vicia (Vicia villosa Roth), y trigo (VI/Tgo). Incluyen secuencias 1x1 (un año de verdeo y uno de trigo), o 2x2 (dos años continuos de cada cultivo). Este tratamiento apunta a sistemas mixtos, con mayor incidencia de cultivos anuales.

3.2Agricultura continua de trigo (Tgo/Tgo). El cultivo se siembra todos los años luego de un barbecho de aproximadamente seis meses de duración realizado con labranza conservacionista. El monocultivo triguero fue una alternativa tecnológica novedosa y muy discutida al momento de la iniciación del experimento. Se mantiene en algunos sistemas de producción agrícola pura de la región, donde está siendo reconsiderado como una alternativa tecnológica de altos insumos bajo siembra directa.

4.2Alternancia de potrero y trigo (Potr/Tgo). Luego de la cosecha de trigo el campo queda enmalezado y sin cultivo durante unos 15-16 meses, siendo pastoreadas las especies espontáneas de valor forrajero. El barbecho para trigo se inicia relativamente tarde. Este “sistema” de producción era, y

sigue siendo, común en la parte sur de la zona semiárida. Allí lotes que permanecen con pastizales y vegetación espontánea son cultivados periódicamente con trigo, avena, o verdeos de verano.

El experimento se inició en 1975 y continúa al presente Figura 2. Las parcelas originales, de 10 por 20 m de longitud, se dividieron en 1984 para dar lugar a dos subtratamientos: Testigo (sin fertilización), y Fertilizado con nitrógeno (N) y fósforo (P) (que recibió 60 kg N ha⁻¹ y 16 kg P ha⁻¹ en forma de urea y fosfato diamónico al momento de la siembra de cada cultivo de trigo). A partir de 1994 se suspendió la fertilización fosfórica supeditándola a un análisis periódico del P extractable, y se redujo la fertilización nitrogenada a una dosis de 30 kg N ha⁻¹. Se condujo totalmente bajo labranza (rastra de discos excéntrica pesada, arado-rastra, arado de cinceles, cultivador de campo y barra escardadora). En el año 2011 se modificaron los tratamientos originales para adaptarlos a nuevas demandas de información.



Figura 2 – El “Ensayo Rotaciones” de la EEA INTA Bordenave.

El diseño del experimento original no contempló la presencia de todas las fases de las secuencias en cada año, por esto los rendimientos promedio de los tratamientos están compuestos no sólo por

distinto número de campañas sino, en muchos casos, por campañas pertenecientes a distintos años. Como se verá, en la expresión del rendimiento del trigo interactúan factores que varían con las características de cada campaña. Por este motivo la comparación entre tratamientos se realizó sólo en las campañas en las que coincidieron estos tratamientos. Como Trigo/Trigo estuvo presente todos los años, se lo utilizó como referencia. El modelo estadístico fue de tipo factorial (split-split-plot), e incluyó el efecto del año como factor principal, la secuencia como secundario, y la fertilización como terciario, con cuatro replicas en forma de bloques completos aleatorizados.

Rendimientos de trigo

La Figura 3 muestra los rendimientos medios de trigo obtenidos por cada secuencia y nivel de fertilización nitrogenada a lo largo del período estudiado (1975-2008). En la misma se incluye el número de campañas que compone cada promedio. La mayor cantidad de campañas corresponde a Trigo/Trigo Testigo, por su característica de monocultivo anual y de tratamiento inicial. Por la longitud de su ciclo Past/Trigo es uno de los tratamientos con menor número de datos de rendimiento de trigo.

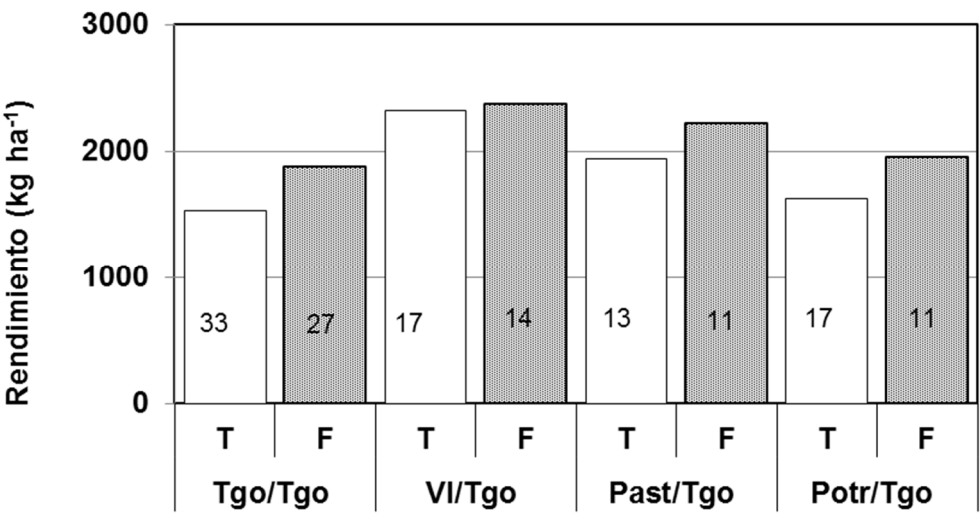


Figura 3 - Rendimientos medios de trigo para el monocultivo (Tgo/Tgo), alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo), secuencia pastura-agricultura (Past/Tgo), y alternancia de potrero y trigo (Potr/Tgo), con y sin fertilización nitrogenada. T= testigo sin fertilización, F=fertilizado. El número en cada barra indica la cantidad de campañas que integra el promedio.

A este nivel elemental de análisis, y teniendo en cuenta las restricciones expresadas en la sección

anterior respecto de esta comparación, los rendimientos sin fertilización muestran dos grupos: las secuencias con leguminosas (VI/Tgo y Past/Tgo), lograron mayores rendimientos medios que la secuencia tradicional (Potr/Tgo), y el monocultivo (Tgo/Tgo). Con fertilización se mantuvo el ordenamiento de tratamientos pero las diferencias se atenuaron.

Si se comparan sólo aquellas campañas en que ciertos tratamientos coinciden, la Figura 4 muestra los rendimientos del monocultivo y el primer trigo después de un verdeo de invierno con vicia, para ocho campañas. Debido a su relación con la precipitación acumulada durante el ciclo de cultivo (explicó entre el 55 y el 60% de la variación de rendimientos), los rendimientos se ordenaron según esta variable.

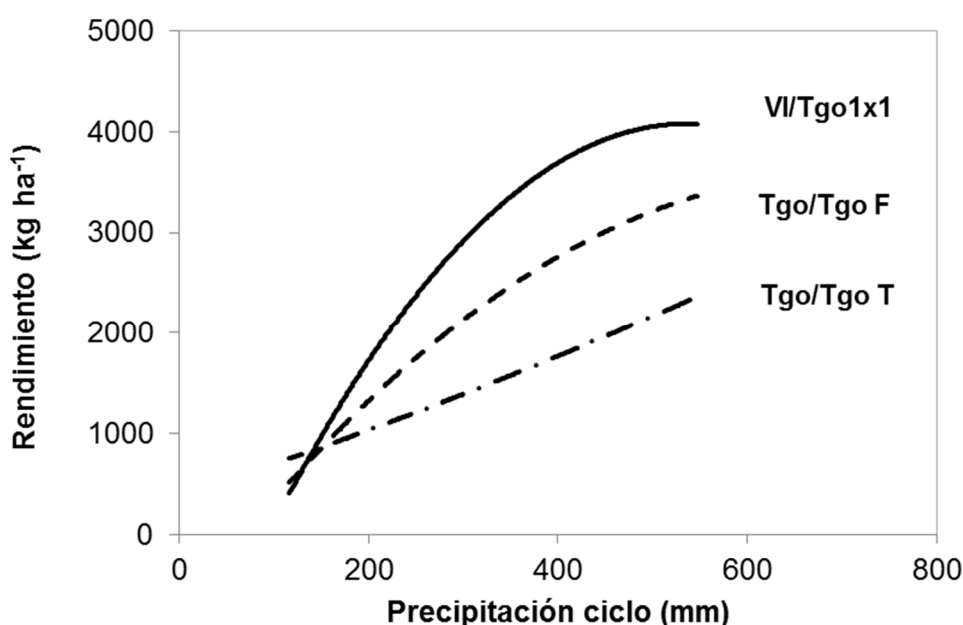


Fig 4 - Rendimientos de trigo en función de la precipitación acumulada durante el ciclo del cultivo (agosto a noviembre), en el monocultivo (Tgo/Tgo) y alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo1x1). T=testigo, F= fertilizado.

Campañas con buenas precipitaciones (mayores que 200 mm), determinaron rendimientos crecientes, mayores para VI/Trigo en cinco de ellas. Por el contrario, en años con escasas precipitaciones o con distribución desfavorable para el cultivo, no se observaron diferencias entre secuencias o éstas favorecieron a Tgo/Tgo. De la misma forma, el efecto de la fertilización nitrogenada también dependió de la precipitación. Tomando a Tgo/Tgo como referencia y considerando los años con respuesta significativa a los tratamientos, el incremento medio de rindes

fue del 103% por efecto de la secuencia VI/Tgo, y del 36% por fertilización. VI/Tgo no respondió a la fertilización, mientras que el monocultivo lo hizo en cuatro campañas con una respuesta media de 1067 kg ha^{-1} . Estos resultados coinciden en cuanto al ordenamiento de los tratamientos, aunque no cuantitativamente respecto de los observados por el simple promedio general de rendimientos en la Figura 2.

En la Figura 5 se comparan cuatro campañas en las que VI/Tgo tuvo uno y dos verdeos de invierno como antecesores. En este caso, la variación de la precipitación acumulada durante el ciclo explicó entre el 90 y 99% de la variación de rendimientos.

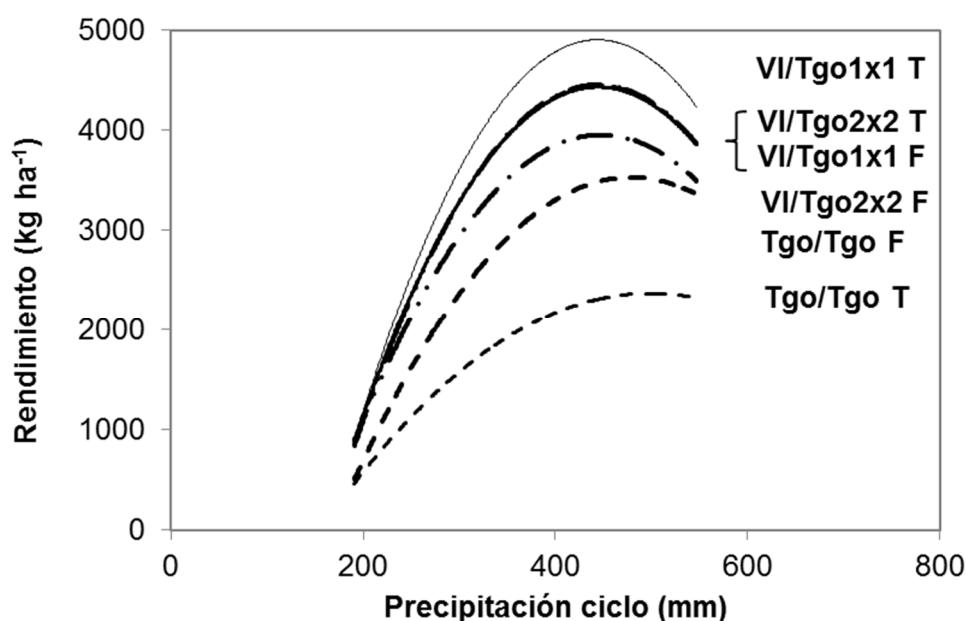


Figura 5 - Rendimientos de trigo en función de la precipitación acumulada durante el ciclo (agosto a noviembre), para el monocultivo (Tgo/Tgo), el primer trigo luego de un verdeo de invierno en la alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo1x1), y el primer trigo luego de dos verdeos de invierno (VI/Tgo2x2). T=testigo, F= fertilizado.

Ambos factores, secuencia de cultivos y fertilización, mostraron efectos positivos con ciclos favorables, y negativos en ciclos desfavorables. Aunque el trigo luego de un solo verdeo mostró rendimientos ligeramente superiores al realizado sobre dos verdeos, las diferencias no resultaron estadísticamente significativas. Con precipitaciones cercanas a 200 mm VI/Tgo superó a Tgo/Tgo, sin respuesta a la fertilización. A medida que la precipitación durante el ciclo mejoró la respuesta al fertilizante, el monocultivo redujo diferencias con las secuencias, especialmente con VI/Tgo (2x2) Fertilizado.

El segundo trigo después de dos verdeos de invierno se comparó con Tgo/Tgo en cuatro campañas (Tabla 2), en las que los rendimientos no mostraron una relación definida con la precipitación. La secuencia de cultivos mostró efectos leves en tres de ellas, de las cuales sólo en una superó significativamente al monocultivo. En otras dos el monocultivo fertilizado igualó sus rendimientos. La respuesta a la fertilización sólo resultó significativa en una de las cuatro campañas, en el tratamiento Tgo/Tgo. Fuera de esta comparación, en una campaña en la que coincidieron un primero y un segundo trigo luego de verdeos, las diferencias de rendimiento fueron de 400 kg ha⁻¹ a favor del primero (datos no presentados).

Tabla 2 - Rendimientos del monocultivo (Tgo/Tgo), y del segundo trigo luego de dos verdeos de invierno, en la alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo2x2). Referencias: T= testigo, F= fertilizado, Precipitación ciclo= precipitación acumulada en el período agosto-noviembre. Valores seguidos de la misma letra no difieren significativamente ($\alpha=0,10$).

Tratamiento	1986	1990	2003	2007	Media
Tgo/Tgo T	2292 b	1933 b	964 b	2141 ns	1833
Tgo/Tgo F	2741ab	2533 a	989 b	2363 ns	2157
VI/Tgo2x2 T	3133 a	2117 ab	2280 a	1977 ns	2377
VI/Tgo2x2 F	3050 a	2508 a	2406 a	2186 ns	2538
Precipitación ciclo (mm)	217	214	248	333	253

Sin una evidencia muy fuerte, los datos muestran que el segundo trigo de la secuencia VI/Tgo 2x2 produce rendimientos similares a Tgo/Tgo, y aún respuestas moderadas a la fertilización, indicando una “dilución” del efecto del antecesor leguminosa que sería máximo sólo para el cultivo sucesor inmediato.

La Tabla 3 muestra los resultados de una serie de nueve campañas en las que coincidieron los tratamientos Past/Tgo, primer trigo de VI/Tgo y Tgo/Tgo. Dado que varió la posición de cada trigo en sus respectivas secuencias, ésta se indica en la tabla. Al igual que en otras comparaciones, la variación de la precipitación acumulada durante el ciclo del trigo explicó entre el 14 y el 58% de la variación de los rendimientos.

Tabla 3 - Rendimientos comparativos de trigo según secuencia y nivel de fertilización para el monocultivo de trigo (Tgo/Tgo), alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo), y secuencias pastura-agricultura (Past/Tgo).

Trat	1982	1983	1985	1991	1992	2002	2003	2004	2006
Tgo/Tgo T	2091 ns	1058 b	2316 e	1303 c	1441 f	1100 c	963 b	945 f	669 ns
Tgo/Tgo F	1925 ns	1249 b	3358 bc	1973 b	1949 e	1387 c	988 b	1079 e	577 ns
VI/Tgo T	2158 ns	1824 a	4249 a	2772 a	3716 b	1968 b	2280 a	2028 d	556 ns
VI/Tgo F	2416 ns	2057 a	3874 ab	2961 a	3908 a	2087 b	2406 a	2319 c	378 ns
Orden	2°	2°	1°	1°	1°	1°	2°	1°	1°
Past/Tgo T	1858 ns	1299 b	2716 de	2807 a	2274 d	2568 a	3086 a	3031 b	161 ns
Past/Tgo F	2007 ns	1433 b	3133 cd	2817 a	3166 c	2737 a	2766 a	3692 a	125 ns
Orden	3°	4°	5°	1°	1°	1°	2°	3°	5°
Pp ciclo (mm)	214	89	428	189	271	337	248	114	166

Referencias: T= testigo, F= fertilizado, Pp ciclo= precipitación acumulada en el período agosto-noviembre. Orden = posición del trigo en relación con el último verdeo o pastura, respectivamente. Valores seguidos de la misma letra no difieren significativamente ($\alpha=0,05$).

Los rendimientos de Past/Tgo dependieron no sólo de las condiciones meteorológicas, sino también de su posición en la secuencia agrícola. Los dos primeros trigos luego de la pastura superaron a Tgo/Tgo en las cuatro campañas analizadas. En el tercer trigo, las diferencias fueron menos consistentes. A partir del cuarto año de roturada la pastura los rendimientos resultaron similares o menores que los del monocultivo, especialmente en relación con el subtratamiento fertilizado. Respecto de VI/Tgo, hasta el tercer año desde la pastura no se observaron diferencias consistentes en las seis campañas consideradas. A partir del cuarto año los rendimientos de VI/Tgo resultaron mayores.

Los rendimientos de nueve campañas de Potr/Tgo, VI/Tgo y Tgo/Tgo se muestran en la Figura 6. La variación de la precipitación explicó entre el 50 y el 70% de la variación de los rendimientos, observándose tres grupos de respuesta: VI/Tgo, sin diferencias entre Fertilizado y Testigo, mostró mayores rendimientos que Tgo/Tgo Fertilizado y Potr/Tgo, este último con escasa respuesta a la fertilización; Tgo/Tgo Testigo mostró los menores rendimientos; Potr/Tgo mostró mayores rendimientos que Tgo/Tgo en algunas campañas, aunque cuando este último se fertilizó, las diferencias se redujeron. Esta semejanza de comportamiento respecto a Tgo/Tgo indica que la comparación Past/Tgo vs. Potr/Tgo resultaría similar a la realizada con el monocultivo.

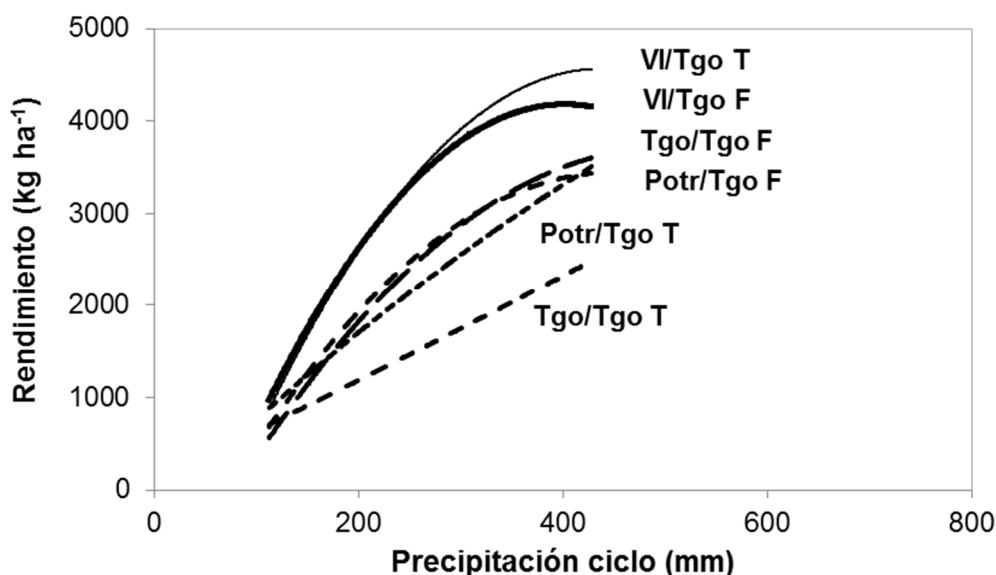


Figura 6 - Rendimientos de trigo en función de la precipitación acumulada durante el ciclo (agosto a noviembre), para el monocultivo (Tgo/Tgo), el primer trigo luego de un verdeo de invierno en la alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo), y la alternancia de potrero y trigo (Potr/Tgo). T=testigo, F= fertilizado.

Relación con las precipitaciones

Con distintos grados de ajuste y significación estadística, pero en forma constante a través de toda la experiencia, el efecto de la secuencia de cultivos y la fertilización dependió en gran medida de la precipitación. Otros estudios regionales encontraron relación entre la precipitación y el rendimiento del trigo (Loewy, 1987; Miranda & Junquera, 1994). El efecto del clima sobre los rendimientos de trigo del experimento fue estudiado por Zilio *et al.* (2014) utilizando, entre otras, una metodología conocida como “árbol de correlación y regresión”. Este modelo seleccionó a la precipitación durante el ciclo del trigo como primer variable de discriminación. El valor crítico obtenido, de 197 mm, separa la base de datos de rendimiento en dos grupos: bajos, con un valor medio de 1140 kg ha^{-1} , y altos con una media de 3880 kg ha^{-1} . En las comparaciones realizadas, el valor de 200 mm aparece a menudo como el umbral a partir del cual se manifiestan los efectos de la secuencia y la fertilización sobre los rendimientos. La probabilidad de ocurrencia de valores de precipitación mayores que 200 mm durante el ciclo del trigo en Bordenave es del 70% (Figura 7), por lo que cabría esperar respuestas a los tratamientos en tres de cada cuatro campañas.

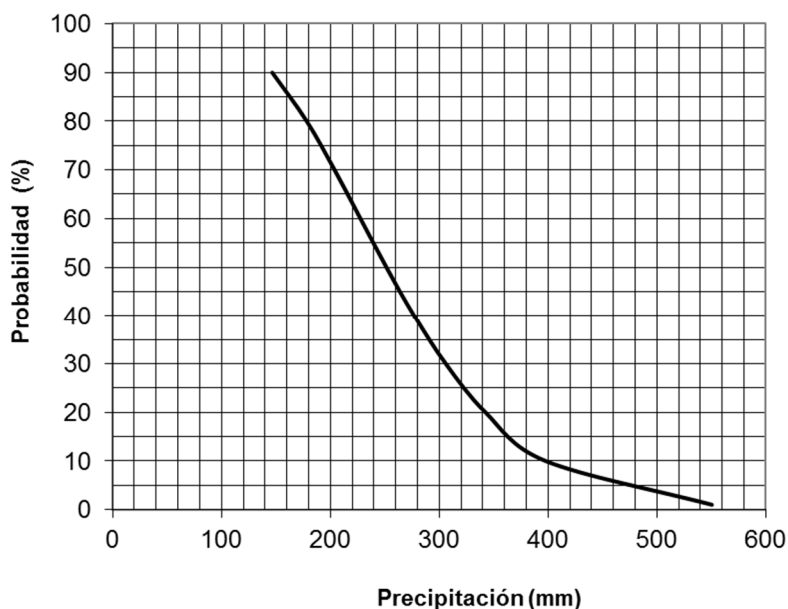


Figura 7 - Probabilidad de ocurrencia (distribución de probabilidad Gamma), de distintos valores de precipitación acumulada entre los meses de agosto y noviembre en Bordenave.

Varios factores explican esta característica. Es conocida la variabilidad de las precipitaciones en estas regiones, así como el hecho de que la disponibilidad de agua es la principal limitante de la productividad biológica en zonas semiáridas (Stafford Smith *et al.*, 2009). Si se consideran valores de eficiencia de uso del agua del trigo cercanos a 10 kg mm^{-1} (Venzani *et al.*, 2006; Krüger *et al.*, 2014), se requieren 200 mm de agua para producir 2000 kg ha^{-1} de grano. Parte de este requerimiento se satisface con el agua acumulada en el suelo, y parte de la precipitación se pierde por escurrimiento y/o evaporación.

La capacidad de retención de agua del suelo, representativa de gran parte de la región, no supera los 140 mm. Aún con barbechos de seis meses de duración en Tgo/Tgo, y con otoños lluviosos, es frecuente que no se complete (Murphy *et al.*, 2010; Krüger *et al.*, 2014). El agua almacenada alcanza entonces para la implantación y el desarrollo vegetativo del cultivo, pero se requiere la recarga del perfil en etapas posteriores. Si la lluvia se demorara, podría ocurrir que el desarrollo de biomasa, estimulado por fertilización o por el efecto de la secuencia, incrementara el estrés hídrico determinando pérdidas de rendimiento (Loewy, 1987). Así, las respuestas en rendimiento al incremento de fertilidad del suelo se dan sólo bajo condiciones meteorológicas favorables, y se anulan o invierten en años desfavorables.

Efectos sobre el suelo

A lo largo del experimento, distintos investigadores han estudiado los efectos de los tratamientos sobre propiedades del suelo. La metodología utilizada no ha sido la misma en todos los casos, lo que dificulta su interpretación. Una recopilación de estos estudios (Krüger *et al.*, 2013), proporciona un panorama general sobre el efecto de las secuencias de cultivos y la fertilización sobre el contenido de carbono, P y sobre algunas propiedades físicas del suelo.

Carbono orgánico

Los tratamientos comenzaron a manifestar efectos sobre el carbono orgánico total, a partir de diez años de iniciado el experimento, aunque fracciones más gruesas y lábiles como el carbono liviano detectaron algunas diferencias a partir de los cinco años. Los primeros efectos se manifestaron en las capas superficiales y progresaron gradualmente hacia capas más profundas. A los 10 años se observaron en los 5 cm superficiales, a los 15 años en 14 cm, llegando a los 27 años a 20 cm de profundidad.

En forma similar a lo ocurrido con los rendimientos del trigo, la secuencia de cultivos produjo efectos más definidos que la fertilización sobre el carbono orgánico total. En este caso los mayores efectos de la fertilización sobre el contenido de carbono del suelo se verificaron en la secuencia Tgo/Tgo.

Algunos resultados mostraron coherencia en todos los estudios realizados: Past/Tgo siempre mostró mayor contenido de carbono que Tgo/Tgo; Potr/Tgo se comportó en forma similar a Tgo/Tgo, aunque con mejor balance de carbono en función de su menor frecuencia de cultivo; las secuencias VI/Tgo mostraron un contenido de carbono orgánico intermedio entre el de Past/Tgo y Tgo/Tgo.

Dado que VI/Tgo representa una sucesión de cultivos anuales con alta frecuencia y presión de labranzas, sus efectos deberían resultar similares a los de Tgo/Tgo. Esto ocurrió en algunos de los estudios realizados. Sin embargo, la inclusión del verdeo con leguminosas introduce otras variables: pastoreo con aporte de heces, residuos con baja relación carbono:nitrógeno, y mayores rendimientos de trigo con mayor aporte relativo de residuos. Estas variables hacen que la dinámica del carbono en este tratamiento resulte compleja.

Resultados obtenidos por Minoldo (2010) muestran una alta sensibilidad de las fracciones más lábiles del carbono orgánico (resultado de la consociación verdeo con vicia), a los factores de manejo y ambientales en VI/Tgo. Estas fracciones son las que proporcionan la fertilidad adicional al primer

trigo después del verdeo y justifican los incrementos de rendimiento. Sin embargo, la acumulación de formas orgánicas lábiles bajo la fase con leguminosas puede estimular la mineralización y pérdida de carbono orgánico durante la fase con trigo. Esto ocurre cuando precipitaciones y temperatura, durante el relativamente largo barbecho previo al trigo, favorecen la mineralización. También sucede cuando condiciones desfavorables durante el cultivo de trigo reducen su eficiencia de uso del N, y éste es utilizado por los microorganismos del suelo para degradar el carbono orgánico (Galantini & Rosell, 2006; Galantini *et al.*, 2014).

De esta forma, el balance del carbono en las secuencias VI/Tgo resulta sensible a la combinación del clima, cantidad y calidad de residuos, fertilización y duración del barbecho (estos últimos regulados por el cultivo antecesor inmediato), y no tanto a la secuencia de cultivos en sí misma. Se justifica así la variación diferencial del contenido de carbono orgánico observada en esta secuencia, que en algunos estudios resultó similar a la de Tgo/Tgo y en otros se asimiló a Past/Tgo (Krüger *et al.*, 2013).

Con estos antecedentes, la Figura 8 muestra tendencias en la evolución del carbono orgánico en la capa 0-12 cm del suelo para el período 1980-2011. La variación fue más marcada en los tratamientos Testigo, y se atenuó con la fertilización. Se observan dos grupos: Past/Tgo y VI/Tgo (2x2), con valores ligeramente crecientes en el tiempo, y VI/Tgo (1x1) y Tgo/Tgo con valores estables a ligeramente decrecientes. En el primer grupo, la evolución es positiva, lo que garantiza la sustentabilidad del sistema desde el punto de vista de la fertilidad del suelo. En el segundo, aún considerando las características particulares de la variación del carbono orgánico en VI/Tgo, debería prestarse especial atención a la evolución de este parámetro en el tiempo.

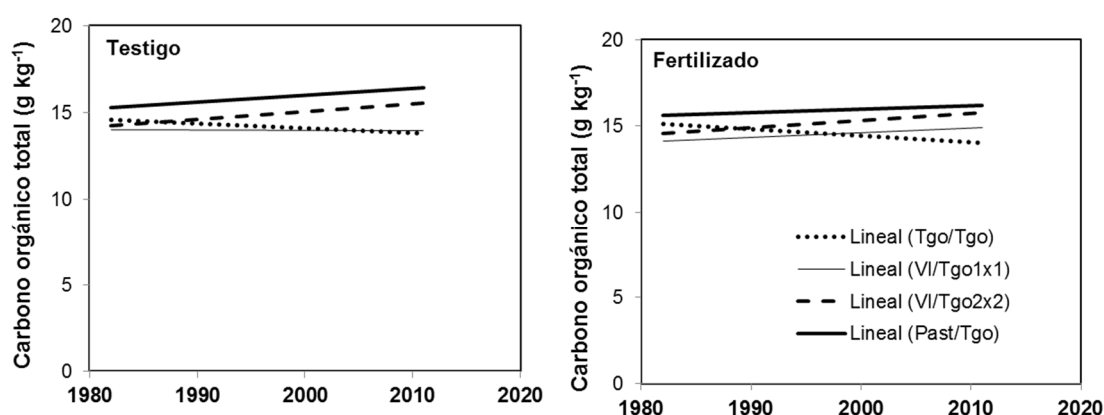


Figura 8 - Variación del contenido de carbono orgánico total (capa 0-12 cm), para el monocultivo (Tgo/Tgo), alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo1x1 y 2x2), secuencia pastura-agricultura (Past/Tgo), y alternancia de potrero y trigo (Potr/Tgo).

El balance negativo en el monocultivo se ha justificado por la mayor descomposición relativa de los residuos, promovida por barbechos largos todos los años, y mayor frecuencia e intensidad de labranzas. La tendencia decreciente con fertilización se explica porque en los numerosos años sin respuesta, el nitrógeno del fertilizante no utilizado por el cultivo promovería la descomposición del carbono orgánico del suelo.

Fósforo

Al igual que el carbono, las primeras variaciones del contenido de P del suelo también se detectaron en la capa 0-5 cm, a diez años del inicio del experimento (Miglierina AM, com. pers.). Los mayores contenidos se registraron en Tgo/Tgo y los menores en Past/Tgo, hecho que se relacionó con la mayor frecuencia de fertilización en el primero. Los contenidos de P extractable disminuyeron a medida que aumentaron los años continuos con leguminosas (Tgo/Tgo > VI/Tgo > Past/Tgo). La fertilización produjo un efecto positivo sobre el P extractable y enmascaró las diferencias entre secuencias.

En la misma capa, el efecto sobre el contenido de P orgánico fue inverso ya que Past/Tgo mostró mayor contenido que Tgo/Tgo y VI/Tgo. En VI/Tgo, con ciclos cortos de acumulación en relación con los de descomposición/consumo de fracciones orgánicas lábiles, el balance sería negativo. La respuesta positiva a la fertilización confirma esta hipótesis e indica la necesidad de reponer este nutriente para mantener la sustentabilidad de la secuencia. El contenido de P inorgánico no mostró efectos consistentes de la secuencia de cultivos o la fertilización. En capas más profundas (5-15 cm), no se encontraron diferencias significativas para ninguna de las formas de P estudiadas.

El estudio más completo sobre el contenido y formas de P en el suelo fue realizado por Minoldo (2010), a los 27 años del inicio del experimento. En este momento, todos los tratamientos se encontraban bajo el cultivo de trigo (primer año luego de pastura, y de dos verdeos de invierno). Los resultados de las determinaciones realizadas sobre la capa 0-20 cm se muestran en la Figura 9.

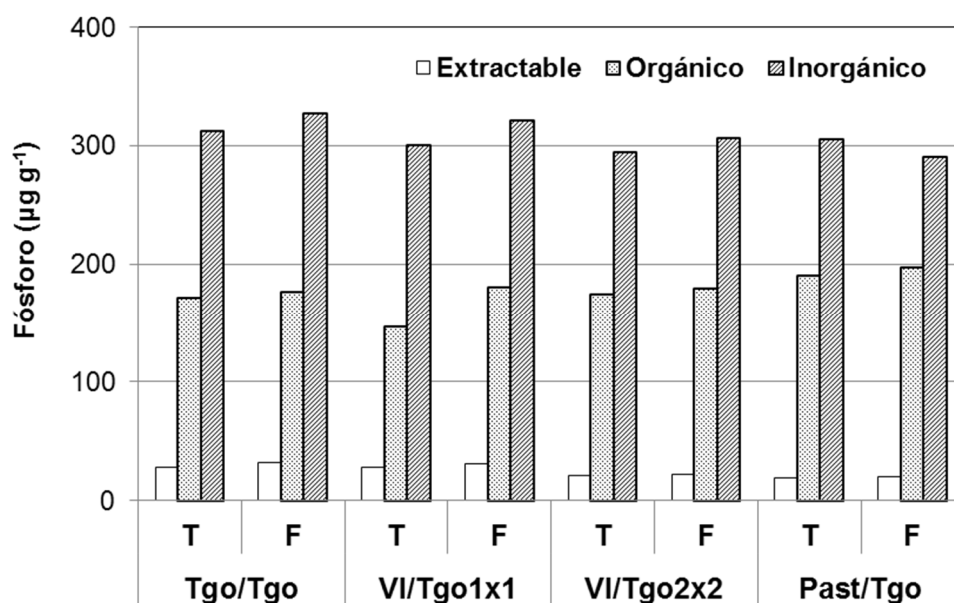


Figura 9 - Contenido de fósforo extractable, orgánico e inorgánico (capa 0-20 cm), luego de 27 años de tratamientos para el monocultivo (Tgo/Tgo), alternancia de verdeos anuales de invierno consociados con vicia (VI/Tgo1x1 y 2x2), y secuencia pastura-agricultura (Past/Tgo). T=testigo, F=fertilizado. Adaptado de Minoldo (2010)

El contenido de P extractable representó una pequeña fracción respecto de las restantes. Aunque las tendencias fueron similares a las detectadas anteriormente, no representaron efectos significativos de los tratamientos (secuencia o fertilización). Esta falta de diferencias entre tratamientos extremos habría sido por una mayor mineralización en Tgo/Tgo (mayor frecuencia de labranzas y longitud de barbechos), que liberó formas inorgánicas poco lábiles (Minoldo, 2010). En parte, la falta de efectos de la fertilización se justifica también por la suspensión de las aplicaciones de P a partir de 1994.

La mayor proporción de P correspondió a la forma inorgánica, que tampoco mostró efectos de los tratamientos, coincidiendo con estudios previos (Miglierina *et al.*, 1987). La estrecha relación entre los contenidos de P extractable e inorgánico hace que varíen en forma similar.

El contenido de P orgánico en Past/Tgo fue mayor que en Tgo/Tgo y VI/Tgo (2x2), los menores valores se registraron en VI/Tgo (1x1). La fertilización incrementó el P orgánico. Estos efectos se observaron principalmente en la capa superficial, y los mayores contenidos de Past/Tgo se explicaron por la acumulación de materia orgánica (y formas lábiles de P) durante el ciclo de la pastura. En VI/Tgo, ciclos de acumulación más cortos y la abundancia de N estimulan la descomposición de la materia orgánica durante la fase con trigo, determinando menores valores relativos.

Otros parámetros

A diez años del inicio del experimento Mon *et al.* (1986), detectaron mayor estabilidad estructural y contenido de gomas microbianas en Past/Tgo y Potr/Tgo respecto de Trigo/Tgo. Past/Tgo también presentó mayor porosidad total y capacidad de retención hídrica que los demás tratamientos.

A veinte años del inicio Krüger (com. pers.), observó el siguiente ordenamiento de tratamientos en cuanto a la estabilidad estructural de la capa superficial de suelo: Potr/Tgo = Past/Tgo > VI/Tgo > Tgo/Tgo. La fertilización disminuyó, en general, las diferencias entre tratamientos. En el mismo estudio se observaron menores valores de densidad aparente máxima y mayores contenidos hídricos críticos para Potr/Tgo y Past/Tgo respecto a Tgo/Tgo y VI/Tgo. Estos valores indican una mayor susceptibilidad a la compactación en los últimos.

De los distintos estudios realizados se desprende que los tratamientos con mayor remoción por labranzas: VI/Tgo y Tgo/Tgo, especialmente este último, mostraron un estado físico de menor calidad que la rotación con pastura o la alternancia Potr/Tgo. Esto coincide, en líneas generales, con la información aportada por los parámetros químicos.

Información generada en relación con los objetivos

En función de los objetivos planteados originalmente, los resultados obtenidos permiten aportar información aplicable a los sistemas productivos locales:

1)2 Relación clima-rendimientos

Por los motivos expuestos en la sección correspondiente, se resalta la importancia de considerar la dependencia de los sistemas agropecuarios locales respecto de la variación de factores climáticos (precipitación y temperatura). Estos afectan los rendimientos en general, pero también la respuesta a la aplicación de tecnologías tanto de insumos como de procesos. Se convierten así, en un factor importante en la composición del riesgo productivo.

2)2 Secuencia versus fertilización.

El efecto de la secuencia de cultivos mostró más peso sobre el rendimiento y el contenido de algunos nutrientes en el suelo que el de la fertilización. En este sentido monocultivo y fertilización son

prácticas necesariamente asociadas, mientras que el uso de leguminosas como antecesoras de trigo permite reducir sensiblemente el nivel de fertilización nitrogenada disminuyendo la dependencia de insumos externos, y el riesgo, económico y ambiental, de la agricultura.

3)2 Posibilidades de incremento de los rendimientos del trigo

A pesar de la utilización de barbechos largos bajo cubierta de residuos y fertilización, el monocultivo con labranza no mejoró los rendimientos medios del sistema tradicional (Potr/Tgo), y produjo menores rendimientos unitarios que los demás tratamientos. Sin embargo, el cultivo continuo incrementó la producción global del sistema (producción acumulada en un período determinado de años). La fertilización mejoró sensiblemente los rendimientos bajo condiciones favorables para el cultivo (incrementos de hasta el 45%), mientras que en campañas desfavorables la respuesta al fertilizante fue baja, inexistente y aún negativa. Este sistema requiere capacidad financiera para afrontar mayores costos en insumos y la posibilidad de pérdidas en campañas desfavorables. Tanto el incremento del nivel de fertilización como la reducción de labranzas (siembra directa), constituyen estrategias que mejoran los rendimientos y el balance de carbono, aunque incrementan la susceptibilidad a enfermedades. La utilización de fungicidas introduce entonces una nueva dependencia respecto de insumos externos al sistema.

En condiciones favorables, la secuencia VI/Tgo produjo los rendimientos más elevados, igualados solamente por los primeros trigos de Past/Tgo y, excepcionalmente, por Tgo/Tgo fertilizado. El incremento de la producción con esta secuencia se dio sin empleo de fertilización, aunque no debe descartarse esta técnica para reponer otros nutrientes como P. Sin una evidencia muy fuerte, los datos muestran que el segundo trigo de la secuencia VI/Tgo (2x2) tendría una cierta “dilución” del efecto del antecesor leguminosa que sería máximo sólo para el cultivo sucesor inmediato. La introducción del verdeo consociado con vicia implica, además, una fuente estratégica de alimentos en pie o reservas forrajeras de calidad para el sistema mixto.

Los efectos de la rotación Past/Tgo son conocidos. Sus beneficios no se limitan solamente al aporte de N por fijación biológica, sino que derivan de su combinación con otros factores como mejora en la estructura del suelo, reducción de plagas y enfermedades, reducción de sustancias fitotóxicas y producción de sustancias promotoras del crecimiento (Hesterman, 1988). La diversificación, implícita en el sistema mixto, también disminuye el riesgo productivo y económico en una región dependiente de la variabilidad climática.

4)2 Rendimientos y su probabilidad de ocurrencia

La disponibilidad de series largas de datos permite estimar probabilidades de lograr distintos niveles de rendimiento de trigo en función de la secuencia de cultivos, bajo condiciones similares a las estudiadas. La función de distribución empírica de los rendimientos (Balzarini, com. pers.), indica que:

- 2 La probabilidad de obtener rendimientos mayores que 1500 kg ha^{-1} es mayor con Past/Tgo y VI/Tgo (tres de cada cuatro años), que con Tgo/Tgo (uno de cada dos años).
- 2 La probabilidad de obtener rendimientos mayores a 3000 kg ha^{-1} es baja, pero mayor para Past/Tgo y VI/Tgo (uno de cada cuatro años), que para Tgo/Tgo (uno de cada diez años).

5)2 Efectos sobre el suelo

La combinación de factores climáticos, longitud y frecuencia de barbechos, e intensidad de labranzas, determina que el balance de carbono resulte negativo en el monocultivo, sin ser totalmente compensado por fertilización. Este es un detalle a tener en cuenta en el caso de sistemas con labranza convencional. La utilización de siembra directa, y mayores niveles de fertilización puede compensar este balance.

A pesar de los mayores rendimientos y la baja respuesta a nitrógeno, algo similar ocurre en VI/Tgo, especialmente en la secuencia 1x1, que también requiere fertilización fosfórica para resultar sustentable.

El sistema tradicional (Potr/Tgo) no afecta mayormente la calidad del suelo, basado sobre una baja frecuencia de cultivo. Por el mismo motivo, no representa la mejor opción productiva.

La rotación Past/Tgo mantiene, desde el punto de vista del carbono, P y algunos parámetros físicos, los mejores niveles de calidad del suelo y se perfila como el único sistema realmente sostenible en el tiempo si se utiliza labranza convencional.

Proyección futura

Desde el inicio de la experiencia se han producido importantes cambios en el manejo agropecuario de la región. El proceso de agriculturización afectó, aunque posiblemente con menor intensidad que en otras, a la región de extrapolación de estos resultados. La superficie bajo pasturas perennes ha

disminuido drásticamente en la última década. La siembra directa se ha difundido en parte de la zona, determinando el aumento de la superficie bajo monocultivo de trigo y cebada. El incremento de las precipitaciones estivales influyó sobre la mayor difusión de los verdeos de verano: sorgo y también maíz. Este último, sembrado en densidades relativamente bajas, está siendo progresivamente utilizado con fines de cosecha de grano.

En un ambiente caracterizado por el déficit hídrico en verano y la alta variabilidad climática, la implementación de secuencias exclusivamente agrícolas presenta dificultades. Los cultivos de soja y girasol tienen baja expectativa de rendimiento en este ambiente. Los de sorgo y maíz liberan el lote en fechas relativamente cercanas a la siembra del trigo, y con altos volúmenes de residuos. Estos antecesores afectan al sucesor inmediato por bajo contenido de agua en el suelo, inmovilización de N o fitotoxicidad. Por otra parte, en sistemas mixtos el pastoreo de verdeos de verano, o de residuos de cultivos de cosecha permite atemperar estos efectos. La inclusión de cultivos de verano en secuencias agrícolas o mixtas se considera importante en razón de su rentabilidad, su efecto sobre la cobertura y dinámica de malezas, y la diversificación productiva que implican.

Las características de la siembra directa, íntimamente asociada con la fertilización y un cierto nivel de uso de insumos, hacen posible especular acerca de un menor impacto relativo de ciertas secuencias como Tgo/Tgo y VI/Tgo sobre el carbono orgánico del suelo y sus fracciones. Esto podría mejorar la sustentabilidad de dichas secuencias. Si bien se conoce el efecto de las leguminosas en cuanto a la dinámica del N y del carbono bajo labranza, estos efectos no son suficientemente conocidos bajo siembra directa.

La continuidad a futuro del presente experimento, cumplidos sus objetivos iniciales, debería tener en cuenta estas cuestiones y rediseñar los tratamientos a fin de incluir las nuevas modalidades de manejo y sus hipótesis derivadas.

Bibliografía

- Galantini, JA & RA Rosell. 2006. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil Till. Res.* 87:72–79.
- Galantini, JA; M Duval; J Iglesias & HR Krüger. 2014. Continuous wheat in semiarid regions. Long-term effects on stock and quality of soil organic carbón. *Soil Science* 179 (6):284-292.

- Gómez, LA; V Nakama & CA Puricelli. 1981. Carta detallada de suelos de la Estación Experimental Agropecuaria Bordenave. Escala 1:10000. Informe interno. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias, INTA. Buenos Aires, Argentina. 144 pp.
- Hesterman, OB. 1988. Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems. In: Hargrove W (Ed). Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. ASA Special Publication N°51. Pp. 155-166. American Society of Agronomy. Madison, USA.
- Krüger, HR; JP Zilio & FD Frolla. 2013. Secuencias de cultivos, fertilización y COT en semiaridez. En: Actas Jorn. Nac. "Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas del suelo: efectos sobre los balances de C". Comité Química de Suelos, AACs. Bahía Blanca, Argentina (en CD).
- Krüger, HR; FD Frolla & JP Zilio. 2014. Trigo en zonas marginales. Precipitaciones, retención en el suelo y EUA. En: Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina (en CD).
- Krüger, HR; JP Zilio & FD Frolla. 2015. Avances en indicadores de sostenibilidad en suelos de la Región Semiárida Pampeana. En: Actas II Jorn. Nac. de Suelos de Ambientes Semiáridos. Santa Rosa, Argentina. En CD.
- Loewy, T. 1987. Rotación leguminosa-trigo y fertilidad nitrogenada del suelo. Ciencia del Suelo 5 (1) (57-63).
- Miglierina, AM; R Rosell & A Glave. 1987. Propiedades edáficas y rotaciones agrícolas. En: Resúmenes 1as Jornadas Nacionales de Zonas Áridas y Semiáridas (36). Santiago del Estero, Argentina.
- Minoldo, G. 2010. Impacto de largo plazo de diferentes secuencias de cultivo del sudeste bonaerense sobre algunas propiedades químicas del suelo y la productividad del trigo. Tesis *Magister* en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina.
- Miranda, R & A Junquera. 1994. Rendimiento de trigo y precipitaciones. I: Campo Experimental. En: Actas III Congreso Nacional de Trigo (89-90). UNS-ALANBA. Bahía Blanca, Argentina.
- Mon, R; O Santanatoglia & M Sardi. 1986. Variaciones de las propiedades físicas de un suelo de Bordenave. Ciencia del Suelo 2:161-164.
- Murphy, G; L Spescha & A Veliz. 2010. Condiciones hídricas para el trigo en el sur de Buenos Aires. En: Actas XIII Reunión Argentina y VI Latinoamericana de Agrometeorología (18-19). Bahía Blanca, Argentina.
- SAG y P – INTA. Proyecto PNUD ARG/85/019. 1989. Mapa de Suelos de la prov. de Bs. As. Escala 1:500000. Buenos Aires, Argentina. 525 pp.
- Stafford Smith, DM; N Abel; B Walker & F Stuart Chapin III. 2009. Drylands: Coping with uncertainty, thresholds, and changes in state. In: FS Stuart Chapin III; GP Kofinas & C Folke (Eds.). Principles of Ecosystem Stewardship. Pp. 171-195. Springer Science+Business Media.
- Venanzi S; E De Sa Pereira; E Fernández & HR Krüger. 2006. Uso de agua por dos secuencias de cultivos en el sur de la región semiárida pampeana. En: Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Argentina (en CD).
- Zilio JP; FD Frolla & HR Krüger. 2014. Variabilidad climática, fertilidad edáfica y rendimientos de trigo en la zona semiárida. En: Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina (en CD).

Efecto de la labranza y la ganadería sobre propiedades edáficas y eficiencia en el uso del agua en un Haplustol de la Región Semiárida Pampeana

Alberto Quiroga^{1,2}, Romina Fernández¹, Ileana Frasier¹, Elke Noellemeyer² & Oscar Ormeño³

¹Estación Experimental "Guillermo Covas"; INTA Anguil, La Pampa; ²Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa; ³Asesor privado.

Descripción regional

El panel de expertos sobre cambio climático (IPCC 2007) vaticina para los años venideros disminuciones de las precipitaciones, lo cual puede ser particularmente preocupante para regiones agroecológicas marginales donde el agua constituye la principal limitante de la producción. El análisis de las precipitaciones en la región semiárida y subhúmeda pampeana muestra una gran variabilidad (Fernández et al., 2008), comprobándose que en la mayoría de los años las mismas no cubren los requerimientos de uso consuntivo de los cultivos y normalmente limitan el rendimiento (Pala, 2007). Por consiguiente, la capacidad de los suelos y eficiencia de almacenaje de agua durante el período de barbecho resultan principales determinantes de la producción de los cultivos (Austin, 1998; Baumhardt y Jones, 2002; Aboudrare et al., 2006). En tal sentido, Rockstrom et al. (2010) enfatizan acerca de la necesidad de manejar el agua de las precipitaciones en agriculturas de secano. Para tal fin sugieren capturar mayor cantidad de agua a través de una mayor infiltración y utilizar el agua disponible con mayor eficiencia, teniendo en cuenta que existe estrecha relación entre la productividad del suelo y el recurso agua (Bossio et al., 2010). En el contexto de disminuir los procesos de degradación de suelos y de mejorar el uso del agua disponible para la producción agrícola, las zonas semiáridas y subhúmedas son las más susceptibles, y más del 50 % de las precipitaciones se pueden perder por evaporación (Rockstrom, 2003).

La siembra directa (SD) podría contribuir significativamente en la sostenibilidad de los sistemas de producción, manteniendo y/o recuperando parámetros de calidad de suelo (Beare et al., 1994; Quiroga et al., 2009) e incrementando la disponibilidad y eficiencia de uso del agua (Schuller et al., 2007; Noellemeyer et al., 2013). Al respecto, son numerosos los estudios que muestran influencia significativa de la SD sobre la dinámica del agua en relación con la siembra convencional (SC), tanto en la etapa de barbecho como durante el ciclo de los cultivos (Unger, 1984; Baumhardt y Jones, 2002; Olaoye, 2002). Los residuos sobre la superficie del suelo reducen la evaporación, principal

factor de pérdida de agua, aunque este beneficio disminuye cuando las precipitaciones aumentan (Aboudrare et al., 2006) y/o cuando la capacidad de retención de agua del suelo es baja (Fernández et al., 2008). Posiblemente asociado a ambos factores, precipitaciones y capacidad de retención de agua, los estudios que han tratado de cuantificar los efectos de las coberturas de residuos sobre el almacenaje de agua muestran resultados variables (Monzon et al., 2006), comprobándose mayor influencia en años secos (Power et al., 1986). En ambientes semiáridos, Fernández et al. (2009) comprobaron que el contenido de agua al momento de la siembra del cultivo de girasol se relacionó estrechamente con el nivel de residuos. Considerando que la mayoría de los procesos, mecanismos y sistemas se expresan en el mediano y largo plazo, los ensayos de larga duración resultan imprescindibles para estudiar los efectos acumulados del manejo sobre los recursos suelo y agua. En base a lo expuesto se planteó como objetivo de trabajo, evaluar en un ensayo de larga duración los efectos acumulados de dos sistemas de labranza, con y sin uso de residuos por la ganadería, sobre propiedades edáficas y la eficiencia de uso del agua.

Características del experimento

El módulo de larga duración iniciado en 1993 fue establecido sobre un Haplustol éntico franco-arenoso, característico de las Planicies Medanosas del Este de La Pampa, que abarcan aproximadamente 920.000 ha y se localiza en el extremo noreste de la provincia (Figura 1). Los suelos presentan secuencia de horizontes A-A/C-C y Ck en el centro y sur de esta región, mientras que en el noreste también pueden reconocerse Hapludoles con presencia de horizonte B cámbico.

Los sistemas de producción son agrícola ganaderos, con cultivos anuales de cosecha (trigo, girasol, soja), forrajeros (verdeos de invierno y verano) y pasturas perennes (alfalfa, festuca, pasto ovillo).

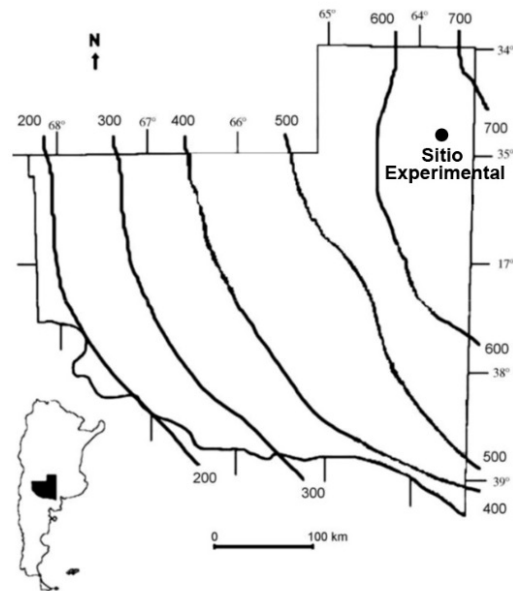


Figura 1 - Mapa donde se localiza el sitio en estudio.

En los últimos 20 años se ha incrementado la proporción de soja en la rotación disminuyendo significativamente la superficie con pasturas perennes y con verdeos de invierno. El sistema en siembra directa ha tenido un crecimiento significativo, resultando actualmente en menor proporción la superficie manejada bajo siembra convencional, que en algunos casos se utiliza principalmente para el control de malezas.

En el módulo de larga duración se han utilizado los cultivos predominantes de los sistemas de producción del área de estudio, bajo dos sistemas de labranzas (siembra directa y siembra convencional) combinando con uso y no uso de los residuos de cultivo por la ganadería (Tabla 1). En la secuencia de cultivos participaron principalmente cereales y oleaginosas destinados a cosecha (trigo, maíz, girasol, soja) y en menor proporción cultivos destinados a la producción de forraje y/o incluidos como cultivos de cobertura con aproximadamente 75% y 25% de ocupación respectivamente.

Tabla 1. Tratamientos de labranzas y combinación con pastoreo/sin pastoreo de los residuos de cosecha.

	Sin Pastoreo	Con pastoreo
Siembra directa	SD SP	SD CP
Siembra convencional	SC SP	SC CP

Se realizaron determinaciones de propiedades físicas (contenido de agua, distribución de agregados y estabilidad estructural en húmedo, densidad aparente máxima, compactación relativa, infiltración, conductividad hidráulica, punto de marchitez permanente), químicas (contenidos de nitrógeno total, fósforo disponible, pH) y biológicas (materia orgánica total y fracciones, respiración, biomasa microbiana). A la siembra de cada cultivo se evaluó el porcentaje de cobertura.

El rendimiento de los cultivos de grano (trigo, maíz, girasol y soja) se determinó mediante cosecha manual a partir de tres submuestras por unidad experimental.

A la siembra y cosecha de los cultivos se evaluó el contenido de agua del suelo a intervalos de 20 cm hasta los 140 cm (método gravimétrico) para determinar los usos consuntivos de los cultivos. Las precipitaciones fueron medidas a partir de una estación automática meteorológica localizada en el sitio de estudio.

La eficiencia de barbecho (EB) se calculó mediante la siguiente expresión (Mathews y Army, 1960).

$$EB: \frac{AU \text{ al finalizar el barbecho} - AU \text{ al comenzar el barbecho}}{\text{Precipitaciones durante el barbecho}} \times 100$$

Donde,

AU: agua útil

Los tratamientos se dispusieron en fajas apareadas con tres repeticiones. Los resultados se analizaron estadísticamente mediante ANOVA, y las diferencias entre medias a través del test de Tukey ($\alpha=0,10$).

Resultados

Las precipitaciones anuales del periodo de estudio (836 mm entre 1993-2015) fueron mayores que su promedio histórico (712 mm entre 1921-2015). Este aumento de las precipitaciones durante la etapa en estudio estaría indicando la presencia de un período más húmedo en los últimos 22 años. La Figura 2a muestra que tanto para los cultivos de verano (CV), como para los de invierno (CI), las precipitaciones ocurridas durante la etapa de estudio fueron mayores a su promedio histórico, superando al mismo en 115 y 49 mm respectivamente. Las precipitaciones durante el barbecho estival (BE) fueron 63 mm superiores que el promedio histórico (Figura 2b) mientras que para el

barbecho invernal (BI) las históricas superaron en 17 mm a las precipitaciones ocurridas entre 1993-2015.

El aumento de las precipitaciones sobre todo en los meses de verano conllevó a una mayor proporción de cultivos de verano en las rotaciones.

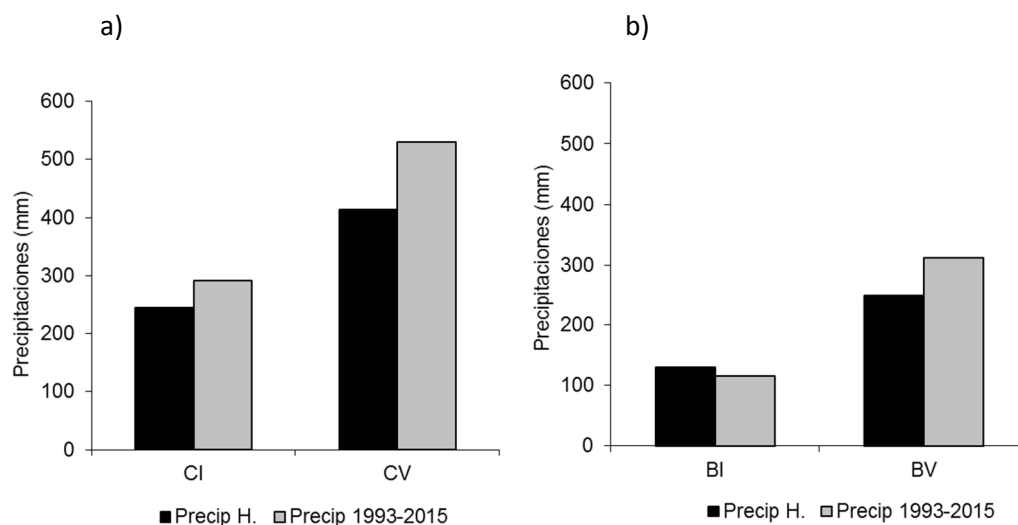


Figura 2 - Precipitaciones promedio históricas (Precip H. 1921-2015) y precipitaciones durante 1993-2015 en a) cultivos de verano (CV) y cultivos de invierno (CI) y b) barbecho de invierno (BI) y barbecho de verano (BV).

Teniendo en cuenta las precipitaciones históricas, y considerando los usos consuntivos promedios de los cultivos de la rotación, se comprobó que la probabilidad de que las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos de verano cubran los requerimientos de los mismos fue del 8 % (Figura 3a), mientras que para cultivos de invierno como el trigo resultó del 18 % (Figura 3b). Esto indica que a pesar del incremento de las precipitaciones y sobre todo las de verano, estas resultan insuficientes para alcanzar buenos rendimientos. Comparando los CI con los CV se desprende una mayor factibilidad en los CI a pesar de mayores precipitaciones durante los meses de verano.

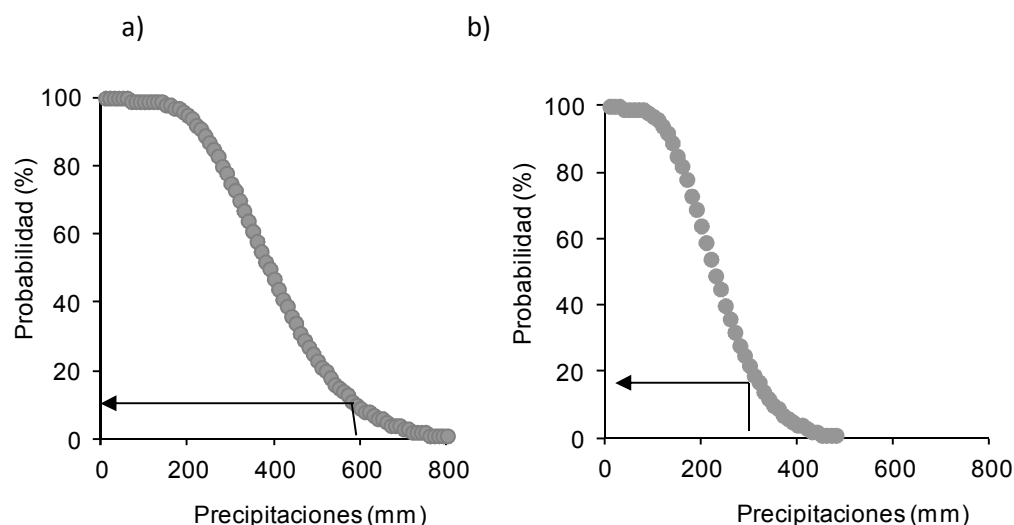


Figura 3 - Probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones históricas (1921-2015) en a) cultivos de verano (comprendido entre octubre-febrero) y b) cultivos de invierno (julio-noviembre).

Siguiendo con el análisis de las precipitaciones, desde el inicio del módulo (septiembre de 1993) hasta diciembre de 2015, se comprobó que el 71 % de las mismas ocurrieron durante el ciclo de los cultivos, mientras que el 29 % restante tuvo lugar durante los barbechos. Considerando la baja probabilidad de que las precipitaciones cubran los requerimientos de los cultivos, la eficiencia de almacenaje de agua durante el barbecho se torna una práctica importante en ambientes semiáridos. A pesar de que una gran parte de las precipitaciones ocurren durante el barbecho, distintos autores señalan que normalmente esta práctica resulta muy ineficiente (Fernández et al., 2008; Orphanos y Metochis, 1994).

Estudios desarrollados en la región semiárida pampeana comprobaron que, la EB varió ampliamente entre años, entre sistema de labranza y entre los distintos periodos de barbecho (invernal, BI; estival, BE). Desde que se inició la experiencia, el BI resultó más eficiente que el BE, tanto en SC (24, 21 %) como en SD (46, 27 %) respectivamente. Las condiciones ambientales indicarían que los CI serían más favorecidos que los de verano, no solamente por tener una mayor eficiencia de barbecho sino también una mayor probabilidad de que las precipitaciones cubran los requerimientos de los cultivos. Aunque el sistema de SD, a partir de una mayor eficiencia de almacenaje del agua permitiría mejorar las condiciones a la siembra de los CV.

Considerando la misma secuencia de cultivos en los dos sistemas de labranza se comprobó que la EB promedio (23 años) fue superior en SD (32 %) que en SC (21 %). Estos resultados concuerdan con

datos obtenidos en el mismo experimento durante los primeros 14 años (SD 32 % y SC 18%) (Fernández y Quiroga, 2008). Similares resultados fueron obtenidos por Tanaka y Aase (1987) quienes también en ensayos de larga duración comprobaron que la EB para SD (40-55 %) fue superior que en SC (20-24 %). Los valores reportados por Unger (1984) resultan coincidentes (44% en SD y 34 % en SC), no así los obtenidos por Aboudrare et al. (2006) en suelos arcillosos de Marruecos, con mayores eficiencias en SC que en SD (14-20 % y 11-13 % respectivamente).

En la Figura 4 se observa que a la siembra de los cultivos ya sean de invierno, de verano o pasturas, el sistema de SD presentó mayores contenidos de agua que SC. Las principales diferencias se registraron en los primeros 40 cm del perfil, las cuales resultaron altamente significativas entre sistema de labranza ($p \leq 0,0001$).

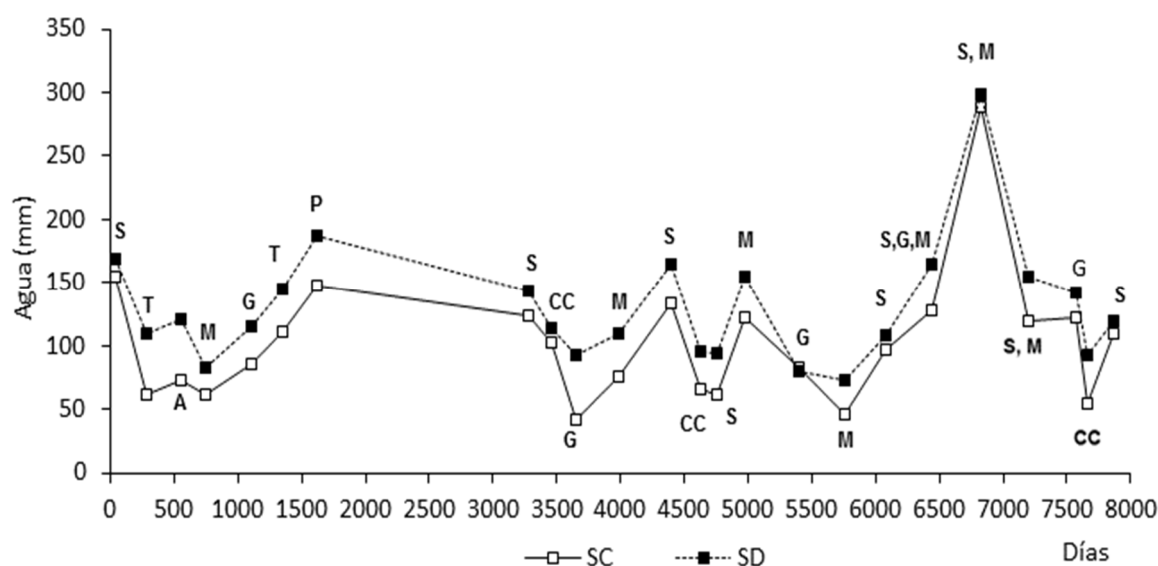


Figura 4 - Contenido de agua útil (mm) en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC) a la siembra de los cultivos de girasol (G), trigo (T), avena (A), maíz (M), cultivo de cobertura (CC), pastura (P) y soja (S).

Estos resultados concuerdan con Olaoye (2002) quien comprobó que la mayor diferencia a favor de SD tenía lugar en los primeros 50 cm del perfil. Estas diferencias en la eficiencia de los barbechos y en la disponibilidad de agua de los estratos superiores del perfil se relacionaron con los niveles de cobertura del suelo. Cobertura que resultó influenciada por el cultivo antecesor, sistema de labranza y uso de residuos por la ganadería (Figura 5).

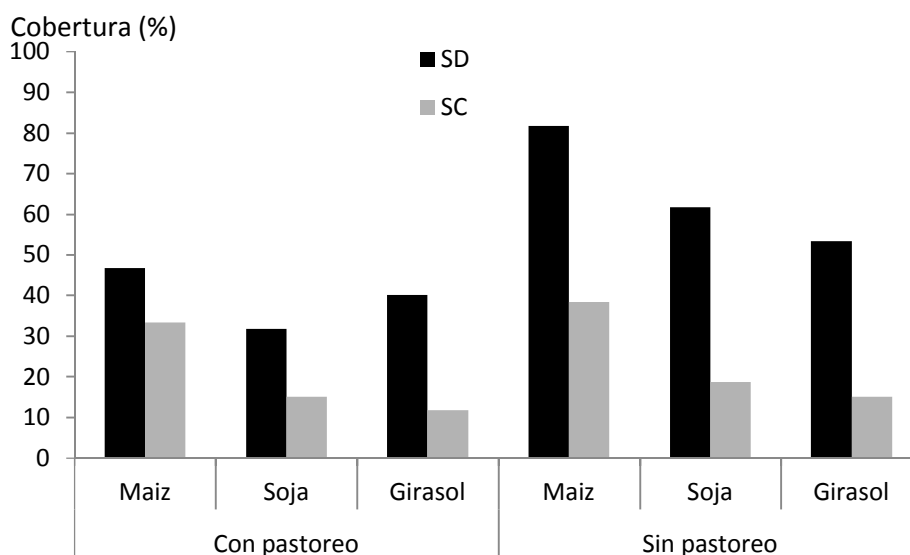


Figura 5 - Cobertura (%) en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC) con y sin pastoreo para los cultivos de maíz, soja y girasol.

Niveles de cobertura superiores al 60 % favorecieron el almacenaje de agua durante los barbechos y el rendimiento de los cultivos. Evaluaciones realizadas durante 23 años muestran que bajo SD se alcanzaron valores de cobertura (>60%) que afectaron positivamente el almacenaje de agua y en ningún momento se registraron valores críticos para la erosión eólica (<30%) (Figura 6). Por su parte, en SC no se superaron ambos umbrales en la mayor parte de la secuencia de cultivos, lo que explicaría la menor eficiencia en el almacenaje y conservación del agua. De esta manera, el agua útil a la siembra (AUS) varió entre 42-298 mm con un promedio de 116 mm. SD presentó en promedio 28 mm más de AUS que SC, con un rango de 0 a 51 mm. A la siembra de los CV SD almacenó 24 mm más de agua útil que SC (Figura 7). En tanto para los CI, la SD almacenó 40 mm más de agua que SC. La mayor diferencia no se encontró tal como se esperaba a favor de los CV sino a la siembra de los CI.

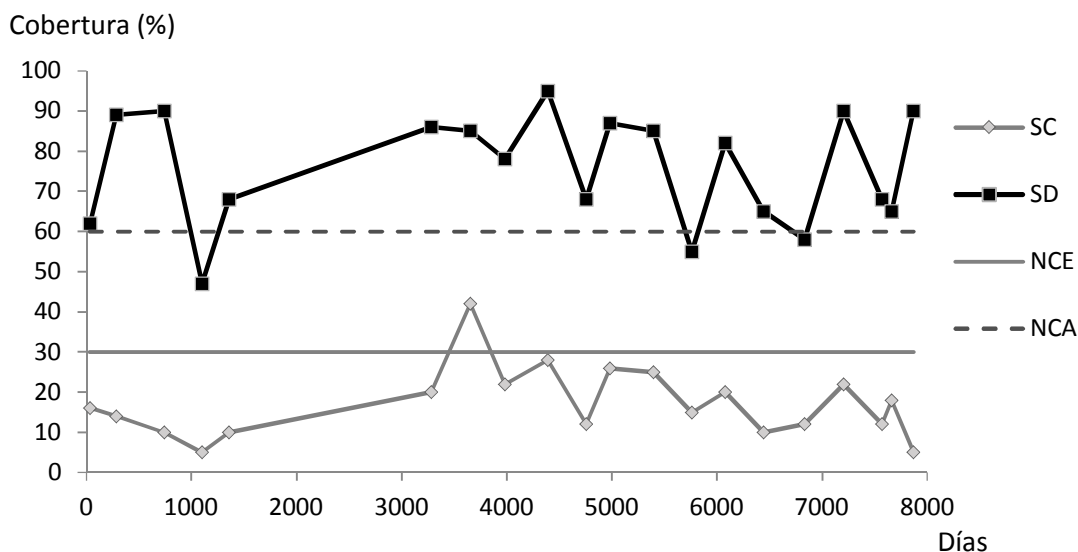


Figura 6 - Cobertura (%) en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC), al momento de la siembra de los cultivos de la rotación. Nivel crítico erosión eólica (NCE), nivel crítico almacenaje de agua (NCA). El período comprendido entre 1616 y 3008 días corresponde a pastura perenne de alfalfa. Adaptado de Quiroga et al. (2015).

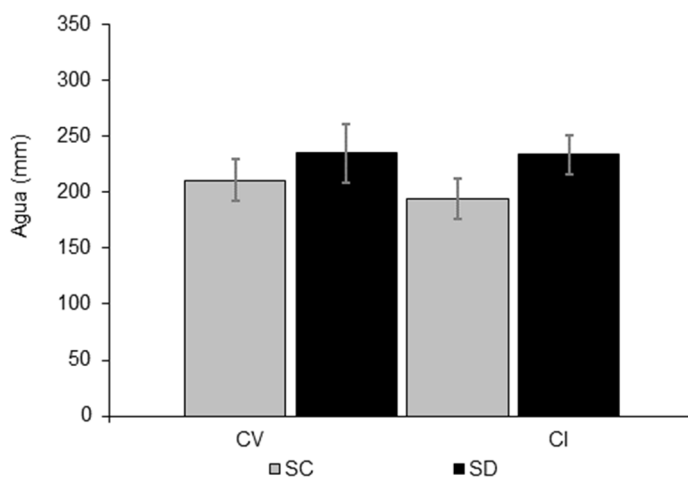


Figura 7 - Contenido de agua útil a la siembra (AUS) en el período comprendido entre 1993-2015 de los cultivos de verano (CV) y de invierno (CI), en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC).

En SD se registró en promedio mayor rendimiento de los cultivos, tanto en CV (+589 kg/ha) como en CI (+571 kg/ha). Estas diferencias estarían dadas por una mayor disponibilidad y eficiencia de uso del agua en CV y por una mayor disponibilidad de agua en CI, considerando que en estos últimos la eficiencia de uso fue similar (Tabla 2).

Tabla 2 - Rendimiento, uso consuntivo (UC) y eficiencia en el uso del agua (EUA) en siembra directa (SD) y siembra convencional (SC) para cultivos de verano (CV) y cultivo de invierno (CI) de grano.

	Rendimiento (kg/ha)		UC (mm)		EUA (kg/mm)	
	SC	SD	SC	SD	SC	SD
CV	4117	4706	567	581	7,4	8,4
CI	3602	4173	426	465	20,4	20,8

Como es propio de regiones semiáridas-subhúmedas la Figura 8 muestra el amplio rango de variación en el rendimiento de los cultivos y la relación con la oferta hídrica total, la cual también resultó variable en un amplio rango. La misma es representada por el agua útil a la siembra y las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos (As+pp). Si bien los resultados deben considerarse preliminares, los mismos muestran que ante una determinada oferta hídrica los rendimientos variaron ampliamente dependiendo del cultivo. Por ejemplo, con 550 mm el girasol rindió 1780, la soja 1880, el trigo 3600 y el maíz 5600 kg/ha. En este último cultivo a partir de la campaña 2009/10 se modificó la fecha de siembra de octubre (Mt) a diciembre (Mp) con la finalidad de desplazar el periodo crítico de enero a fines de febrero. De esta manera en la Figura 8 se muestran las relaciones del rendimiento con la disponibilidad de agua diferenciando al maíz por fecha de siembra. Los resultados muestran, al menos para el periodo estudiado, que esta decisión de desplazar el periodo crítico del cultivo fue satisfactoria, comprobándose rendimientos más estables y una menor influencia de la disponibilidad de agua sobre el rendimiento del cultivo.

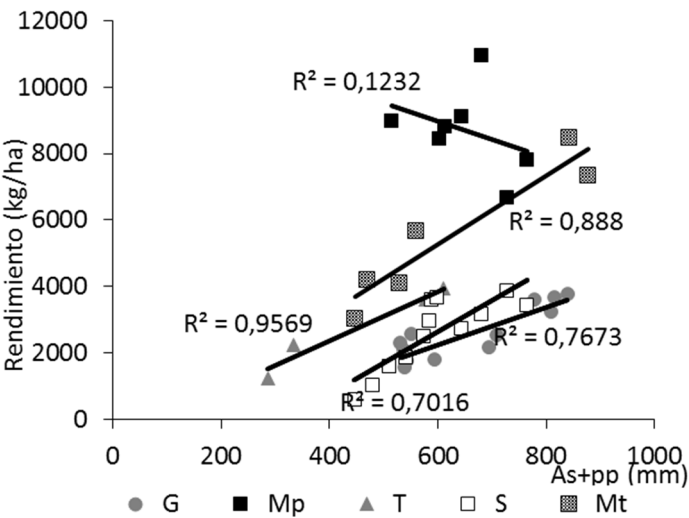


Figura 8 - Rendimiento en función del agua a la siembra más las precipitaciones (As+pp) para girasol (G), maíz temprano (Mt), maíz postergado (Mp), trigo (T) y soja (S).

En la Tabla 3 se han considerado en forma individual los distintos cultivos, comprobándose que en SD los rendimientos fueron mayores que en SC. Considerando los rendimientos promedios de 23 cultivos de la rotación, la producción en SD fue 13 % superior con respecto a SC (12,5 % en CV y 13,6 % en CI) resultando significativa en el 57 % de los cultivos ($p: 0,10$).

Tabla 3 - Cultivos y años en la rotación. Agua a la siembra, rendimiento, eficiencia en el uso del agua (EUA) y cobertura en siembra convencional (SC) y siembra directa (SD).

Cultivos (n)	Agua a la siembra (mm)		Rendimiento (kg/ha)		EUA (kg/ha.mm)	
	SC	SD	SC	SD	SC	SD
Girasol (6)	102	127	2451	2741	4,1	4,5
Maíz (7)	120	148	6697	7804	12,3	14,4
Soja (6)	136	164	2774	3058	5,0	5,4
Trigo (2)	86	128	2430	3078	5,7	6,6
CC (2)	60,2	94	4774	5269	35,1	35,0

n: número de cultivos que participaron en la secuencia

Los efectos acumulados del manejo también se comprobaron en distintas propiedades edáficas que fueron evaluadas. Se confirma que el tratamiento “más conservacionista”, SD sin uso de residuos por la ganadería (SDSP), presentó los mayores contenidos de MO en el estrato superficial de 0-10 cm. Similar comportamiento se comprobó en los contenidos de Nt y de P, donde SD presentó valores superiores que SC. La fracción MO joven (100-2000 μm) fue la más influenciada (Tabla 4). Campbell et al. (1998) señalan que para la región semiárida de Canadá, los suelos que pasan de SC a SD pueden secuestrar entre 5 y 6 Tn ha^{-1} de carbono por incremento en los contenidos de MO y residuos superficiales.

Tabla 4 - Materia orgánica total (MO) y joven (MOJ), fósforo disponible (P), nitrógeno total (Nt) en siembra directa sin pastoreo (SDSP), con pastoreo (SDCP), siembra convencional sin pastoreo (SCSP), con pastoreo (SCCP).

	MO (%)		MO J (%)		P (ppm)		Nt (%)	
	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Inicio	2,1	1,7			37	25		
SDSP	2,61 a	1,61	0,66 a	0,24	40,8 b	27,8 b	0,13 a	0,09
SDCP	1,79 b	1,41	0,46 ab	0,21	45,7 a	31,1 a	0,12 a	0,07
SCSP	1,92 b	1,68	0,39 b	0,24	25,2 d	17,4 d	0,10 b	0,08
SCCP	1,64 b	1,50	0,29 b	0,17	30,8 c	21,1 c	0,10 b	0,08

Diferentes letras señalan diferencias significativas entre tratamientos.

Quiroga et al. (2016) y Fernández et al. (2016), señalan que estos cambios positivos en el coloide orgánico, sea por aumento y/o redistribución, tendrían una influencia positiva sobre la condición física de los suelos. El mayor contenido de MO en estratos superficiales explicaría la menor densidad aparente máxima, proporción de agregados menores de 2 mm y los mayores valores de infiltración, conductividad hidráulica y estabilidad estructural. En estudios realizados sobre Molisoles se comprobó que un incremento de aproximadamente 5 g/kg en el contenido de MO produce una disminución de 0,06 g/cm³ en la densidad aparente máxima (Quiroga et al., 2016). La Tabla 5 y la Figura 9 muestran los efectos acumulados del manejo sobre las propiedades edáficas mencionadas.

Tabla 5 - Distribución de agregados, índice de inestabilidad estructural (IIE), densidad aparente máxima (DAM), compactación relativa (CR), infiltración acumulada (I Ac), en siembra directa sin pastoreo (SDSP), con pastoreo (SDCP), siembra convencional sin pastoreo (SCSP), con pastoreo (SCCP).

	Distribución diámetro (mm) de agregados (%)			IIE	DAM (gr cm ⁻³)	CR	I Ac (mm)
	>8	2-8	< 2				
SDSP	35,2 a	34,5 a	30,2 b	1,16 a	1,39 b	80 b	237 a
SDCP	33,0 a	31,2 ab	35,8 b	1,36 a	1,35 b	82 ab	217 a
SCSP	22,8 b	29,2 b	48,0 a	1,77 b	1,45 a	80 b	180 ab
SCCP	22,4 b	28,4 b	49,2 a	2,41 c	1,45 a	84 a	99 b

Diferentes letras señalan diferencias significativas entre tratamientos.

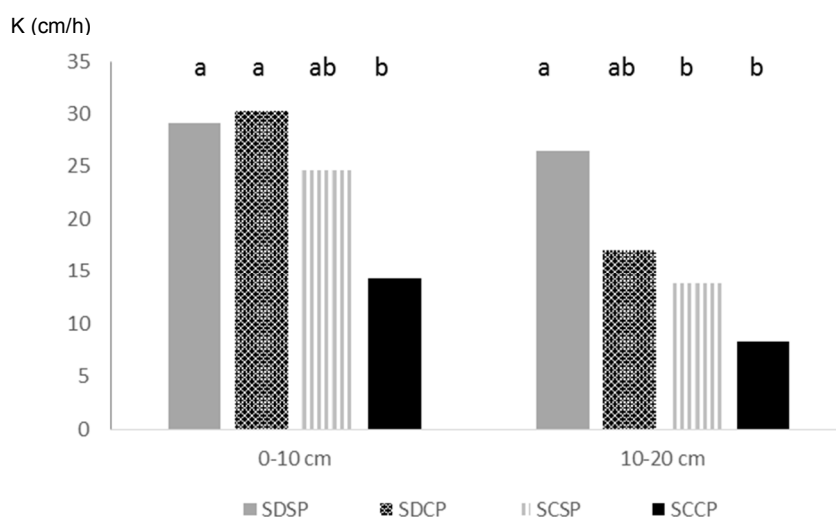


Figura 9 - Conductividad hidráulica a profundidades de 0-10 y 10-20 cm del suelo, en los tratamientos de siembra directa sin pastoreo (SDSP) y con pastoreo (SDCP) y siembra convencional sin pastoreo (SCSP) y con pastoreo (SCCP). Diferentes letras señalan diferencias significativas entre tratamientos.

Las diferencias de contenidos de MO entre los tratamientos también se reflejaron en la biomasa microbiana (Figura 10), que siguieron las mismas tendencias que ésta y fueron significativamente mayores en SDSP, comprobándose un mayor efecto del sistema de labranza que del pastoreo.

La biomasa microbiana ha sido considerada uno de los indicadores más sensibles de la calidad biológica del suelo (Gartzia-Bengoetxea et al., 2009). Varios estudios ya reportaron el efecto benéfico de labranzas conservacionistas sobre las propiedades biológicas del suelo (López-Garrido et al., 2012; Melero et al., 2009), el cual estaría asociado a la acumulación y distribución de MO en los diferentes sistemas de manejo (Gude et al., 2012; Kramer et al., 2012; Lagomarsino et al., 2011).

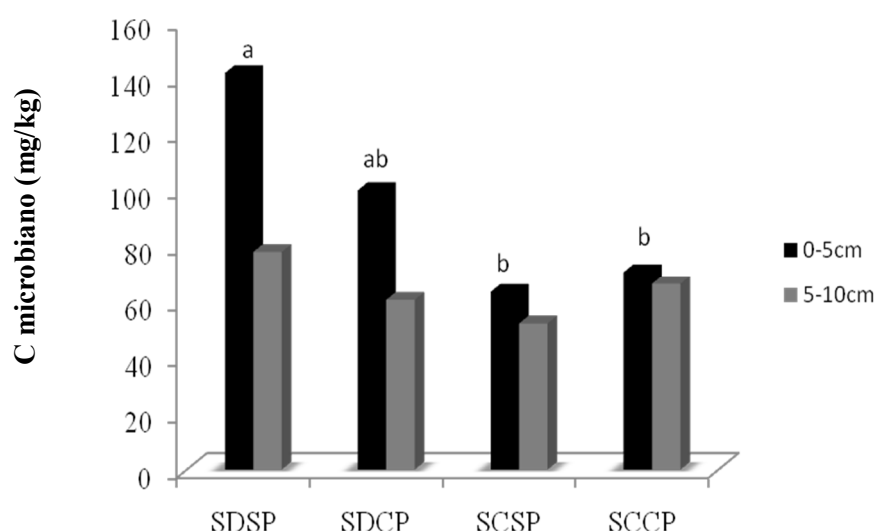


Figura 10 - Contenidos de carbono de la biomasa microbiana en los tratamientos de siembra directa sin pastoreo (SDSP) y con pastoreo (SDCP) y siembra convencional sin pastoreo (SCSP) y con pastoreo (SCCP) a profundidades de 0-5 y 5-10 cm del suelo. Diferentes letras señalan diferencias significativas entre tratamientos.

En SD se registró mayor respiración que en SC, principalmente en 0-6 cm de profundidad, y en fracciones de agregados de 1-4 mm (Figura 11). La actividad respiratoria microbiana de 0-18 cm fue de 604 y 369 mg C/kg suelo para SD y SC respectivamente, esos valores corresponden a 7,6 y 4,6 mg C/kg.día. Los mismos se relacionaron positivamente con el contenido de carbono, en mayor grado en SD ($R^2=0,54$) que en SC ($R^2 = 0,36$).

Estos resultados se encuentran dentro del rango reportado por Savin et al. (2001) los cuales al evaluar la actividad respiratoria en la capa arable registraron valores entre 1 y 27 mg C/kg.día.

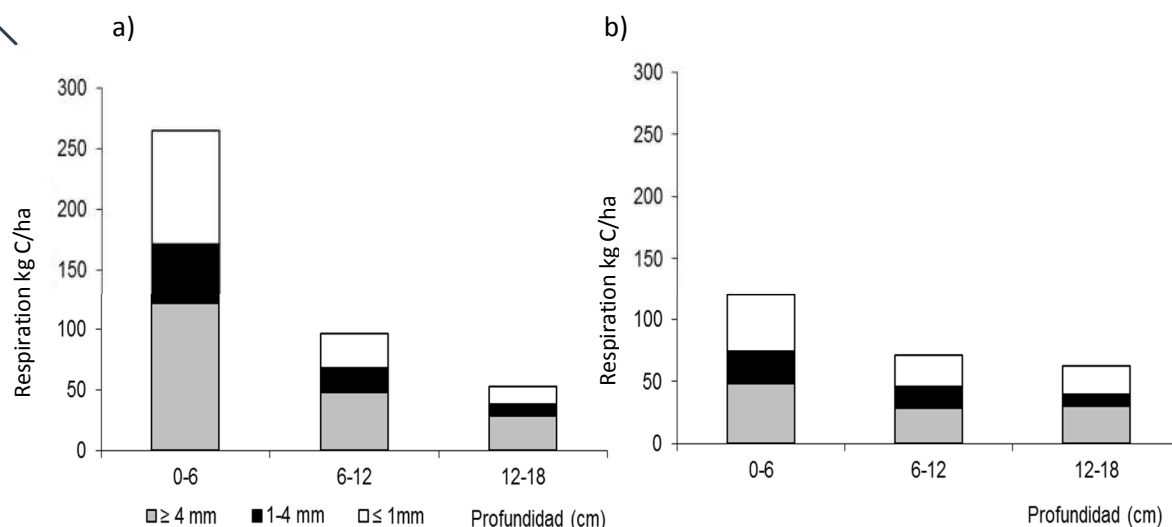


Figura 11 - Respiración (expresado en masa total de suelo) en tamaños de agregados a tres profundidades en siembra directa (a) y siembra convencional (b).

Recomendaciones surgidas de los resultados

Bajo las condiciones de estudio, sobre un Ustol franco arenoso profundo de la región semiárida, el agua almacenada durante el periodo de barbecho influyó significativamente sobre los rendimientos. La eficiencia de barbecho varió ampliamente entre años y entre sistemas de labranza favoreciendo en mayor grado a los cultivos de invierno, los cuales resultaron más favorecidos que los cultivos de verano, debido a la mayor eficiencia de barbecho y a la mayor probabilidad de que las precipitaciones cubran los requerimientos de agua de los mismos.

Considerando los rendimientos promedios de 23 cultivos de la rotación, la producción en SD fue 13 % superior con respecto a SC lo cual fue explicado por una mayor disponibilidad y eficiencia de uso del agua.

Los efectos acumulados del manejo también se comprobaron en distintas propiedades edáficas. El sistema en SDSP, presentó los mayores contenidos de MO, MO J, Nt y P, en el estrato superficial. El mayor contenido de MO explicaría la menor densidad aparente máxima, proporción de agregados menores de 2 mm y los mayores valores de infiltración, conductividad hidráulica, estabilidad estructural. Además asociado a mayores contenidos de MO en el estrato superficial se comprobó un efecto positivo sobre indicadores biológicos tales como biomasa microbiana y respiración.

En función a los resultados obtenidos, se infiere que la SD permite mantener los niveles de carbono orgánico con respecto a la situación inicial, incidiendo positivamente sobre los rendimientos y sobre la eficiencia en el uso del agua. Se comprueba que los beneficios del sistema de labranza resultan dependiente del manejo de los residuos, dado que cuando se utilizan los residuos por parte de la ganadería se reducen los efectos asociados a captación, almacenaje y uso del agua.

Bibliografía

- Aboudrare A., P. Debaeke, A. Bouaziz, H. Chekli. 2006. Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semi-arid Mediterranean climate. *Agricultural Water Management* 83: 183-196.
- Austin R., E. Playán, J. Gimeno. 1998. Water storage in soils during the fallow: prediction of the effects of rainfall pattern and soil conditions in the Ebro valley of Spain. *Agricultural Water Management* 36: 213-321.
- Baumhardt R., O. Jones. 2002. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. *Soil Till. Res.* 68: 71-82.
- Beare M., M. Cabrera, P. Hendrix, D. Coleman. 1994. Aggregate-protected and unprotected organic matter pools in conventional and no-tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 787-795.
- Bossio D., K. Geheb, W. Crichtle. 2010. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agricultural Water Management* 97: 536-542.
- Campbell C, V. Biederbeck, B. McConkey, D. Curtin, R. Zentner. 1998. Soil quality - Effect of tillage and fallow frequency. Soil organic matter quality as influenced by tillage and fallow frequency in a silt loam in southwestern Saskatchewan. *Soil Biology and Biochemistry.* 31: 1-100
- Fernández R., E. Noellemeyer, D. Funaro, A. Quiroga, N. Peinemann. 2009. Disponibilidad de agua, nitrógeno y azufre en barbechos con y sin control de malezas en distintos niveles de residuos. *Ciencia del Suelo.* 27: 57-66.
- Fernández R., A. Quiroga. 2008. Efecto del sistema de labranza en la eficiencia de almacenamiento del agua en la región semiárida pampeana. XXI Congreso Argentino de la ciencia del suelo. Actas y CD.
- Fernández R., A. Quiroga, C. Álvarez, C. Lobartini, E. Noellemeyer. 2016. Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Rev Ciencia del Suelo.* 36 (2). En prensa.
- Fernández R., A. Quiroga, E. Noellemeyer, D. Funaro, J. Montoya, B. Hitzmann, N. Peinemann. 2008. A study of the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. *Agricultural Water Management* 95: 1028-1040.
- Gartzia-Bengoetxea N., A. González-Arias, A. Merino, I. Martínez de Arano. 2009. Soil organic matter in

soil physical fractions in adjacent semi-natural and cultivated stands in temperate Atlantic forests. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 1674–1683.

Gude A., E. Kandeler, G. Gleixner. 2012. Input related microbial carbon dynamic of soil organic matter in particle size fractions. *Soil Biology & Biochemistry* 47: 209-219

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. Climate Change 2007. Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Kramer S, S. Marhan, L. Ruess. 2012. Carbon flow into microbial and fungal biomass as a basis for the belowground food web of agroecosystems. *Pedobiologia (Jena)* 55:111–119.

Lagomarsino A., S. Grego, E. Kandeler. 2012. Soil organic carbon distribution drives microbial activity and functional diversity in particle and aggregate-size fractions. *Pedobiologia* 55: 101– 110.

López-Garrido R., M. Deurer, E. Madejón, J. Murillo, F. Moreno. 2012. Tillage influence on biophysical soil properties: The example of a long-term tillage experiment under Mediterranean rainfed conditions in South Spain. *Soil Till. Res.* 118: 52-60.

Mathews O., T. Army. 1960. Moisture storage on fallow wheatland in the great plains. *Soi Science Society of America Proceedings.* 24: 414-418.

Melero S., R. López-Garrido, J. Murillo, F. Moreno. 2009. Conservation tillage: Short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil Till. Res.* 104: 292–298.

Monzon J., V. Sadras, F. Andrade. 2006. Fallow soil evaporation and water storage as affected by stubble in sub-humid (Argentina) and (Australia) environments.

Noellemeyer E., R. Fernández, A. Quiroga. 2013. Crop and tillage effects on water productivity of dryland agriculture in Argentina. *Agriculture* 3: 1-11.

Olaoye J. 2002. Influence of tillage on crop residue cover, soil properties and yiled components of cowpea in derived savannah ectones of Nigeria. *Soil Till Res.* 64: 179-187.

Orphanos P., C. Metochis.1994. The water relations of barley grown continually or after fallow under semi-arid conditions. *Exp. Agric.* 30: 431-443

Pala M., J. Ryan, H. Zhang, M. Singh, H. Harris. 2007. Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 93:136-144.

Power J., W. Wilhelm, J. Doran. 1986. Crop residue effects on soil environment and dryland maize and soya bean production. *Soil Till. Res.* 8: 101-111.

Quiroga A., R. Fernández, E. Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil Till. Res.* 105: 164-170.

Quiroga A., C Gaggioli, R. Fernández, E. Noellemeyer. 2015. Contribución al manejo sustentable de suelos en zonas semiáridas. El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo 1. Ed R. Casas, G. Albarracín. PROSA-FECIC. ISBN 978-950-9149-39-7 Pág. 167-181.

Quiroga A., A. Oderiz, M. Uhaldegaray, C. Alvarez, E. Scherger, R. Fernández, I. Frasier. 2016. Influencia del manejo sobre indicadores físico-hídricos de compactación de suelos. XXV Congreso de suelos de la AACS. Río Cuarto, Córdoba.

Rockstrom J. 2003. Water for food and nature in drought-prone tropics: vapour shift in rain-fed agriculture. *Royal Society Transactions B: Biological Sciences* 358: 1997–2009.

-
- Rockstrom J., L Karlberg, S Wani, J Barron, N Hatibu, T Oweis, A Bruggeman, J Farahani, Z Qiang. 2010. Managing water in rainfed agriculture—The need for a paradigm shift. *Agricultural Water Management* 97: 543-550.
- Savin M., J Gorres, D Neher, J Amador. 2001. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. *Soil Biol. Biochem.* 33: 429–438.
- Schuller P., D Walling, A. Sepulveda, A. Castillo, I Pino. 2007. Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using ^{137}Cs measurements. *Soil Till. Res.* 94: 183–192.
- Tanaka D., J Aase. 1987. Fallow method influences on soil water and precipitation storage efficiency. *Soil Till. Res.* 9: 307-316.
- Unger P. 1984. Tillage and residue effects on wheat, sorghum, and sunflower grown in rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 885-891.

Los sistemas de producción agrícola ocupan un eje central en la producción de alimentos, pero al mismo tiempo se han transformado en responsables de distintos problemas ambientales. En diversos foros, se ha puesto énfasis en la necesidad de desarrollar sistemas agropecuarios sustentables: suficientemente productivos, económicamente viables, ecológicamente adecuados (que conserven la base de recursos naturales y preserven la integridad del ambiente), cultural y socialmente aceptables, y técnicamente posibles. El desarrollo de tales sistemas debe basarse en un profundo conocimiento del ambiente natural y biológico, y de las complejas interacciones entre éstos y las prácticas de manejo. Los ensayos de larga duración (ELD) contribuyen a generar conocimientos de los efectos de largo plazo de las prácticas agrícolas y de los desarrollos tecnológicos, aportando a la comprensión de los cambios generalmente lentos que ocurren en el sistema, particularmente en el suelo, por el uso continuo de determinadas combinaciones de prácticas de manejo. En el país existen cerca de 54 ELD en distintas regiones agroecológicas productoras de cereales y oleaginosas, cuyas duraciones varían entre 5 y 40 años, que desde 2004 han sido agrupados dentro del Proyecto Nacional Cereales y Oleaginosas del INTA articulando actividades con los Programas Nacionales Suelos, Agua y Recursos Naturales. Dada la relevancia de la información que estos experimentos generan, son parte del patrimonio del INTA.

La presente publicación resume la información de algunos de estos ELD con el objeto de ponerla a disposición de la comunidad agropecuaria. En cada caso se remarca el problema a abordar al momento del planteo del ELD y los principales resultados al cabo de un periodo de tiempo que permita la recomendación de distintas prácticas de manejo de los sistemas agrícolas.



Ministerio de Agroindustria
Presidencia de la Nación