

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD FÍSICA DEL SUELO: IMPACTO EN EL CULTIVO DE
MAÍZ, EFECTO DEL PARAPLOW COMO MEDIDA CORRECTIVA**

por

Valentina RUBIO DELLEPIANE

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de Magister
en Ciencias Agrarias opción Ciencias del
Suelo

MONTEVIDEO

URUGUAY

Julio 2018

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Mario Pérez, Oswaldo Ernst, Claudio García y Florencia Alliaume, el 10 de julio de 2018. Autora: Valentina Rubio. Director Andrés Quincke.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de suelos de INIA La Estanzuela, a Wilfredo, Emi, Damián, Lalo y Vasco por su apoyo en el trabajo de campo y laboratorio. A Agustín Núñez y Andrés Beretta por estar siempre dispuestos a discutir conmigo sobre este trabajo.

A Andrés Quincke, Adriana García por brindarme la oportunidad de realizar con ellos este trabajo.

A mi comité de seguimiento Mario Pérez y Oswaldo Ernst, por su continua disposición.

A INIA por permitirme realizar mis estudios de maestría junto con las demás tareas de mi cargo, es especial a José Terra y Jorge Sawchik.

A Facultad de Agronomía por darme la oportunidad de continuar con mi formación.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional, en especial a mis padres por ser quienes me enseñaron a siempre ir por más.

A Rodrigo por todo.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	1
2. <u>IMPACTO DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN LA ESTABILIDAD</u>	
<u>ESTRUCTURAL DE MOLISOLES</u>	4
2.1. RESUMEN.....	4
2.2. SUMMARY.....	5
2.3. INTRODUCCIÓN.....	6
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
2.4.1. <u>Descripción de sitios experimentales</u>	7
2.4.2. <u>Muestreo de suelos</u>	8
2.4.3. <u>Análisis químicos</u>	8
2.4.4. <u>Estabilidad de agregados</u>	9
2.4.5. <u>Densidad aparente y macroporos</u>	10
2.4.6. <u>Análisis estadístico</u>	10
2.5. RESULTADOS.....	11
2.5.1. <u>Estabilidad de agregados</u>	11
2.5.2. <u>Identificación de variables determinantes de la estabilidad de</u>	
<u>agregados</u>	13
2.5.3. <u>Relación entre las variables físicas y la estabilidad de agregados</u>	15
2.6. DISCUSIÓN.....	16
2.6.1. <u>Efecto de la historia de uso del suelo</u>	17
2.6.2. <u>Variables físico químicas del suelo y estabilidad de agregados</u>	18
2.6.3. <u>Variables físicas del suelo y estabilidad de agregados</u>	21
2.7. CONCLUSIONES.....	21
2.8. BIBLIOGRAFÍA.....	21

3. CALIDAD FÍSICA DE SUELO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ: IMPACTO DEL PARAPOW COMO MEDIDA CORRECTIVA.....	27
3.1. RESUMEN.....	27
3.2. SUMMARY.....	28
3.3. INTRODUCCIÓN.....	29
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.4.1. <u>Sitios experimentales</u>	30
3.4.2. <u>Diseño experimental</u>	31
3.4.3. <u>Operaciones de campo</u>	32
3.4.4. <u>Determinaciones en suelo</u>	32
3.4.4.1. Propiedades químicas.....	32
3.4.4.2. Propiedades físicas	32
3.4.4.3. Contenido de agua	33
3.4.5. <u>Determinaciones en el cultivo</u>	33
3.4.6. <u>Análisis estadístico</u>	33
3.4.6.1. Comparación de la CFS entre sitios, efectos de ésta en el rendimiento.....	33
3.4.6.2. Efecto de los tratamientos.....	34
3.5. RESULTADOS.....	34
3.5.1. <u>Caracterización climática</u>	34
3.5.2. <u>Caracterización de los sitios experimentales</u>	35
3.5.3. <u>Impacto del paraplow en el suelo</u>	35
3.5.3.1. Calidad física	35
3.5.3.2. Resistencia a la penetración.....	37
3.5.3.3. Contenido de agua.....	38
3.5.3.4. Nitrógeno en el suelo.....	39
3.5.4. <u>Performance del cultivo</u>	40
3.5.4.1. Absorción de nutrientes.....	43
3.5.4.2. Calidad física del suelo y rendimiento del cultivo.....	43
3.6. DISCUSIÓN	44
3.6.1. <u>Relación entre la calidad física y el rendimiento de maíz sin paraplow</u>	45

3.6.2. <u>Efectos indirectos del paraplow</u>	47
3.6.3. <u>Impacto del paraplow en el cultivo de maíz</u>	48
3.6. CONCLUSIONES.....	50
3.7. BIBLIOGRAFÍA	50
4. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	57
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	59

RESUMEN

La pérdida de calidad física de los suelos (CFS) es uno de los principales problemas que enfrentan los agroecosistemas, y puede conllevar a pérdidas en la productividad de los cultivos. En el primer artículo incluido en este trabajo se evaluó la estabilidad de agregados (EA), determinada mediante el método propuesto por Le Bissonnais (1996), como indicador de la CFS, buscando identificar sus factores determinantes. El estudio fue realizado en 16 Molisoles con diferente historia de uso. El uso de la EA permitió detectar diferencias entre sitios debidas al manejo anterior del suelo. Su variación estuvo asociada, entre otros, a las variaciones en el carbono orgánico del suelo (COS). El efecto del COS, no obstante, en dos de los mecanismos de ruptura de agregados evaluados, tendió a decrecer, siendo mínimo el efecto por encima de 25 g kg⁻¹. Así, las prácticas agrícolas que promuevan la acumulación de COS podrían contribuir a preservar la estructura del suelo a través de una mayor EA.

En el segundo artículo de este trabajo se evaluó el impacto de la CFS en el rendimiento de maíz, y la efectividad del paraplow como herramienta correctiva. Se instalaron once experimentos, durante dos zafras, en Molisoles (Argiudoles típicos) que diferían en CFS debido a su historia de uso. El rendimiento del maíz fue menor en los suelos más degradados, con mayor Dap y menor macroporosidad. El pasaje de paraplow mejoró la CFS y alteró la dinámica de agua y de nitrógeno, pero los cambios fueron de magnitud escasa y no afectaron el rendimiento, ni la absorción de nutrientes. El paraplow no resultó una herramienta prometedora para la corrección de problemas de CFS en el suelo evaluado.

Palabras clave: física del suelo, compactación, descompactación, estabilidad de agregados, rendimiento de maíz

Soil physical quality assessment: impacts on corn yield and remediation with deep tillage

SUMMARY

Soil physical quality (SPQ) degradation is one of the major problems in cropping systems, and may negatively affect crops. The first article in this work evaluates aggregate stability (AS) assessed by the Le Bissonnais (1996) method, as a SPQ indicator, looking forward to determinate the main factors controlling this property. A set of sixteen Mollisols with variable cropping history were analyzed. AS allowed identifying differences due to previous soil management. Gradual increases in AS were explained by the increase in soil organic carbon (SOC), thus any farming practice increasing SOC could be an alternative to improve SPQ. However, no further increases should be expected beyond 25 g kg⁻¹ of SOC for these soils, for two of the tree methods of AS analyzed.

The second article in this work studies the relationship between SPQ and corn yield and the impact of deep tillage as a remediation alternative. Eleven experiments were installed during 2014-15 and 2015-16, on Mollisols (typic Argiudolls) differing in SPQ due to previous cropping history. The results confirmed that SPQ degradation, measured as higher bulk density and lower macroporosity, limits corn yield. Deep tillage moderately improved SPQ and modifies water and nitrogen dynamics, although crop yield and nutrient absorption were not affected.

Keywords: Soil Physical quality, compaction, Deep ripping, aggregate stability, corn yield

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La compactación es uno de los principales procesos de pérdida de la calidad física del suelo (CFS) y de las problemáticas que enfrentan los sistemas agrícolas (Batey, 2009). Su ocurrencia ha sido intensificada en las últimas décadas (Reichert et al., 2015), agravando otros problemas de degradación como la erosión, pérdida de nutrientes y contaminación (Hartemink, 2008). En líneas generales, produce un aumento en la densidad aparente (Dap) y la resistencia a la penetración (RP) (Batey, 2009), así como un cambio en la geometría del sistema de poros del suelo (Schaffer et al., 2008). A nivel nacional, un relevamiento de 115 predios realizado por Morón y Quincke (comunicación personal, 23 de febrero 2018) en los departamentos de Río Negro y Soriano, evidenció un aumento en la compactación en las chacras en relación a los suelos de referencia. Resultados similares fueron encontrados en la Pampa Ondulada por Álvarez, et al. (2014), quienes reportan disminuciones en la macroporosidad, aumentos en la Dap y pérdidas en la estabilidad estructural en suelos de chacra.

La compactación del suelo es originada básicamente por la aplicación de un stress (lluvia, pasaje de maquinaria o pisoteo animal) sobre un suelo susceptible (Batey, 2009). Ha sido reportado que la mejor estrategia para el manejo del problema de compactación es su prevención (Alakukku et al., 2003). La susceptibilidad de un suelo a la compactación, depende del contenido de humedad al momento en que ocurre el stress y de la estabilidad de los agregados del suelo (EA) (Batey, 2009). La EA es una medida de la resistencia del suelo a mantener su arreglo espacial (Amézketa, 1999) y es, además, considerada un indicador útil para el diagnóstico de la CFS (Doran y Parkin, 1994). El contenido de carbono orgánico del suelo (COS) ha sido reportado como el principal determinante de la EA en Molisoles (Novelli et al., 2013) y aumentos en COS generarían aumentos en la EA. Sin embargo, esta relación es variable en función del suelo y clima (Idowu, 2003) y ha sido reportado que no se esperarían mayores aumentos en la EA cuando se superan determinados valores de COS (Le Bissonnais et al., 2007 y Regelink et al., 2015). Esto no ha sido evaluado en Molisoles, donde la relación entre éstas y otras propiedades no está del todo clara. Entender la importancia de los diferentes procesos involucrados en la ruptura de agregados, y las propiedades del suelo que hacen a su susceptibilidad, es fundamental para poder fomentar prácticas de conservación tendientes a prevenir la compactación (Regelink et al., 2015).

La pérdida de CFS tiene efecto sobre distintos procesos en el suelo. Entre otros: controla el contenido y la transmisión de agua, aire, calor, y nutrientes (Alaoui et al., 2011); modifica el número, actividad y diversidad de los microorganismos en el suelo (Mijangos et al., 2006); y determina el patrón de distribución y el volumen de suelo explorado por las raíces (Nosalewicz y Lipiec, 2014). Predecir el impacto de la CFS sobre los cultivos es difícil debido a que la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo es compleja y variable (Logsdon y Karlen, 2004). Esta complejidad lleva a que no exista un consenso sobre los niveles críticos de compactación a partir de los cuales el rendimiento de los cultivos es limitado. Por otro lado, un mismo nivel de compactación puede tener efectos variados sobre los cultivos (Hamza y Anderson, 2005). Una de las principales causas de esta variación es el clima, el cual es particularmente restrictivo en condiciones extremas (Palta, et al., 2011). Otro factor condicionante del efecto de la compactación es el estado nutricional del suelo (Ahmad et al., 2009). En suelos compactados se ha observado una menor concentración y toma de nutrientes como nitrógeno fósforo y potasio, lo cual puede llevar a deficiencias nutricionales (Ahmad et al., 2009; Nevens y Reheul, 2003; Ishaq et al., 2003). Esto debería ser considerado a la hora de evaluar los efectos de la compactación en los cultivos. Incluso, ha sido propuesto que la fertilización podría servir para disminuir los impactos del problema (Beutler y Centurion, 2004, Kamiji et al., 2014).

Una vez que el suelo está compactado la recuperación biológica o natural puede resultar lenta, insuficiente o inadecuada (Spoor et al., 2003). En cambio, las prácticas de recuperación mecánica como el laboreo profundo están más difundidas ya que tienen un efecto rápido (Hamza y Anderson, 2005). El uso de descompactadores, como el paraplow o paratil, cuenta con la ventaja de no invertir el suelo, manteniendo su cobertura y adaptándose por tanto a sistemas de SD (Smith et al., 2002). La descompactación mecánica mejoraría las CFS, afectando además la dinámica y disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Díaz-Zorita, 2000, Hamza y Anderson, 2005, Álvarez et al., 2009, Al Adawi y Reeder, 1996). Sin embargo, la magnitud del impacto sobre los suelos y cultivos es errática, dependiendo del año y del clima (Nicoloso et al., 2008, Botta et al., 2004, Sadras et al., 2005). Es escasa la información sobre el uso del paraplow en Molisoles con varios años en siembra directa y degradados por la historia de uso.

Esta tesis está compuesta por dos trabajos, los cuales se presentan a continuación en forma de artículo científico. El primero de ellos busca evaluar a la EA como indicador de CFS y establecer sus factores determinantes en Molisoles con el fin de identificar, a futuro, prácticas de manejo que ayuden a la mitigación de problemas de compactación. Las principales hipótesis son que: la determinación de la EA mediante el método propuesto por Le Bissonnais (1996) es un indicador sensible a la historia de uso del suelo; la EA se relaciona con otras propiedades físico-químicas del suelo, en especial el COS; es posible determinar valores de COS a partir de los cuales no se esperarían mayores aumentos en la EA; y por último que el estado de degradación física del suelo se relaciona con la EA.

El segundo de los artículos de este trabajo busca evaluar el impacto de la CFS en el rendimiento del cultivo de maíz y el uso del paraplow como una herramienta correctiva. Las principales hipótesis de este trabajo son que: la pérdida de CFS generada por el uso del suelo limita el rendimiento del cultivo tanto por efectos directos como indirectos asociados a la disponibilidad de agua y nitrógeno para el cultivo; el uso del paraplow mejora la CFS y por lo tanto resultaría en una mejora en el rendimiento; dicha respuesta, está condicionada por la disponibilidad de N; debido a las alteraciones generadas por la descompactación en la dinámica y disponibilidad de agua y nutrientes, la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada sería modificada.

2. IMPACTO DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS EN LA ESTABILIDAD ESTRUCTURAL DE MOLISOLES

Artículo a presentar en Agrociencia Uruguay

2.1. RESUMEN

Entender los procesos involucrados en la ruptura de los agregados, y la forma en la que éstos se relacionan con las propiedades físico-químicas del suelo es fundamental para la identificación de prácticas paliativas a la degradación del suelo. Los objetivos de este trabajo fueron, para suelos Molisoles: determinar la estabilidad de agregados (EA) frente al: el estallido por aire entrampado, la disgregación mecánica y la expansión diferencial de las arcillas, mediante la técnica propuesta por Le Bissonnais (1996), y evaluar su sensibilidad a las variaciones generadas por la historia de uso del suelo; explorar el rol de diferentes atributos físico-químicos en la EA; y evaluar la relación entre la EA, la densidad aparente (Dap) y macroporosidad del suelo. Para el cumplimiento de nuestros objetivos fueron evaluados 16 suelos Molisoles. Nuestros resultados confirman que la EA, determinada mediante diferentes mecanismos permite detectar diferencias entre suelos. Parte de estas diferencias pudieron ser asociadas a la historia de uso del suelo. El contenido de carbono orgánico (COS), considerado junto al contenido de arena y Mg en el suelo, mostró una relación significativa con la EA determinada mediante diferentes mecanismos. Mayores contenidos de COS se asociaron a aumentos en la EA. Estos aumentos cesarían por encima de 25 g kg⁻¹ de COS para los mecanismos asociados a la disgregación mecánica del suelo y la expansión de las arcillas. Los suelos con mayor EA fueron los que presentaron una menor Dap, lo cual indicaría la relación entre esta propiedad y el deterioro de la calidad física del suelo.

Palabras clave: Estabilidad estructural, calidad de suelo, prevención, compactación

Impact of Soil Physical and Chemical Properties on Soil Aggregate Stability of Mollisols

2.2. SUMMARY

Understanding the processes involved in aggregate stability (AS) and how these processes relate with soil physical and chemical properties is essential to identify management practices aimed at preventing soil degradation. The main objectives of this work were: to determine AS of Mollisols under three mechanisms of disruption (slaking, mechanical breakdown and microcracking) using the method of Le Bissonnais (1996) and to evaluate its sensibility to changes generated by land use; to explore the role of different soil physical and chemical properties on AS; and to evaluate how AS is related with soil bulk density and macroporosity. To achieve these objectives 16 soils with variable soil organic carbon content (SOC) were evaluated. Our results confirmed that AS, determined by different mechanisms allowed to identify differences between soils. Part of these differences were associated with soil use history. SOC, along with clay and magnesium content, are significantly related with AS. Higher SOC is associated with higher AS. However, no further increases should be expected, for mechanical disruption and clay dispersion, beyond 25 g kg⁻¹ SOC. Soils with higher AS present lower bulk density, indicating the relationship between this property and soil physical deterioration.

Key words: Soil physical quality, compaction, aggregate stability

2.3. INTRODUCCIÓN

La estabilidad de agregados (EA) es una medida de la resistencia del suelo a mantener su arreglo especial cuando es expuesto a una serie de estreses (Amézketa, 1999). Una pobre agregación induce a aumentos en la compactación (Batey 2009), reducciones en la infiltración, aumentos en la erosión y en el encostramiento del suelo (Le Bissonnais y Singer, 1993; Le Bissonnais et al., 2007; Xiao et al., 2017). La EA puede ser sensible al manejo del suelo, siendo una propiedad útil para el diagnóstico de su estado de degradación (Doran y Parkin, 1994). Además la EA afectaría la productividad de los cultivos al afectar la porosidad, el movimiento de agua y nutrientes en el suelo los cuales afectan directamente el crecimiento vegetal (Kasper et al., 2009). Profundizar el conocimiento sobre el efecto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en la estabilidad de agregados, permitiría promover prácticas de manejo tendientes a aumentar esta propiedad (Regelink et al., 2015).

Diferentes métodos han sido propuestos para evaluar la EA (Amézketa, 1999). El método de Le Bissonnais (1996) cuenta con la ventaja de reproducir los tres principales mecanismos de desagregación que se dan en el suelo: Estallido de agregados, logrado mediante la humectación rápida de un suelo seco, (DMA_1); Desagregación mecánica de agregados, logrado por la agitación mecánica de agregados pre humedecidos en etanol (DMA_2); Microfisuramiento por hinchamiento diferencial, logrado mediante una humectación lenta del suelo por capilaridad (DMA_3). Así, es posible analizar los diferentes mecanismos de forma individual y/o combinarlos para obtener un índice de estabilidad estructural (DMA_m).

El efecto del COS en la EA ha sido ampliamente estudiado, y es reportado como su principal promotor en Molisoles (Novelli et al., 2013). Aumentos en el COS provocan aumentos en la EA y algunos autores proponen una relación lineal entre estas variables (Chenu, Le Bissonnais y Arrouays, 2000; Aziz y Karim, 2016). Sin embargo, ha sido sugerido que el efecto puede ser dependiente de la concentración de COS, siendo las respuestas decrecientes (Le Bissonnais et al., 2007; Regelink et al., 2015). Los niveles de COS a partir de los cuales no se esperan mayores respuestas en EA han sido poco reportados y dependen de las características texturales del suelo (Asano y Wagai, 2014). En nuestro conocimiento, no hay estudios que

sugieren niveles de COS a partir de los cuales no se espera mayores aumentos en la EA en Molisoles.

Los principales objetivos de este trabajo son, en suelos Molisoles determinar EA ante tres mecanismos de ruptura utilizando el método propuesto por Le Bissonnais (1996); evaluar su sensibilidad a la historia de uso del suelo; su relación con otras propiedades físico-químicas del suelo; y su relación con la calidad física del suelo determinada mediante otros indicadores.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. Descripción de sitios experimentales

Se relevaron 16 sitios, 12 de ellos ubicados en la estación experimental de INIA La Estanzuela (Colonia, Uruguay) y los restantes 4 en chacras manejadas de forma comercial. Los suelos evaluados se clasifican como Molisoles (Liu et al., 2012). En el Cuadro 1 se muestran las principales características de cada uno. Los ambientes del 1 al 8 se ubican dentro de un experimento de largo plazo, iniciado en el año 1963, en tanto los restantes son manejados de forma comercial. Dentro del experimento se evaluaron cuatro secuencias de cultivos que difieren en la proporción de cultivos y pasturas en la rotación. Éstas fueron: agricultura continua para grano (CC); 50% del tiempo bajo cultivos y 50% bajo pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas (50%); 50% del tiempo bajo cultivos y 50% bajo pasturas pura de leguminosas (50%leg); y agricultura continua hasta 1983 y luego 33% del tiempo en cultivos y 66% en pasturas (pastura corta de leguminosas y una pastura larga mezcla de gramíneas y leguminosas) (66%). Fueron evaluados los bloques dos (en 2014) y tres (en 2015) del experimento de largo plazo. El criterio de bloqueo del experimento fue la posición topográfica. Por más detalles sobre véase Morón (2003). Los sitios se clasificaron en dos grupos en función de su historia de uso de suelo. Aquellos con registro de pasturas en los últimos 6 años se consideraron que están en rotación (R) y aquellos sin registro de pasturas en ese período se consideraron en cultivo continuo (CC). En el experimento de largo plazo todas las determinaciones se realizaron a la siembra del cultivo posterior a la quema de la pastura con herbicida; los restantes sitios se encontraban en fase de cultivos al momento de la evaluación.

Cuadro 1: Descripción de los sitios experimentales

N°	Tipo	Historia	Coordendas	Arena	Arcilla	COS	pH	CIC	Ca	Mg	K	Na
				-----%-----		-----Cmol c kg ⁻¹ -----						
1	experimental	R_66%	34°20'34.30"S, 57°43'24.08"O	19	31	2,67	5,71	20,0	10,3	2,07	1,10	0,50
2	experimental	R_66%	34°20'34.30"S, 57°43'21.64"O	17	41	2,57	5,53	21,1	10,1	2,07	0,88	0,25
3	experimental	R_50%	34°20'34.30"S, 57°43'29.91"O	20	32	2,58	5,73	19,0	9,8	1,87	0,86	0,52
4	experimental	R_50%	34°20'34.30"S, 57°43'17.35"O	14	39	2,56	5,50	22,8	11,2	2,40	0,80	0,15
5	experimental	R_50%leg	34°20'34.30"S, 57°43'26.14"O	18	30	2,58	5,39	19,8	9,9	1,57	0,70	0,49
6	experimental	R_50%leg	34°20'34.30"S, 57°43'18.24"O	15	34	2,47	5,33	21,0	10,2	1,73	0,52	0,20
7	experimental	CC	34°20'34.30"S, 57°43'29.91"O	18	30	1,88	5,79	17,1	9,3	1,73	0,60	0,46
8	experimental	CC	34°20'34.30"S, 57°43'19.08"O	15	40	1,52	5,77	18,2	9,4	2,03	0,52	0,30
9	comercial	R	34°20'29.86"S, 57°42'50.75"O	13	35	2,50	5,49	20,3	10,1	1,70	0,75	0,39
10	comercial	R	34°20'31.27"S, 57°42'46.95"O	14	36	2,37	5,30	20,4	10,3	1,97	0,67	0,18
11	comercial	R	34°21'06.54"S, 57°41'16.68"O	16	37	1,77	-	22,0	11,6	3,77	0,43	0,66
12	comercial	R	34°21'01.81"S, 57°43'18.59"O	48	31	2,20	5,59	19,3	9,8	2,90	0,63	0,33
13	comercial	R	33°31'51.26"S, 58°00'01.76"O	40	34	1,99	5,83	20,3	12,8	2,82	0,37	0,33
14	comercial	CC	32°53'34.20"S, 57°06'14.14"O	36	44	3,20	5,82	26,2	17,5	1,98	0,38	0,09
15	comercial	CC	33°42'16.67"S, 58°05'56.39"O	60	25	1,46	6,13	14,6	10,5	1,15	0,66	0,25
16	comercial	CC	32°58'18.67"S, 57°41'52.59"O	49	31	2,93	5,50	21,8	13,1	2,23	0,45	0,19
Promedio				26	34	2,33	5,63	20,2	11,0	2,12	0,64	0,33
Desvío				15,41	4,93	0,49	0,22	2,56	2,07	0,62	0,20	0,16

R: Rotación de cultivos y pasturas, hay registro de pastura en los últimos 6 años; CC: cultivo continuo, no hay registro de pasturas en los últimos 6 años; 66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; COS: Carbono orgánico del suelo; CIC: Capacidad de intercambio catiónico

2.4.2. Muestreo de suelos

Los muestreos se realizaron para cada sitio en tres posiciones topográficas de una ladera (ladera alta, media y baja), previo a la siembra de cultivos de verano. Los mismos se realizaron en las campañas 2014, 2015 y 2017 en cada momento se evaluaron sitios diferentes.

2.4.3. Análisis químicos

Para la determinación de las propiedades químicas del suelo se tomó una muestra compuesta (por 20 submuestras) con calador, en el estrato de 0 a 15 cm. En cada muestra se determinó la textura (Beretta et al., 2014); el carbono orgánico del suelo (COS) (Wright y Bailey, 2001); pH al agua con una relación de suelo:agua de 1:2,5 (Beretta, Bassahun y Musselli, 2014); N total (Wright y Bailey, 2001); Ca, Mg, K y Na intercambiable (Jackson, 1964) y se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Jackson, 1964).

2.4.4. Estabilidad de agregados

Para la determinación de la EA se tomó una muestra del horizonte A (0-20 cm), 20 cm de ancho y 10 cm de espesor aproximadamente. Las muestras fueron tomadas a humedad cercana a capacidad de campo, con pala, descartándose el suelo en contacto directo con la misma. Luego se desmenuzaron manualmente, retirando el material vegetal y se tamizaron en húmedo en tamices de 5 y 3 mm. Los agregados retenidos en el tamiz de 3 mm fueron secados en estufa a 40°C por 24 hs para uniformizar el contenido de humedad. A tres submuestras, de 10 gramos de agregados, se les determinó la EA acorde a la metodología propuesta por Le Bissonnais (1996). Los pretratamientos para determinar los mecanismos de ruptura fueron; humedecimiento de los agregados en 50 ml de agua destilada durante 10 minutos (DMA₁); humedecimiento de los agregados en 50 ml de etanol durante 30 minutos, luego se realizaron 10 giros en 50 ml de agua destilada y se dejaron reposar por 30 minutos (DMA₂); y humedecimiento lento de los agregados, colocándolos sobre un papel de filtro a tensión de 3 cm, humedeciéndose por 1 hora (DMA₃).

Una vez finalizados cada uno de los pretratamientos las muestras se colocaron en un tamiz de 50 micrones inmerso en etanol, donde se tamizaron en un tamizador de Feodoroff realizando cinco movimientos helicoidales para realizar la primera separación granulométrica. Luego, la muestra retenida se transfirió a una cápsula de vidrio y se secó a 40°C por 48 horas. La muestra seca se pasó por una columna de tamices de 2000, 1000, 500, 200, 100 y 50 micrones. El material retenido en los tamices fue pesado para estimar el diámetro medio ponderado (DMA) acorde a la ecuación[1].

$$DMA = \sum [DM \text{ medios entre 2 tamices} \times (\text{partículas retenidas sobre el tamiz})] / 100. [1]$$

Donde DMA es el diámetro medio de agregados; DM es el diámetro medio entre dos tamices (mm) y partículas retenidas sobre el tamiz de refiere al porcentaje del peso de la muestra retenido en el tamiz.

El DMA_m para cada muestra se obtiene de un promedio aritmético del DMA₁, DMA₂ y DMA₃.

Para los diferentes pretratamientos y para el promedio, los suelos se consideraron según lo propuesto por Le Bissonnais (1996) donde: suelos con un DMA < 0,4 son considerados muy

inestables; entre 0,4-0,8 inestables; ente 0,8-1,3 medianamente estables; entre 1,3-2 estables; y mayores a 2 mm muy estables.

2.4.5. Densidad aparente y macroporos

Cuatro muestras indisturbadas en los estratos de 0-7,5 cm y 7,5 a 15 cm fueron tomadas utilizando anillos de PVC ($h = 5\text{ cm}$, volumen = 100 cm^3) por zona y por sitio. Las muestras se saturaron para ser llevadas a volumen de máxima expansión. Luego se colocaron en una mesa de tensión a 60 cm ($0,006\text{ MPa}$) para la determinación de la macroporosidad (MP) (Bezerra de Oliveira, 1968). Finalmente se secaron en estufa a 105°C para determinar la Dap (Blake y Harge, 1986).

2.4.6. Análisis estadístico

El efecto del sitio en el DMA_1 , DMA_2 , DMA_3 y DMA_m fue evaluado mediante un ANOVA. En caso observarse diferencias significativas las medias se compararon mediante LSD de Fisher ($\alpha = 0,1$). Mediante un análisis de varianza se evaluó el efecto de la historia de manejo (R o CC) en el DMA_1 , DMA_2 , DMA_3 y DMA_m , ante la existencia de heterogeneidad en las varianzas entre sitios se usaron modelos mixtos y se consideró heterogeneidad de tipo varident. Para los sitios experimentales (1-8) se determinó el efecto la secuencia de cultivos mediante un modelo mixto, en el cual se consideró el efecto fijo del año y heterogeneidad de varianzas entre sitios de tipo varident.

Para determinar el efecto de las variables físico químicas del suelo en la EA se realizaron correlaciones de Pearson entre las distintas variables y los diferentes valores de DMA ($\alpha = 0,1$). Además de las variables individuales se evaluaron el Ca y el Na como porcentaje de la CIC y de las BT, y el Na en relación al contenido de Ca más Mg. Al no mostrar mejores relaciones que las variables per se, estas relaciones no son mostradas en este trabajo. Se seleccionaron aquellas variables independientes (correlaciones no significativas, $\alpha \geq 0,1$) que mostraron mayor correlación con el DMA. Éstas fueron incorporadas en regresiones múltiples para determinar su efecto en el DMA, determinado por los diferentes mecanismos. La regresión se ajustó con un modelo backward fijando un p-valor máximo de 0,15 como criterio de retención. Todos los análisis se realizaron con el software InfoStat Versión 2017 (Di Rienzo J.A., et al., 2017) y su interfaz con R Studio (2015).

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Estabilidad de agregados

Hubo diferencias entre sitios en el DMA determinado por los tres pretratamientos y en el promedio (Cuadro 2). El DMA_m promedio entre sitios fue de 1,48mm, clasificándose la mayoría de los suelos (13 de 16) como estables (Le Bissonnais, 1996). El DMA₁ promedio fue de 0,58mm, comportándose la mayoría de los sitios como inestables a este pretratamiento. El DMA₂ fue en promedio 2,27 mm, la mayoría de los sitios se comportan como estables. El DMA₃ fue de 1,58 mm en promedio, los sitios en su mayoría se comportan como estables o muy estables a este pretratamiento.

Cuadro 2: Diámetro medio de agregados (DMA) para los diferentes pretratamientos y para el promedio por sitio.

N°	DMA 1 (mm)	DMA 2 (mm)	DMA 3 (mm)	DMA _m (mm) *
1	0,61 def	2,73 g	1,27 cde	1,54 defg
2	0,41 bc	2,22 def	1,42 defg	1,35 cdef
3	0,58 de	3,05 h	1,32 cdef	1,65 defg
4	0,78 h	2,72 g	1,34 def	1,62 defg
5	0,41 bc	2,66 g	1,15 bcd	1,41 cdef
6	0,34 ab	2,17 de	0,67 ab	1,06 abc
7	0,43 bc	2,59 g	0,79 abc	1,27 bcd
8	0,29 a	1,55 b	0,49 a	0,78 a
9	0,75 gh	2,56 g	1,84 fgh	1,72 efg
10	0,64 defg	2,56 g	1,82 efgh	1,67 efg
11	1,04 i	1,96 cd	2,39 ij	1,79 fg
12	0,71 fgh	2,45 efg	2,46 ij	1,88 g
13	0,52 cd	1,83 bc	2,11 hij	1,49 defg
14	0,58 de	2,49 fg	1,95 ghi	1,67 efg
15	0,38 ab	1,05 a	1,39 def	0,94 ab
16	0,66 efg	1,70 bc	2,52 j	1,64 defg
p-valor	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
DMS	0,12067	0,30324	0,54748	0,40101

DMS: diferencia mínima significativa. Letras distintas indican diferencias dentro de cada pretratamiento

La EA fue menor en los sitios de CC en relación a los sitios con historia reciente de pasturas en el DMA₁ (p-valor <0,0001), DMA₂ (p-valor <0,0001) y DMA_m (p-valor <0,0001), siendo la disminución promedio fue de 0,26, 0,83 y 0,6 mm respectivamente. No hubo diferencias asociadas a la historia de uso en el DMA₃ (p-valor= 0,8612).

Dentro de los sitios del experimento de largo plazo, el efecto de la secuencia de cultivos en el DMA resultó significativo para todos los pretratamientos. Los menores valores de EA se observaron para la secuencia de CC en el pretratamiento 2 y para las secuencias CC y 50-50B en los restantes pretratamientos (Cuadro 3).

Cuadro 3: Efecto de la historia de uso en el diámetro medio de agregados (DMA) obtenido mediante los diferentes pretratamientos y el promedio según la historia de uso para los sitios correspondientes al experimento de largo plazo

Historia	DMA ₁ (mm)	DMA ₂ (mm)	DMA ₃ (mm)	DMA _m (mm)
66%	0,51 b	2,48 b	1,35 a	1,63 a
50%	0,68 a	2,89 a	1,33 a	1,44 a
50% leg	0,38 c	2,42 b	0,91 b	1,23 b
CC	0,36 c	2,07 c	0,64 b	1,07 b
p-valor	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; CC: Agricultura continua. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de cada pretratamiento

2.5.2. Identificación de variables determinantes de la estabilidad de agregados

El DMA₁ aumentó con las bases intercambiables del suelo (Cuadro 4). El DMA₂ aumentó con el COS y algunas de las bases de intercambio, pero disminuyó con el contenido de arena. El DMA₃ se aumentó con el contenido de arena y con algunas propiedades químicas del suelo, de forma que en ocasiones resultaron opuestas a lo observado en relación al DMA₂. El DMA_m aumentó con algunas bases de intercambio y el COS.

Cuadro 4: Coeficientes de correlación entre el diámetro medio de agregados (DMA), para cada pretratamiento de desagregación y promedio, y las variables físico-químicas del suelo

	DMA ₁ (mm)	DMA ₂ (mm)	DMA ₃ (mm)	DMA _m (mm)
DMA1	1			
DMA2	Ns	1		
DMA3	0,69**	Ns	1	
DMAm	0,81**	0,60**	0,77**	1
CIC	0,40**	0,35**	0,32**	0,46**
BT	0,41**	Ns	0,5**	0,44**
% ST	Ns	-0,53**	0,34**	Ns
Arena	Ns	-0,49**	0,47**	Ns
Arcilla	Ns	Ns	Ns	Ns
COS	Ns	0,61**	Ns	0,46**
Ca	Ns	Ns	0,41**	0,27**
Mg	0,54**	Ns	0,38**	0,37**
K	Ns	0,45**	-0,30**	Ns
Na	0,30*	Ns	Ns	Ns

DMA: es el diámetro medio de agregados determinado por los pretratamientos 1 (DMA₁), 2 (DMA₂), 3 (DMA₃) y promedio (DMA_m); CIC: Capacidad de intercambio catiónico (cmolc kg⁻¹); BT: contenido de bases intercambiables totales (cmolc kg⁻¹); %ST: porcentaje de saturación de bases (%); COS: Carbono orgánico del suelo (g kg⁻¹); ns: no significativo; *: p-valor < 0,1; **: p-valor < 0,05

Con algunas de las propiedades físico-químicas del suelo se pudo explicar un 41, 60 y 53% de la variabilidad del DMA₁, DMA₂ y DMA₃ respectivamente (Cuadro 5). El COS mostró un efecto positivo y significativo en el DMA determinado por los diferentes pretratamientos, cuando es considerado junto con otras variables. Una estimación del efecto del COS en la EA para los diferentes pretratamientos a valores constantes de arena y Mg se presenta en la Figura 1. El contenido de arena afectó significativamente el DMA determinado por todos los pretratamientos, siendo su efecto positivo para el DMA₃ pero negativo respecto a los demás. El Mg mostró un efecto significativo y positivo con el DMA₁ y DMA₃, no así con el DMA₂.

Cuadro 5: Regresiones múltiples entre las diferentes propiedades físico-químicas del suelo y el diámetro medio de agregados determinado por los diferentes pretratamientos.

	Ecuación	R2 ajustado
DMA ₁ (mm)	$(-0,04 - 0,02 \text{ Arena} + 3,5 \exp -4 \text{ Arena} \cdot \text{Arena} + 0,21 \text{ Mg} + 0,18 \text{ COS})$	0,41
DMA ₂ (mm)	$(-2,07 - 1,9 \exp -4 \text{ Arena} + 3,54 \text{ COS} - 0,66 \text{ COS} \cdot \text{COS})$	0,60
DMA ₃ (mm)	$(-3,6 + 0,03 \text{ Arena} + 0,1 \text{ Mg} + 3,05 \text{ COS} - 0,54 \text{ COS} \cdot \text{COS})$	0,53

DMA es el diámetro medio de agregados determinado por los pretratamientos 1 (DMA₁), 2 (DMA₂) y 3 (DMA₃); COS: carbono orgánico del suelo; COS. COS: carbono orgánico del suelo al cuadrado

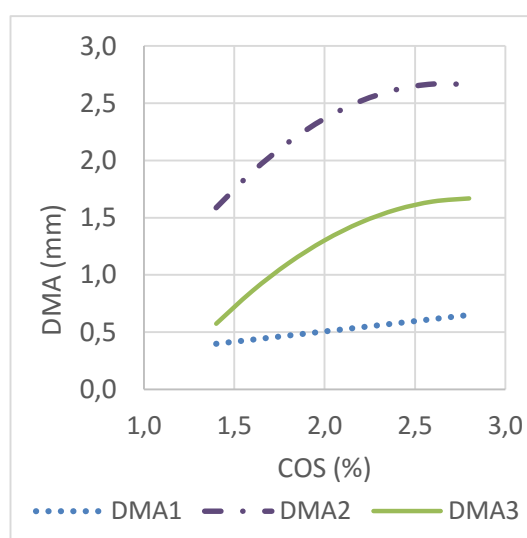


Figura 1: Relación estimada entre el Diámetro medio de agregados (DMA) y el contenido de carbono (COS) según pretratamiento, asumiendo un porcentaje de arena de 25% y un contenido de Mg de 2,12 Cmol c kg⁻¹. Donde DMA₁, DMA₂ y DMA₃ corresponden al DMA determinado mediante los pretratamientos 1, 2 y 3 respectivamente.

2.5.3. Relación entre las variables físicas y la estabilidad de agregados

No hubo una relación significativa entre la macroporosidad y el DMA obtenido a partir de ninguno de los pretratamientos evaluados, ni con el DMA_m (p-valor= 0,671, 0,731, 0,199 y 0,698 para el DMA_m, 1, 2 y 3 respectivamente). La Dap disminuyó con el aumento del DMA₂, DMA₃ y DMA_m ($\alpha < 0,01$), pero no se relacionó de forma significativa con el DMA₁ (Cuadro 6).

Cuadro 6: Análisis de regresión lineal entre la Densidad aparente (Dap) y el diámetro medio de agregados (DMA) en mm para cada pretratamiento y el promedio.

	p-valor	r ²	Coeficiente
DMA ₁	0,2723	0,03	-0,36
DMA ₂	0,0195	0,12	-2,08
DMA ₃	0,0664	0,08	-1,91
DMA _m	0,0665	0,16	-1,39

DMA es el diámetro medio de agregados determinado por los pretratamientos 1 (DMA₁), 2 (DMA₂) y 3 (DMA₃)

2.6. DISCUSIÓN

Los valores de DMA observados son comparables a los reportados previamente para Molisoles (Novelli et al., 2013). El DMA_m es similar al reportado por Gabioud, Wilson y Sasal (2012), siendo los valores mínimos comparables a los observados bajo monocultivo de soja. Los valores máximos de DMA_m observados resultan intermedios a los reportados por este autor para rotaciones agrícolas y suelos inalterados (Gabioud, Wilson y Sasal, 2012), lo cual es consistente con las historias evaluadas.

El humedecimiento rápido del suelo (DMA₁) fue el pretratamiento más destructivo, en concordancia con lo reportado previamente por Gabioud, Wilson y Sasal (2012) y por Wu, et al. (2017). Los suelos se comportan como inestables ante el pretratamiento de estallido, lo cual ha sido asociado con una ocurrencia frecuente de problemas de encostramiento del suelo (Le Bissonnais, 1996). El pretratamiento menos destructivo para Molisoles y Vertisoles sería, según Gabioud, Wilson y Sasal (2012), la disgregación mecánica (DMA₂). En el presente estudio, sin embargo, existen diferencias entre sitios y no todos mostraron este pretratamiento como el más destructivo.

Al haber diferencias entre sitios, todas las mediciones de EA se pueden utilizar como indicadores sensibles para detectar diferencias entre suelos, pero hay diferencias en la sensibilidad de los distintos pretratamientos (Cuadro 2). El pretratamiento 3, asociado a la expansión diferencial de las arcillas, permitió una mayor separación entre sitios, permitiendo separar un mayor número de grupos en el contraste de medias mediante LSD de Fisher, seguido por el 1 y por último el 2. Esto concuerda con lo propuesto por Le Bissonnais (1996) quien afirma que: en suelos frágiles al humedecimiento rápido (DMA₁) este pretratamiento puede ser poco sensible, ya que es muy destructivo y el humedecimiento lento (DMA₃) puede ser un mejor indicador en suelos arcillosos.

2.6.1. Efecto de la historia de uso del suelo

El pretratamiento 3 no mostró un efecto significativo de la historia de uso del suelo. Esto era esperable considerando que sería gobernado principalmente por el contenido de arcillas (Le Bissonnais, 1996) atributo que no es modificado por el manejo. Así, diferencias intrínsecas entre sitios, generan variaciones en el DMA_3 más importantes que aquellas que pueden haber sido generadas por la historia de uso del suelo. Nuestros resultados, en cambio, no muestran una correlación significativa entre la cantidad de arcillas y el DMA_3 , indicando que otros factores afectarían esta propiedad. Se encontró un efecto de la textura al analizarla junto con otras propiedades (Cuadro 5), donde también se observa un efecto significativo del COS. Esto indica que al eliminar el efecto de la textura, el manejo si afectaría el DMA_3 . El hecho de no encontrar un efecto significativo de la historia en el conjunto de los datos puede atribuirse, en parte, a no contar con evaluaciones de ambas historias (R y CC) en todos los suelos. Al evaluar solo los sitios provenientes del experimento de largo plazo (1-8), donde un mismo suelo es sometido a secuencias contrastantes, todos los pretratamientos variaron en función de la secuencia de cultivos, indicando que este indicador si sería sensible a detectar diferencias entre sitios generadas por el uso del suelo.

Nuestros resultados permiten afirmar que la EA, determinada por los tres mecanismos evaluados, fue un indicador sensible para detectar el impacto del manejo en la calidad de suelos en Molisoles. Estos resultados contrastan con lo reportado por Gabioud, Wilson y Sasal (2012), quienes no encontraron diferencias en el DMA_m de Molisoles asociadas a distintas secuencias de cultivos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos autores comparan manejos con variación en el COS y posiblemente también otras propiedades físico-químicas responsables de la EA, lo cual explicaría las diferencias en los resultados.

Menores valores de EA fueron observados en los suelos bajo CC, ante todos los pretratamientos. Sin embargo, para los pretratamientos 1 y 3 estas diferencias no resultaron significativas respecto a 50-50B. Estos resultados no eran esperables ya que los sistemas de CC mostraron menores contenidos de COS que los que incluyeron pasturas. Si bien el número de muestras usado en este trabajo coincide con el generalmente usado en la literatura (Novelli et al., 2013; Gabioud, Wilson y Sasal, 2012), es posible que un mayor número de muestras

fueran necesarias para detectar efectos significativos de la historia ya que se observan diferencias importantes (al menos en el DMA₃) pero nuestro análisis no resultó suficientemente sensible para detectarlas.

Las leguminosas favorecerían menos la EA que las pasturas mezclas de gramíneas y leguminosas, ya que el DMA (determinado por diferentes pretratamientos) fue menor en 50% leg que en 50%; y no hubo diferencias o fue menor la EA en la secuencia 66% en relación a 50% (Cuadro 3). Esto último estaría influenciado por que durante los primeros 20 años de ensayo este tratamiento no estaba definido como una rotación 66%, sino como un sistema de AC. Una fuerte influencia de la especie vegetal sobre la EA ha sido reportada previamente por Demenois et al. (2018). Las pasturas de leguminosas han presentado a lo largo del experimento evaluado una menor producción de biomasa aérea en relación a aquellos con pasturas mixtas. La productividad ha sido asociada positivamente con la EA (Pellant et al., 2005), en especial la producción de raíces (Graf y Frey, 2013). Además de las diferencias en productividad de las pasturas, estas difieren en el tipo de sistema radicular y en la composición química de los residuos, factores determinantes de la EA (Bronick y Lal, 2005). En este sentido, ha sido reportado que la diversidad de especies puede promover la formación de agregados estables por presentar una matriz de raíces más densa que pasturas puras (Erktan et al., 2016). Por último, las leguminosas tienen una mayor velocidad de descomposición, por lo que los suelos tienen una menor cobertura en los periodos de barbecho, esto fue observado al momento de muestreo del suelo. Más estudios son necesarios para entender las causas de este comportamiento en nuestro trabajo.

2.6.2. Variables físico químicas del suelo y estabilidad de agregados

El pobre ajuste de las correlaciones entre las propiedades físico químicas del suelo y los diferentes indicadores de EA concuerda con lo manifestado por Six, Elliot y Paustian (2000) respecto a que el uso de correlaciones simples no permite observar la importancia de los diferentes factores sobre la EA ya que éstos están correlacionados entre sí.

Un mayor porcentaje de la variación se pudo explicar mediante regresiones múltiples (Cuadro 5). La disgregación mecánica del suelo (DMA₂) es el pretratamiento que muestra una mayor relación con las propiedades físico químicas del suelo, pudiéndose explicar un 60% de su

variabilidad mediante el uso de regresiones múltiples (Cuadro 5). Esto, sumado a que fue el único capaz de diferenciar la historia de CC respecto a las historias que rotan con pasturas de leguminosas indicaría que puede ser el mejor indicador para determinar el impacto del manejo en la EA en estos suelos.

El efecto contradictorio del contenido de arena del suelo sobre los diferentes pretratamientos de EA confirma que son controlados por diferentes procesos y/o propiedades del suelo. Este hecho, junto a la menor sensibilidad observada del DMA_m respecto a los indicadores individuales para detectar diferencias entre sitios, ponen en duda la utilidad del DMA_m como único indicador para la caracterización de la EA.

Se observó un efecto significativo del COS en todos los pretratamientos, el cual no podía ser observado mediante correlaciones simples. El COS aumentó la EA, lo cual puede deberse a su efecto sobre procesos directos e indirectos acorde a lo observado por Abiven, Menasseri y Chenu (2009). El COS es uno de los principales agentes cementantes del suelo (Peng et al., 2015; Zhao et al., 2017) existiendo evidencia de que altos contenidos de COS reducen el estallido de los agregados (Chenu, Le Bissonnais y Arrouays, 2000), así como también la ruptura por expansión diferencial (Wu et al., 2017). Su efecto preponderante en los suelos evaluados resulta coincidente con lo reportado por Novelli et al. (2013) para Molisoles, quien afirma que la disgregación mecánica es el pretratamiento que muestra mayor relación con el COS. El término cuadrático del COS fue significativo para el DMA_2 y DMA_3 , lo cual confirma la hipótesis de este trabajo. Esto indica que prácticas tendientes a aumentar el contenido de COS favorecerían la agregación del suelo y la estabilidad de dichos agregados. Sin embargo, estos aumentos son decrecientes, coincidiendo con lo reportado previamente por Le Bissonnais, et al. (2007). Ambos pretratamientos mostraron un comportamiento similar entre variaciones en el contenido de COS, observándose escasos aumentos en la EA por encima de los 25- $g\ kg^{-1}$ de COS. Este valor es superior al propuesto por Pilatti y Orellana (2000) el cual es de 17 $g\ kg^{-1}$ para Molisoles en Argentina y al reportado por Kemper y Koch (1966) para el oeste de Estados Unidos y Canada de 20 $g\ kg^{-1}$. El valor de COS fue también mayor al que presentarían los Molisoles de origen sedimentario en condiciones indisturbadas en el país, cuyo promedio es de 20,3 $g\ kg^{-1}$ (Beretta, 2014). Dada la relación tipo cuadrática ajustada se esperaría que valores muy altos de COS se asocien a disminuciones en la EA, lo cual no parece coherente, sino que

se esperaría un comportamiento de tipo cuadrático plus plateau. Solo dos de los suelos evaluados tuvieron valores de COS mayores a 27 g kg^{-1} , por lo que sería necesaria la evaluación de un mayor número de situaciones para confirmar la relación observada. El pretratamiento 1 mostró una menor variación asociada a los cambios en el contenido de COS, siendo su comportamiento de tipo lineal. Esto indicaría que, a diferencia de los otros pretratamientos, aumentos en el COS, incluso con valores de COS altos, favorecerían la EA ante la disgregación causada por el estallido de agregados.

Mayores contenidos de arena se asociaron con una mayor EA medida como DMA_3 , pero generó una menor EA ante los pretratamientos 1 y 2. Un efecto negativo de la arena en la EA ha sido reportado previamente por Idowu (2003), asociado a su menor superficie de contacto en comparación con la arcilla. La arcilla tiene un rol fundamental en la cementación del suelo, asociado a sus cargas negativas y a la formación de complejos órgano minerales con el COS (Le Bissonnais, 1996; Imhoff, Pires da Silva y Dexter, 2002). Sin embargo, arcillas de tipo expansivo aumentan la ruptura de agregados por expansión diferencial (Amézketa, 1999). Se observó que un mayor contenido de arena se relaciona con un menor contenido de arcilla y limo, lo cual puede explicar el comportamiento.

El Mg intercambiable aumentó la EA determinada por los pretratamientos 1 y 3. El Mg presentó una correlación significativa y negativa con el Na, indicando que en aquellos suelos donde los niveles de Mg son inferiores, el mismo es remplazado por Na en el complejo de intercambio. El mayor efecto floculante de los cationes polivalentes (Mg^{+2}) del suelo en relación a los monovalentes (Na) ha sido ampliamente reportado (Bronick y Lal, 2005; Igwe y Okebalama, 2006). Sin embargo, esto contradice algunos estudios donde se observan efectos negativos del Mg en la EA (Bronick y Lal, 2005). Los efectos negativos del Mg pueden darse cuando éste remplace al Ca en el complejo de intercambio, ya que su poder de floculación es menor que la de dicho catión; pero en los suelos aquí estudiados ambos cationes se correlacionaron positivamente. Los cationes polivalentes actúan junto con las arcillas o los compuestos órgano-minerales dando más cohesión a los agregados del suelo (Wuddivira y Camps-Roach, 2007). A pesar de esta correlación el uso de la suma de Ca+Mg no permitió una mejora en el ajuste del modelo.

Nuestros resultados confirman que en suelos donde el Na ocupa un bajo porcentaje de la CIC y donde el contenido de arcillas es poco variable, el COS juega un rol fundamental en la agregación del suelo. Pero, esta relación está afectada por el contenido de arena y los cationes de intercambio (Mg).

2.6.3. Variables físicas del suelo y estabilidad de agregados

La falta de relación entre la EA y la macroporosidad, podría deberse a que el tamaño de los agregados aquí evaluados (de 3 a 5 mm) tienen poco impacto sobre la formación de macroporos, dado su escaso tamaño. La formación de poros de diferentes tamaños depende de fuerzas diferentes, lo cual se explica por la jerarquía del proceso de agregación, donde las fuerzas varían en los diferentes niveles de agregación (Amézketa, 1999). La EA evaluada se relacionó con la meso y microporosidad del suelo, dada la relación negativa entre Dap y la DMA determinado por cada uno de los 3 pretratamientos; lo cual resulta coincidente con lo reportado por varios autores (Regelink et al., 2015; Hénin, Gras y Monnier, 1972). De esta forma, no existe una clara relación entre la EA y las propiedades físicas del suelo que controlan el movimiento del agua y aire. Sin embargo, es posible asociar la EA con el grado de compactación del suelo determinada mediante la Dap.

2.7. CONCLUSIONES

Al determinar la EA mediante los tres pretratamientos propuestos por Le Bissonnais (1996) es posible identificar diferencias entre suelos y entre historias de manejo. El pretratamiento 3, asociado a la disgregación por expansión diferencial de las arcillas, fue el pretratamiento más sensible a las diferencias entre sitios. Sin embargo, para identificar las diferencias generadas por el manejo del suelo, el más sensible fue el pretratamiento 2, asociado a la ruptura de agregados por disgregación mecánica. El uso del promedio entre los tres pretratamientos resulta menos sensible a las diferencias asociadas al sitio y la historia.

El aumento en el contenido de COS y Mg incrementan la EA determinada mediante diferentes pretratamientos. El aumento en el contenido de arena se relaciona negativamente con la EA ante los pretratamientos 1 y 2 pero positivamente ante el pretratamiento 3. Los resultados de este trabajo indicarían que es posible prevenir la degradación de la CFS mediante técnicas de

manejo que permitan aumentar los niveles de COS, ya que esto se asociaría a aumentos en la EA. Sin embargo, los aumentos serían mínimos por encima de 25 g kg⁻¹ de COS para los pretratamientos asociados a la disgregación mecánica del suelo y la expansión de las arcillas.

2.8. BIBLIOGRAFÍA

Abiven S., Menasseri S. y Chenu C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. *Soil Biology Biochemistry*, 41, 1–12.

Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151.

Asano, M. y Wagai, R. (2014). Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic Andisol. *Geoderma*, 216, 62–74.

Aziz, S. y Karim, S. (2016). The Effect of Some Soil Physical and Chemical Properties on Soil Aggregate Stability in Different Locations in Sulaimani and Halabja Governorate. *Open Journal of Soil Science*, 6, 81-88.

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management: a review. *Soil Use Management*, 25, 335–345.

Beretta, A. (2014). La clasificación uruguaya de suelos del 2007 cambia las inferencias de propiedades de Vertisoles y Brunosoles. *Agrociencia Uruguay*, 18, 105-112.

Beretta A., Bassahun D. y Musselli R. (2014). ¿Medir el pH del suelo en reposo o agitando la mezcla suelo:agua? *Agrociencia Uruguay*, 18 (2), 90- 94.

Beretta, A., Silbermann, A., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R. y García-Lamothe, A. (2014). Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria*, 41(2), 263-271.

Bezerra de Oliveira, L. (1968). Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em mostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuaria Brasil*, 3, 197-200.

Blake, G. y Hartge, K. (1986). Bulk Density. In: A Klute (Eds.), *Methods of soil Analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9*. (pp. 363-375). Madison, Wisconsin, EEUU: *American Society of Agronomy*.

Bronick C.J. y Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3–22.

Chenu, C., Le Bissonnais, Y. y Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1479–1486.

Demenois, J., Carriconde, F., Bonaventure, P., Maeght, J. L., Stokes, A. y Rey, F. (2018). Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. *Geoderma*, 312, 6–16.

Di Rienzo J., Casanoves F., Balzarini M., Gonzalez L., Tablada M. y Robledo C. (2017) InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Doran, J. y Parkin, T. (1994). Defining and assessing soil quality. En: Doran (Eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment Publ. 35*. (pp. 3–22). Madison, Wisconsin, EEUU: *SSSA and ASA*.

Erktan, A., Cécillon, L., Graf, F., Roumet, C., Legout, C. y Rey, F. (2016). Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil*, 398, 121–137.

Gabioud, E., Wilson, M. y Sasal, M. (2012). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de le bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia Del Suelo*, 5(3100), 129–139.

Graf, F. y Frei, M. (2013). Soil aggregate stability related to soil density, root length, and mycorrhiza using site-specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l. *Ecological Engineering*, 57, 314–323.

Hénin, S., Gras, R. y Monnier, G. (1972). El perfil cultural, el estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Madrid, España: Mundi Prensa.

Idowu O. (2003). Relationships between aggregate stability and selected soil properties in humid tropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, 695–708.

Igwe C. y Okebalama C. (2006). Soil strength of some Central Eastern Nigeria soils and effect of potassium and sodium on their dispersion. *International Agrophysics*, 20, 107–112.

Imhoff, S., Pires da Silva, A. y Dexter, A. (2002). Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1656–1661.

Jackson, M. (1964). Análisis químico de suelos. Barcelona: Omega.

Kasper, M., Buchan, G., Mentler, A. y Blum, W. (2009). Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. *Soil and tillage research*, 27, 1-8.

Kemper, W.D. y Koch, E. (1966). Aggregate Stability of Soils from Western United States and Canada. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, No 1355.

Le Bissonnais Y., Blavet D., De Noni G., Laurent J.Y., Asseline J. y Chenu C. (2007). Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *European Journal of Soil Science*, 58(1), 188–195.

Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.

Le Bissonnais, Y. y Singer, M. (1993). Seal formation, runoff and interrill erosion from seventeen California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 224–229.

Liu, X., Lee Burras, C., Kravchenko, Y.S., Duran, A., Huffman, T., Morras, H., Studdert, G., Zhang, X., Cruse, Yuan, X. (2012). Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management. *Canadian Journal of Soil Science*, 92, 383–402.

- Morón, A.** (2003). Principales contribuciones del experimento de rotaciones cultivos – pasturas de INIA La Estanzuela, en el área de fertilidad de suelos (1963- 2003). Simposio 40º años de rotaciones agrícola–ganaderas. *INIA Serie Técnica*, 134, 1-7.
- Novelli, L., Caviglia, O., Wilson, M. y Sasal, M.** (2013). Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195–196, 260–267.
- Pellant, M., Shaver, P., Pyke, D.A. y Herrick, J.** (2005). *Interpreting Indicators of Rangeland Health*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management Denver, Colorado, USA: National Science and Technology Center.
- Peng, X., Yan, X., Zhou, H., Zhang, Y.Z. y Sun, H.** (2015). Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an ultisol under long-term fertilization. *Soil and Tillage Research*, 146, 89–98.
- Pilatti, M.A. y Orellana J.A.** (2000). The ideal soil: II. Critical values of an “ideal soil,” for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *Journal of Sustainable Agriculture*, 17, 89-111.
- Regelink, I.C., Stoof, C., Rousseva, S., Weng, L., Lair, G.J., Kram, P., Nikolaidis, N.P., Kercheva, M., Banwart, S. y Comans, R.** (2015). Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*, 247–248, 24–37.
- RStudio Team** (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.
- Six, J., Elliott, E. y Paustian, K.** (2000). Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of Agronomy Journal*, 64, 1042–1049.
- Wright A.F. y Bailey J.** (2001). Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 3243 – 3258.

Wu, X., Wei, Y., Wang, J., Wang, D., She, L., Wang, J. y Cai, C. (2017). Effects of soil physicochemical properties on aggregate stability along a weathering gradient. *Catena*, 156, 205–215.

Wuddivira, M.N. y Camps-Roach G. (2007) Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. *European Journal of Soil Science*, 58, 722–727.

Xiao H, Liu G, Liu P, Zheng F, Zhang J, Hu F. (2017). Developing equations to explore relationships between aggregate stability and erodibility in Ultisols of subtropical China. *Catena*, 157(26), 279-285.

Zhao, J., Chen, S., Hu, R. y Li, Y. (2017). Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 167, 73–79.

3. CALIDAD FÍSICA DE SUELO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ: IMPACTO DEL PARAPOW COMO MEDIDA CORRECTIVA

Artículo a presentar en Agrociencia Uruguay

3.1. RESUMEN

La compactación del suelo tiene un efecto negativo en la productividad de los cultivos, que se podría corregir mediante el laboreo profundo con paraplow. Los objetivos de este trabajo son: cuantificar la relación entre la calidad física del suelo (CFS) y el rendimiento del cultivo de maíz; determinar el efecto del paraplow en el suelo, rendimiento, absorción de nutrientes y respuesta a la fertilización nitrogenada en el cultivo. Durante 2014-15 y 2015-16 se condujeron once ensayos, sobre un Argiudol típico de CFS contrastante debido a su historia de uso bajo siembra directa. Se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas, en la parcela principal se evaluó la descompactación (con vs sin paraplow previo a la siembra), en las subparcelas se aplicaron cuatro dosis de N (0, 60, 120 240 kg ha⁻¹). El rendimiento del maíz fue menor en los suelos más degradados, con mayor Dap. La descompactación mejoró la CFS, y alteró la dinámica de agua y N. Sin embargo la magnitud de los cambios fue moderada, variable entre ambientes y no se relacionó con la CFS inicial. El paraplow no afectó el rendimiento, ni la absorción de nutrientes por el cultivo. En este estudio no fue una herramienta efectiva para mejorar la productividad del suelo.

Palabras clave: Calidad física de suelos, descompactación, paraplow, maíz

Soil physical quality and corn yield: impacts of deep tillage

3.2. SUMMARY

Soil compaction may negatively affect crop growth and yield. A wide range of tillage implements has been developed to alleviate unfavorable soil conditions resulting in decreased crop productivity. The objectives of this work were: to evaluate the relationship between soil physical quality and corn yield; to assess the impacts of deep tillage (paraplow) on soil properties and the crop's performance, such as grain yield, nutrient uptake and response to fertilizer nitrogen. Eleven experiments were installed during 2014-15 y 2015-16, on typic Argiudolls with contrasting soil physical quality due to previous cropping history, under no till. A split plot design was used; the main plots consisted of two treatments (with and without paraplow) whereas the subplot treatments were four nitrogen rates (0, 60, 120 and 240 kg ha⁻¹). Our results confirm that paraplow improves soil physical quality, water and N dynamics. However, the magnitude of these changes was relatively small and variable. Crop yield and nutrient uptake was not modified by paraplow operation.

Keywords: Soil physical Quality; Deep tillage; corn yield

3.3. INTRODUCCIÓN

Los problemas de compactación del suelo han sido diagnosticados ampliamente en la región pampeana de América Latina (Álvarez et al., 2014). Su ocurrencia ha aumentado en las últimas décadas asociada a la intensificación agrícola, el tráfico de maquinaria de gran porte (Batey, 2009), los años de siembra directa (SD) (Tormena et al., 2002; Franzluebbbers, Schomberg y Endale, 2007) y a la reducción del contenido de carbono en el suelo (COS) (Nawaz y Bourri, 2013) en parte debidas a la falta de diversificación cultivos en la rotación (Álvarez et al., 2011). Aunque la compactación es considerada una de las principales limitantes en la productividad de los suelos (Batey, 2009), es difícil predecir sus efectos sobre los cultivos, debido a la complejidad de las interacciones entre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Logsdon y Karlen, 2004). Para disminuir la compactación de forma rápida se están difundiendo cada vez más, prácticas de laboreo profundo, como el uso de paraplow (Hamza y Anderson, 2005). Esta herramienta permitiría mejorar la calidad física del suelo (CFS) (Álvarez et al., 2009), contando con la ventaja de adaptarse a sistemas de SD, al no provocar la inversión del suelo (Smith, Aucana y Hilbert, 2002). Sin embargo, su efecto sobre los cultivos es variable y dependiente de la interacción entre el suelo y clima (Girardello et al., 2014), siendo poca la información de su uso en situaciones con varios años de SD y suelos degradados por la historia de uso.

La CFS puede tener efectos directos e indirectos sobre los cultivos. Estos últimos se asocian a una modificación en la dinámica y disponibilidad de agua y nutrientes para los cultivos (Glab y Gondek, 2014). En este sentido, la respuesta a la descompactación puede asociarse a una mejora en la captura de recursos (Sadras, O'Leary y Rogert, 2005). Aunque es previsible que al modificar la CFS mediante el uso de paraplow la absorción de nutrientes se modifique (Díaz-Zorita, 2000), la interacción entre la descompactación y a la respuesta a la fertilización no ha sido evaluada según nuestro conocimiento.

El maíz es uno de los cultivos más sensibles a la compactación (Amato y Ritchie, 2002) y su rendimiento en condiciones de secano es determinado por la disponibilidad de agua en primer lugar y de N en segundo lugar. Por tanto, se considera al maíz un buen indicador para evaluar el efecto del paraplow y evaluar su relación con la absorción de N.

La hipótesis principal de este trabajo es que el rendimiento del maíz es limitado por efectos directos e indirectos de la CFS, y por tanto la magnitud de respuesta a la descompactación depende no solo de los cambios generados en la CFS sino también de su interacción con la disponibilidad y absorción de agua y de N.

En un Argiudol típico, con diferente CFS generada por su historia de uso, se plantearon los objetivos de: evaluar la relación entre la CFS y el rendimiento del cultivo de maíz; determinar cambios en la CFS, disponibilidad de agua y de N debidos al uso de paraplow; cuantificar la respuesta del cultivo de maíz a dichos cambios; y estudiar la interacción entre el uso del paraplow y la respuesta a la fertilización N.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1. Sitios experimentales

Se trabajó en once experimentos instalados en la estación experimental de INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay (34°20 S, 57°41 W), cinco en 2014-2015 (1) y seis en 2015-2016 (2). El suelo se clasificó como Argiudol típico, perteneciente a la unidad Ecilda Paullier-Las Brujas (DSF, 1979; escala 1:1 M), con textura franco arcillo limosa y pendiente entre 2 y 3,5 %. La caracterización de los ambientes (año de evaluación e historia de uso) se presenta en el Cuadro 1. Los experimentos del uno al ocho se ubicaron dentro de cuatro tratamientos del experimento de largo plazo instalado en 1963, y descrito por Morón (2003), en los bloques dos (año 1) y tres (año 2). Los tratamientos evaluados variaron en la proporción de pasturas en la rotación, siendo: 66%: 33% del tiempo en cultivos 66% en pasturas mezcla de gramíneas y leguminosas; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pasturas puras de leguminosas; y AC: Agricultura continua. Los restantes ambientes (nueve al once) se ubican en chacras manejadas comercialmente. En los últimos 10 años su uso ha sido: 60%sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas; y ACforr: Agricultura continua forrajera.

Cuadro 1: Caracterización de los ambientes a la siembra del cultivo de maíz. Cada ambiente resulta un experimento

Ambiente	Secuencia	CIC (Cmol kg ⁻¹)	COS (%)	pH	P Bray I (mg kg ⁻¹)	K (Cmol kg ⁻¹)
66%_1	C/Tr-Tr-Sg-P3-M	20,03	2,67	5,71	14,30	1,10
66%_2	C/Tr-Tr-Sg-P3-M	21,10	2,57	5,50	15,97	0,77
50%_1	C/Sg-T/G-P3-M	19,03	2,58	5,73	10,17	0,86
50%_2	C/Sg-T/G-P3-M	22,77	2,56	5,50	16,67	0,74
50%leg_1	C/Sg-T/G-L3-M	19,77	2,58	5,39	17,00	0,70
50%leg_2	C/Sg-T/G-L3-M	21,00	2,47	5,33	26,77	0,49
AC_1	C/Sg-T/G-M	17,07	1,88	5,79	17,37	0,6
AC_2	C/Sg-T/G-M	18,23	1,52	5,77	21,7	0,55
60%Sem_1	P3- C-Tr2-Tr	20,33	2,5	5,49	16,03	0,75
60%Sem_2	P3- C-Tr2-Tr-M-Av	20,37	2,37	5,30	17,97	0,67
ACforr_2	T-Av/Sg-P3-Sud- Av/M	21,99	1,77	5,60	10,73	0,42
Media		20,15	2,32	5,56	16,79	0,70

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: Año 2014-2015; _2: año 2015-2016; C: Cebada; Sg: Sorgo; T:Trigo; M: Maíz; Tr: Trébol rojo; L3: tres años de leguminosas; P3: tres años de pastura mezcla de gramíneas y leguminosas; Av: Avena; Sud: sudangrass; CIC: Capacidad de intercambio catiónico; COS: % de carbono orgánico del suelo; PMN: potencial de mineralización de como NO₃ (ppm); Bray I: P Bray I en ppm; K intercambiable.

3.4.2. Diseño experimental

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. La parcela principal consistió en los tratamientos con (CP) y sin pasaje de paraplow (SP), previo a la siembra del cultivo. Las subparcelas se fertilizaron con diferentes cantidades de N (0, 60, 120 y 240 kg ha⁻¹). El N se aplicó como urea a razón de 30 kg ha⁻¹ N a la siembra y el

resto en el estado de desarrollo V6 (Ritchie y Hanway, 1982). Las subparcelas fueron de 12*10 m en los primeros ocho ambientes y de 12*20 m en los restantes.

3.4.3. Operaciones de campo

Se utilizó un parapló modelo "Howard" con tres púas separadas 50 cm entre sí; la velocidad de avance promedio fue de 4 km h⁻¹ y la profundidad de trabajo fue de 45 cm. La operación se realizó el 26 y el 8 de setiembre, en forma perpendicular a la máxima pendiente, con una humedad promedio del suelo (de 0 a 20 cm) de 26 y 22%, para las zafra 1 y 2 respectivamente. La siembra fue 45 y 56 días luego del pasaje de parapló, y perpendicular al mismo, en 1 y 2 respectivamente. La distancia entre hileras de siembra fue 70 cm y la población objetivo 85 mil plantas ha⁻¹. Se utilizó el cultivar DK190MGRR2 en la zafra 1 y SY 900 VIPTERA3 en la 2. El manejo de malezas, plagas y enfermedades se realizó acorde a las mejores prácticas agronómicas disponibles. La fertilización basal a la siembra consistió en la aplicación de 10,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (soluble en agua) y 30 kg ha⁻¹ de K₂O.

3.4.4. Determinaciones en suelo

3.4.4.1. Propiedades químicas

A la siembra se extrajo una muestra de suelo de cada parcela principal, compuesta por 15 submuestras, hasta una profundidad de 15 cm. Se analizó: Carbono orgánico (COS) (Wright y Bailey, 2001); pH al agua con una relación de suelo: agua de 1:2,5 (Beretta, Bassahum, y Musselli, 2014); N total (Wright y Bailey, 2001); Potencial de Mineralización de Nitrógeno (PMN) con incubación anaeróbica por 7 días (Bundy y Meisinger, 1994); nitratos (NO₃) (Gelderman y Beegle, 1998); y amonio (NH₄) (Rhine et al., 1998). En las parcelas SP se determinó además: textura (Beretta et al., 2014); contenido de bases intercambiables (Jackson, 1964); acidez titulable (Camargo et al., 1986).

3.4.4.2. Propiedades físicas

A la siembra se tomaron 4 muestras indisturbadas por parcela principal, en las profundidades de 0 a 7,5 cm y 7,5 a 15 cm, con tubos de PVC (altura de 5 cm, volumen de 100 cm³). Se saturaron con agua para ser llevadas a volumen de máxima expansión de las arcillas y luego equilibraron en una mesa a tensión de -6 kPa para la determinar macroporosidad (MP)

(Bezerra de Oliveira, 1968). Luego se secaron a 105 °C para calcular la Dap (Blake y Hartge, 1986). La resistencia a la penetración (RP) fue determinada a la siembra, y en los estados fenológicos de V6, floración y madurez fisiológica (Ritchie y Hanway, 1982) mediante un Penetrologer Eijkelkamp (www.Eijkelkamp.com) de área de cono de 1 cm² y ángulo de 30°, se realizaron cuatro determinaciones por sub-parcela de 0 a 80 cm.

3.4.4.3. Contenido de agua

En cada parcela principal se determinó el contenido de agua en mm a la siembra, en una muestra compuesta por cuatro submuestras tomadas con taladro tipo holandés, de 0 a 15, 15 a 30 y 30 a 45 cm de profundidad. A partir de los 28 y 37 días posteriores a la siembra (zafras 1 y 2 respectivamente) se realizaron mediciones semanales, en los ambientes del uno al ocho, en las subparcelas 0 y 120 kg de N del contenido de agua volumétrico (θ v/v), utilizando la Dap determinada de 0-15 cm. En los primeros 20 cm se determinó en cuatro muestras compuestas. Para mediciones a profundidades mayores, 20-40, 40-60, 60-80 y 80- 100 cm, se utilizó una sonda de neutrones, considerando una Dap de 1,36 para el estrato de 20-80 cm y de 1,39 de 80-100 cm (datos basados en determinaciones realizadas en 2009 en el experimento por Quincke et al., sin publicar). La última determinación se realizó a los 83 y 140 días posteriores a la siembra de las zafras 1 y 2 respectivamente. Para la calibración de la técnica se realizaron además determinaciones del θ v/v, siguiendo la metodología utilizada a la siembra, en 4 momentos.

3.4.5. Determinaciones en el cultivo

Con base a la cosecha mecánica de las cuatro hileras centrales de cada subparcela se calculó el rendimiento (humedad de grano de 13 %). En cuatro submuestras se determinaron componentes (número de plantas, choclos por planta, hileras por choclo y peso de 1000 granos); y absorción de N, P y K en grano y planta.

3.4.6. Análisis estadístico

3.4.6.1. Comparación de la CFS entre sitios, efectos de ésta en el rendimiento

La CFS entre sitios se comparó mediante un análisis de varianza (ANOVA), considerando a los ambientes como efecto fijo, bloques aleatorios. Se evaluó la homogeneidad de varianzas

y consideró heterocedasticidad entre ambientes (tipo varident). Se realizaron correlaciones de Pearson entre los indicadores de CFS y los rendimientos expresados en forma relativa (RR) para las parcelas principales SP. Se evaluaron los rendimientos máximos de cada ambiente (dosis de N que permite el máximo rendimiento) en relación al máximo del año (RR). Los factores determinantes del RR se analizaron además mediante modelos mixtos, estos incluyeron como covariables propiedades físicas y químicas del suelo, independientes entre sí (correlaciones con $p\text{-valor} < 0,1$), se incluyó, además, la materia seca de las pasturas (mezcla de gramíneas y leguminosas) al inicio del barbecho.

3.4.6.2. Efecto de los tratamientos

El efecto del paraplow sobre las variables de suelo se evaluó para cada ambiente, y profundidad considerando los bloques aleatorios y al tratamiento como fijo. Para evaluar los efectos en planta y el efecto de la fertilización se consideró un diseño de parcelas divididas. Las medidas repetidas en el tiempo se evaluaron considerando errores correlacionados (autorregresivos de orden uno) para medidas tomadas en una misma parcela. En el caso de la RP, adicionalmente, se incluyó al θ v/v como covariable. Para el análisis conjunto de los ambientes, se utilizaron los mismos modelos seleccionados para el análisis por sitio, incluyendo al ambiente como aleatorio, anidando los bloques y tratamientos dentro de éste. Existió heterocedasticidad de variancias entre ambientes, la cual se consideró (tipo varident). En todos los casos las medias se compararon por LSD de Fisher ($\alpha = 0,1$). Se utilizó el software estadístico InfoStat/P (Di Rienzo et al., 2017) y su interfaz con el modelo Rstudio (2015).

3.5. RESULTADOS

3.5.1. Caracterización climática

La precipitación acumulada entre el pasaje del paraplow y la siembra fue 463 mm en el año 1 y 117 mm en el año 2. Durante el ciclo del cultivo ésta fue 474 mm en 1 y 434 mm en 2, en tanto que en el período crítico de definición de rendimiento, 15 días previos y 15 posteriores a la floración (Uhart y Andrade, 1995), alcanzó los 150 y 53 mm para 1 y 2 respectivamente.

3.5.2. Caracterización de los sitios experimentales

Los ambientes presentaron diferencias en la Dap y MP promedio de 0 a 15 cm, así como en la RP de 0 a 40 cm. Los valores de estos indicadores por ambiente se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Densidad aparente (Dap), Macroporosidad (MP) y Resistencia a la penetración (RP) por ambiente a la siembra del cultivo

Ambiente	Dap (g cm ⁻³)		MP (%)		RP (kPa) 0-40 cm
	0-7,5 cm	7,5-15 cm	0-7,5 cm	7,5-15 cm	
66%_1	1,21AB	1,26AB	4,73AB	3,47 ^a	795D
66%_2	1,23ABC	1,29ABC	6,03BC	5,56BC	913C
50%_1	1,24ABC	1,28ABC	5,87B	5,93BC	827D
50%_2	1,26BC	1,25 ^a	3,59A	4,76AB	1281B
50%leg_1	1,20 ^a	1,27AB	5,73B	5,57BC	1331B
50%leg_2	1,28CD	1,31BC	4,95AB	4,7AB	1661 ^a
AC_1	1,33D	1,42D	6,1BC	5,00B	1393B
AC_2	1,45E	1,49E	4,44AB	4,79AB	1540 ^a
60%Sem_1	1,27C	1,32C	7,7C	7,51D	878CD
60%Sem_2	1,23ABC	1,3ABC	5,46B	6,91CD	993C
ACforr_2	1,33D	1,47DE	5,33AB	4,85AB	1395AB
Media	1,275	1,334	5,448	5,369	1182
p-valor	<0,0001	<0,0002	0,0736	0,0107	<0,0001
DMS	0,052	0,046	1,783	1,499	152

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: Año 2014-2015; _2: año 2015-2016; DMS: diferencia mínima significativa; Letras diferentes dentro de la columna identifican diferencias significativas (p-valor<0,1).

3.5.3. Impacto del parapló en el suelo

3.5.3.1. Calidad física

El parapló, en promedio, generó un aumento en la Dap en el estrato de 0 a 7,5 cm del 2,2% (p-valor= 0,0002), efecto que resultó significativo en 3 de los ambientes estudiados (Figura 1). En el estrato de 7,5 a 15 cm en cambio el tratamiento disminuyó la Dap un 5,3% (p-valor< 0,0001), efecto que fue significativo para 5 de los ambientes. El efecto del tratamiento en la

MP, para el conjunto de los ambientes, fue significativo a ambos estratos (p-valor= 0,0019 para 0-7,5cm y 0,0043 para 7,5-15cm), generando en ambos un aumento de similar magnitud, 8%. Este, fue significativo solo en un ambiente en el estrato superficial y en dos en el subsuperficial, existiendo un efecto negativo en el ambiente de AC_2 de 7,5-15 cm. Los efectos para ambas variables por ambiente y estrato se presentan en la Figura 1.

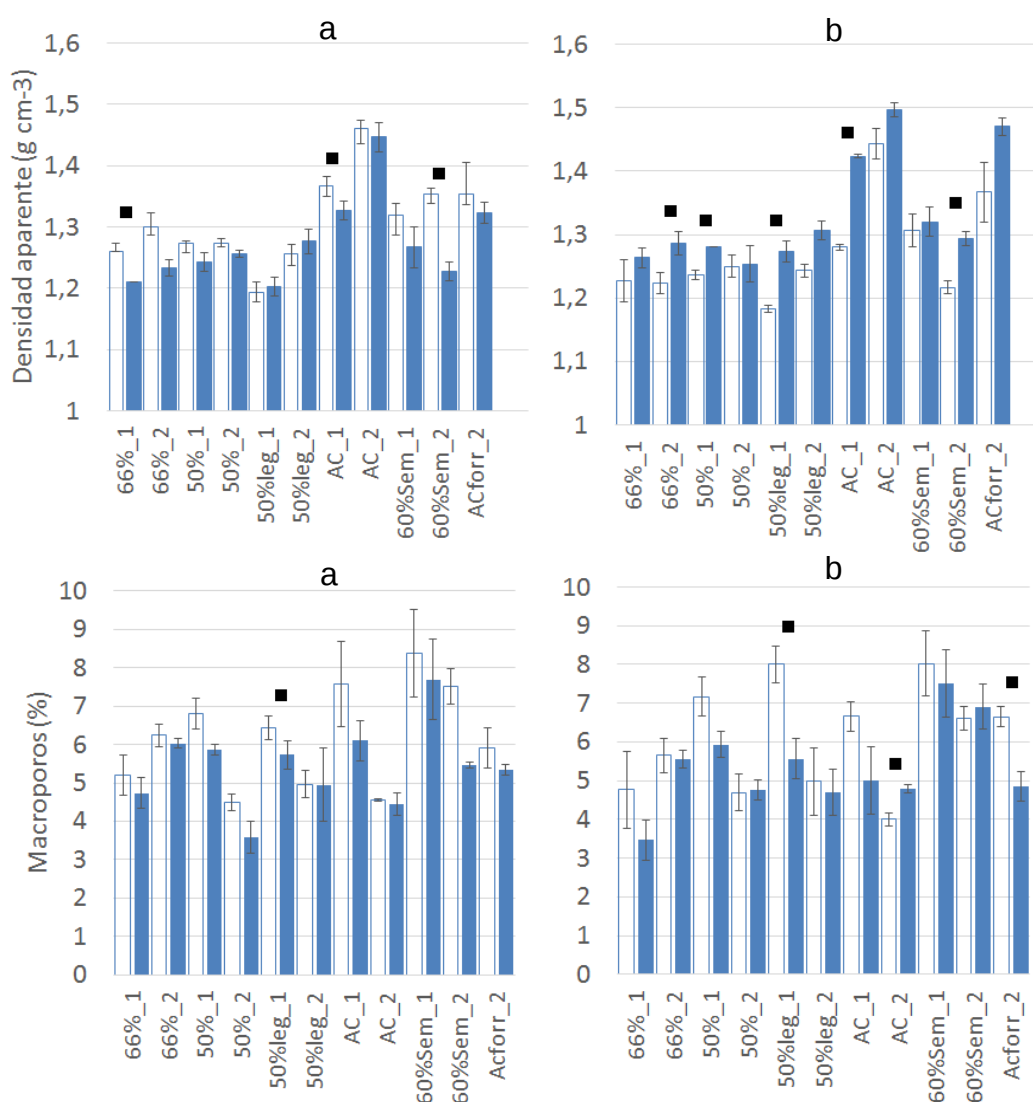


Figura 1: Efecto del paraplow en la Densidad aparente (g cm⁻³) y Macroporosidad (%), a la siembra a la siembra, para los estratos de 0 a 7,5 cm (a) y de 7,5 a 15 cm (b), por ambiente.

Columnas coloreadas: sin paraplow, columnas vacías: con paraplow; 66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura

continua forrajera; _1: Año 2014-2015; _2: año 2015-2016; ■: diferencias significativas entre tratamientos (p-valor< 0,1)

3.5.3.2. Resistencia a la penetración

A la siembra del cultivo el paraplow redujo la RP (p-valor< 0,0001) para el conjunto de los ambientes un 28,2% para el estrato de 0-40 cm. Este efecto fue significativo en seis de los ambientes de 0-20 cm y en todos ellos de 20- 40 cm (Figura 2).

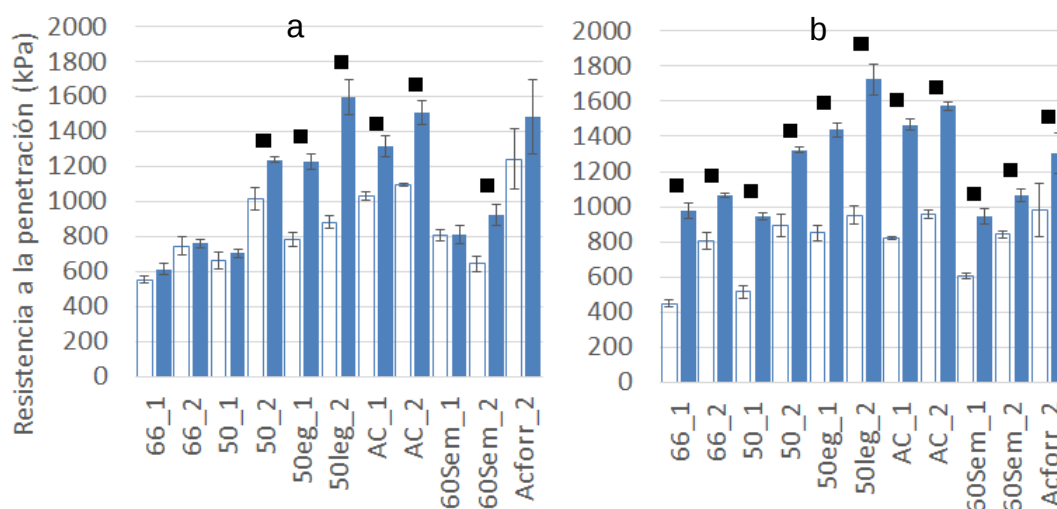


Figura 2: Efecto del paraplow en la resistencia a la penetración (kPa) a la siembra, de 0 a 20 cm (a) y de 20-40 cm (b), por ambiente.

Columnas coloreadas: sin paraplow, columnas vacías: con paraplow; 66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: Año 2014-2015; _2: año 2015-2016; ■: diferencias significativas entre tratamientos (p-valor< 0,1)

En las determinaciones de RP realizadas luego de la siembra, en V6, floración y madurez fisiológica, se observa que en promedio (para ambientes y momentos) el paraplow redujo la RP en 82 kPa de 0-20 cm (p-valor= 0,0612), pero no generó diferencias a mayores profundidades al considerar el θ v/v como covariable. La RP estuvo condicionada por el momento de determinación, asociado a las variaciones de humedad, pero en el conjunto de

determinaciones postsiembra no se observó una interacción entre la descompactación y el momento de determinación cuando estas variaciones son consideradas.

3.5.3.3. Contenido de agua

El paraplow, en el promedio de los ambientes, aumentó el contenido de agua 4,1 mm de 0 a 45 cm (p-valor= 0,046), pero este efecto varió entre ambientes (p-valor de la interacción= 0,0171). Los efectos por ambientes se presentan en el Cuadro 3, el tratamiento aumentó el contenido de agua en tres de ellos, lo redujo en uno y no generó cambios significativos en los restantes.

Cuadro 3: Contenido de agua acumulada en el suelo, de 0 a 45 cm (mm), por ambiente a la siembra.

	Ambiente										
	66%_1	66%_2	50%_1	50%_2	50%leg_1	50%leg_2	AC_1	AC_2	60%Sem_1	60%Sem_2	ACforr_2
CP	91,3A	81,3	83,7A	75	76,4A	65,3B	70,3	65,3	88,2	77	64,57
SP	84,7B	79,3	79,9B	72	72,2B	70,3A	65,6	64,6	81,9	74,7	65,77
p-valor	0,056	0,51	0,075	0,355	0,008	0,082	0,126	0,929	0,142	0,397	0,77
DMS	4,7	7,3	3,2	7,3	1,14	4,46	5,4	19,5	7,78	6,38	10,5

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: Año 2014-2015; _2: año 2015-2016; DMS: diferencia mínima significativa; Letras diferentes dentro de la columna identifican diferencias significativas (p-valor <0,1).

El θ v/v post siembra, para el conjunto de los ambientes, varió según el momento de determinación (p-valor <0,0001) en todos los estratos. En promedio de los ambientes el paraplow disminuyó esta variable (p-valor= 0,0036) unos 2 mm de 0-20 cm, pero no generó cambios a mayor profundidad. La dosis de N no afectó el θ v/v en los primeros 40 cm. En estratos inferiores hubo más θ v/v en el testigo que el tratamiento 120N (40 a 60 cm p-valor=

0,0007; 60 a 80 cm p-valor= 0,0034; y 80 a 100 cm p-valor= 0,0904). No hubo interacción entre los tratamientos o entre éstos y el momento de determinación. La evolución del θ v/v promedio por año y tratamientos se muestra en la Figura 3.

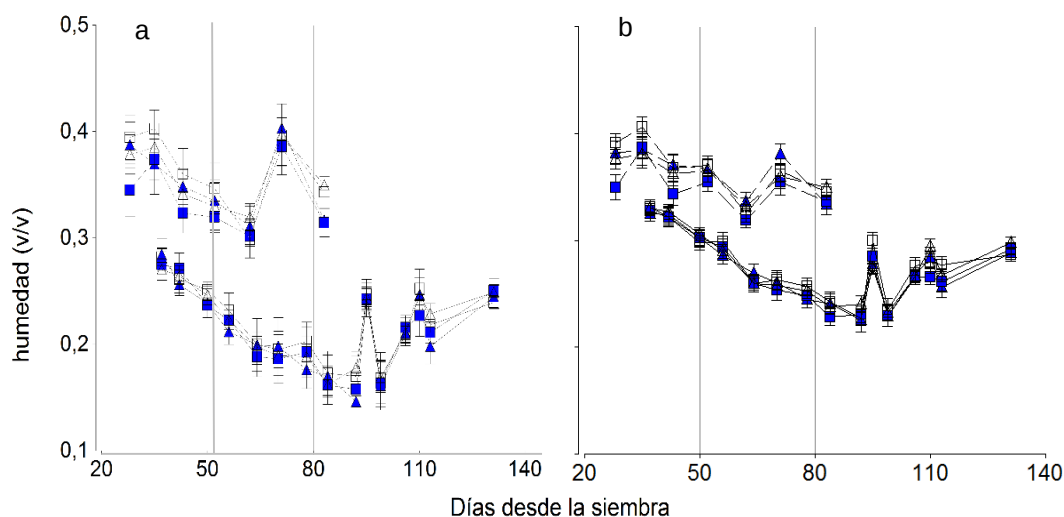


Figura 3: Contenido de agua (θ v/v) en función de los días desde la siembra, particionado por año y tratamiento, a) Estrato de 0-20 cm, b) Estrato de 0-100 cm

Líneas punteadas: zafra 2014-2015, líneas enteras: Zafra 2015-2016. Los símbolos llenos: con paraplow, símbolos vacíos: sin paraplow. Cuadrados: 120 kg ha⁻¹ de N, triángulos: 0 kg ha⁻¹ de N. Líneas verticales representan el inicio y fin del período crítico.

3.5.3.4. Nitrógeno en suelo

El paraplow aumentó el PMN para el conjunto de los ambientes de 12,5 mg kg⁻¹ a 20 mg kg⁻¹ (p-valor= 0,0603), sin embargo, el efecto difirió entre ambientes (p-valor de la interacción= 0,0139). El Cuadro 4 muestra el efecto del paraplow por ambiente.

Cuadro 4: a) Potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) y b) N inorgánico para los tratamientos con (CP) y sin paraplow (SP), de 0 a 15 cm a la siembra del cultivo por ambiente.

	Ambiente										
	66%_1	66%_2	50%_1	50%_2	50%leg_1	50%leg_2	AC_1	AC_2	60%Sem_1	60%Sem_2	ACforr_2
a	PMN (mg kg ⁻¹)										
CP	62,11	13,67	44,33	17,67	12,33	12,33	8,67A	7,02A	9,33	18	16,12A
SP	15,03	35,33	15,33	14,33	7,06	10,67	4,33B	3,33B	13,23	12,1	7,02B
p-valor	0,307	0,218	0,216	0,346	0,214	0,56	0,083	0,053	0,327	0,31	0,035
DMS	101	35,6	44	8	8,6	7,2	3,9	2,6	8,3	13,2	5,1
b	N inorgánico (NO ₃ +NH ₄) mg kg ⁻¹										
CP	15,4	22,7A	12,6	20	18,8	21,4	11	17,6A	15,5	16,1	13,9
SP	6,9	19,4B	13,1	20,5	12,6	16,7	10,1	16,6B	18	14,1	14,5
p-valor	0,148	0,07	0,919	0,601	0,467	0,23	0,55	0,037	0,26	0,385	0,795
DMS	10,7	2,8	12,7	2,5	20,2	8,2	3,9	0,5	4,7	5,2	6,6

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: zafra 2014-2015; _2: zafra 2015-2016; DMS: diferencia mínima significativa; Letras diferentes dentro de columna identifican diferencias significativas (p-valor <0,1).

El tratamiento de paraplow no generó cambios en el N mineral en el conjunto de los ambientes a la siembra para ninguno de los estratos evaluados (p-valor= 0,147, 0,223 y 0,180 para 0-15, 15-30 y 30-45 cm). Su efecto varió entre ambientes para los primeros dos estratos evaluados, pero no para el último (p-valor de la interacción= 0,004; 0,048 y 0,64 para los estratos 1, 2 y 3 respectivamente). El efecto del tratamiento para el primer estrato, donde se observaron los mayores cambios, se presenta para cada ambiente en el Cuadro 4.

3.5.4. Performance del cultivo

El rendimiento en grano fue en promedio de 10,84 Mg ha⁻¹ en la zafra 1 y de 6,14 Mg ha⁻¹ en la 2. Existieron diferencias en rendimiento entre ambientes (p-valor <0,0001), las cuales fueron condicionadas por la dosis de fertilizante (p-valor de la interacción <0,0001), pero no por el tratamiento de paraplow (p-valor interacción 0,5067).

El paraplow no afectó los rendimientos ($p\text{-valor}=0,2958$), ni sus componentes en el conjunto de los ambientes (Cuadro 5). Únicamente en 60%sem_2 se observó un efecto del tratamiento, que aumentó el número de plantas un 15% ($p\text{-valor}=0,0983$), pero disminuyó el número de mazorcas un 29% ($p\text{-valor}=0,0088$) y no afectó el rendimiento.

No se observaron diferencias debidas al tratamiento de paraplow en materia seca en V6 ($p\text{-valor}= 0,588$), floración ($p\text{-valor}= 0,752$) ni madurez fisiológica ($p\text{-valor}= 0,585$) en el conjunto de los ambientes, ni tampoco en el análisis por ambiente.

El efecto de la fertilización de N varió entre ambientes ($p\text{-valor}<0,001$). En el año 1 la respuesta fue significativa en todos, a excepción de 50%leg. En el año 2, el N solo incrementó el rendimiento en AC y 60%sem. La interacción entre el paraplow y la dosis de N no afectó el rendimiento, ni la producción de materia seca en ningún momento evaluado, para ninguno de los ambientes.

Cuadro 5: a) Rendimiento de Maíz y b) Absorción de N, por ambiente para los tratamientos con (CP) y sin paraplow (SP) y las dosis de N de 0 kg ha⁻¹ (0), 60 kg ha⁻¹ (60), 120 kg ha⁻¹ (120) y 240 kg ha⁻¹ (240)

	Ambiente										
	66%_1	66%_2	50%_1	50%_2	50%leg_1	50%leg_2	AC_1	AC_2	60%Sem_1	60%Sem_2	ACforr_2
Tratamiento	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)										
CP	7,11DE	4,76G	7,41D	6,55EF	11,86A	8,88C	7,76D	6,10F	10,22B	7,76D	4,51G
SP	7,39EF	4,78H	7,46DEF	6,69F	12,28A	8,26CD	8,05CD	5,84G	10,26B	8,64C	4,06H
p-valor	0,571	0,859	0,901	0,865	0,363	0,362	0,623	0,480	0,899	0,195	0,438
DMS	1,22	0,23	0,337	2,02	1,01	1,55	1,20	0,88	1,01	1,34	1,36
Dosis											
240	8,55aC	4,55E	9,2aB	6,8D	12,1A	9,2BC	10,2aB	6,55aD	12,17aA	9,2aBC	4,20E
120	8,29aC	4,76F	8,0bC	6,5D	12,4A	8,3C	9,4aA	6,26aD	11,83aA	8,0bC	5,12F
60	7,32bCD	5,05F	7,2cD	6,9DE	11,9A	8,4BC	7,39bCD	6,19aE	10,04bB	8,2abBCD	4,27F
0	4,83cE	4,73E	5,3dDE	6,3CD	11,8A	8,3B	5,13cDE	4,89bE	6,93cC	7,3bBC	3,55F
p-valor	<0,001	0,761	<0,001	0,602	0,544	0,260	<0,001	0,0054	<0,001	0,081	0,141
DMS	0,75	0,83	0,60	1,23	0,83	0,85	0,79	0,70	0,95	1,13	1,09
Tratamiento	Absorción total de N (kg ha ⁻¹)										
CP	118G	182 DE	139F	201 D	228 C	248 B	133 F	170 E	190 DE	300 A	191 D
SP	129E	180 D	139 E	208 C	246 B	247 B	131 E	173 D	187 CD	285 A	180 D
p-valor	0,249	0,8	0,594	0,487	0,124	0,278	0,959	0,804	0,894	0,521	0,445
DMS	20	19	29	19	15	17	32	26	59	42	24
Dosis											
240	155aE	210aCD	200aD	217CD	250aBC	272aB	174aDE	212bCD	246aB	374aA	186D
120	144aE	186abCD	146bDE	207C	245aB	247abB	156aDE	169bCD	216abBC	287bA	195C
60	110bE	172bcD	102cE	200C	236abB	251bAB	109bE	168bD	174cbCD	273bA	192CD
0	85cF	157cC	89cF	193B	216Ba	237bA	83bF	138cD	117cE	238bA	168C
p-valor	<0,001	0,007	<0,001	0,329	0,023	0,046	0,003	<0,001	0,003	0,002	0,35
DMS	14	27	42	28	22	24	45	24	47	60	34

66%: 66% pasturas mezcla; 50%: 50% pasturas mezcla; 50%leg: 50% pastura de leguminosas; AC: Agricultura continua; 60%Sem: 60% pasturas mezcla para producción de semillas, ACforr: agricultura continua forrajera; _1: zafra 2014-2015; _2: zafra 2015-2016; DMS: diferencia mínima significativa. Letras minúsculas diferentes dentro de las columnas identifican grupos diferentes (p-valor=0,1) debidos a los tratamientos. Letras mayúsculas diferentes entre columnas identifican grupos diferentes (p-valor=0,1) debidos al ambiente.

3.5.4.1. Absorción de nutrientes

La absorción de N promedio entre ambientes y tratamientos fue de 188 kg ha⁻¹. Los resultados por ambiente y tratamiento se muestran en el Cuadro 5. La misma fue determinada por la fertilización N (p-valor <0,001), por el ambiente (p-valor <0,001), y por la interacción entre este último con el tratamiento de fertilización (p-valor <0,001). El paraplow no afectó la absorción de N (p-valor= 0,143), aunque hubo una tendencia a aumentarla, que no se verificó ni en el P (p-valor=0,456) ni en el K (p-valor= 0,530), en el conjunto de los ambientes. La fertilización con N aumentó la absorción de todos los nutrientes evaluados (p-valor 0,015 para P y <0,001 para K). La interacción entre los tratamientos no afectó la absorción de N (p-valor = 0,536), ni K (p-valor= 0,717), pero sí la de P (p-valor= 0,024). Se observaron mayores absorciones de P con la dosis de 240 kg ha⁻¹ de N en el tratamiento CP respecto a SP, los demás tratamientos no se diferenciaron entre sí. La interacción entre los tratamientos no fue significativa para ningún ambiente ni nutriente.

3.5.4.2. Calidad física del suelo y rendimiento del cultivo

Los RR se correlacionaron negativamente con la Dap de ambos estratos evaluados y positivamente con la MP del estrato inferior (Cuadro 6). La mayor correlación se observa con la Dap (7,5-15 cm) explicando un 11% de la variabilidad de los RR.

Cuadro 6: Coeficientes de correlación entre los rendimientos relativos máximos y la calidad física del suelo.

	RR
MP 0-7,5cm	NS
MP 7,5-15cm	0,31*
Dap 0-7,5	-0,31*
Dap 7,5-15	-0,33*
RP 0-20cm	NS
RP 0-40cm	NS

RR: rendimiento máximo de cada ambiente relativos al máximo del año (sin paraplow); MP: Macroporosidad (%); Dap: Densidad aparente (g.cm-3); RP: resistencia a la penetración (kPa); NS: Correlación no significativa; *: correlación significativa p-valor< 0,1.

Mediante modelos mixtos multivariados se explicó un 38% de la variabilidad de los RR, las variables independientes que permitieron el mejor ajuste fueron Dap, P Bray I y la materia seca de pastura al inicio del barbecho (Cuadro 7).

Cuadro 7: Coeficientes de modelo explicativo de rendimiento relativo máximo de Maíz.

	Valor	p-valor
(Intercepto)	158	<0,0001
Bray,I (ppm)_ 0-15 cm	0,43	0,0001
Dap (g/cm3)_7,5-15 cm	-69,58	<0,0001
MS último corte de pastura	-0,0024	<0,0001

MS: Materia seca; Bray,I: fósforo en suelo; Dap: densidad aparente

3.6. DISCUSIÓN

La estrategia de selección de ambientes, en función de su historia de uso permitió captar una amplia variación en los indicadores de CFS (Cuadro 2). Los ambientes más restrictivos en cuanto a la Dap fueron aquellos bajo AC, en cambio los ambientes con pasturas presentaron menores valores de Dap.

El efecto del paraplow en la CFS, a la siembra del cultivo, fue variable entre ambientes. Estas diferencias en comportamiento no se asociaron con su CFS inicial, y no fueron mayores en los ambientes más restrictivos, coincidiendo con lo reportado por Álvarez et al. (2009). El paraplow mostró un efecto negativo en el estrato superficial, aumentando la Dap (Figura 1). Si bien ha sido reportado que su uso puede dejar el suelo susceptible a la recompactación, evidencias de un efecto negativo en tan corto plazo no han sido reportadas, según nuestro conocimiento. Es probable que las altas precipitaciones ocurridas entre la aplicación del tratamiento y la siembra del cultivo (463 y 117 mm en la primer y segunda zafra respectivamente), sumada al tráfico de dicha operación, determinaran estos resultados. La

velocidad de recompactación depende del manejo posterior del tránsito (Botta et al., 2006), y ha sido propuesta la necesidad de no transitar el suelo luego de la operación por períodos más o menos prolongados, incluso quizás mayores a los utilizados en este estudio (Botta et al., 2006). En el estrato subsuperficial, en cambio, el efecto del paraplow fue positivo, aunque de baja magnitud en promedio (Figura 1). La Dap se redujo en seis de los ambientes, pero de éstos solo uno mostraba un valor inicial mayor a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (AC_1) el cual podría considerarse restrictivo (Pilatti, Imhoff y Orellana, 2008). En este caso, la Dap (7,5-15) se redujo de $1,43 \text{ SP}$ a $1,28 \text{ g cm}^{-3} \text{ CP}$, valor que se encuentra en torno a los observados en los ambientes con pasturas. El efecto del tratamiento en la MP, aunque positivo para el conjunto de los ambientes, fue variable y de escasa magnitud. Incluso resultó negativo para uno de los ambientes (7,5-15 cm). La RP fue la variable en la cual se observaron mayores cambios debidos al uso del paraplow (promedio 28% de 0a 40 cm), siendo máximos los efectos del tratamiento en el estrato de 20-40 cm. Esto indicaría que posiblemente en este estrato, podrían observarse mayores cambios en Dap y MP a los observados de 0 a 15 cm. Los cambios observados en este estudio en la RP, Dap y MP son similares a los reportados por Álvarez, et al. (2009) y Gonçalves, et al. (2017), a igual profundidad de muestreo.

El efecto positivo del paraplow sobre la RP, cuantificado a la siembra del maíz, tuvo corta perdurabilidad, no detectándose diferencias significativas por debajo de los 20 cm a partir de V6. Esto se alinea con el efecto negativo observado en la Dap superficial a la siembra e indica una rápida recompactación del suelo. El carácter argilúvico del suelo, por debajo de los primeros 20 cm, favorecería este proceso asociado al mayor contenido de arcillas (Busscher, Bauer y Frederick, 2002) y la presencia de arcillas de tipo expansivo (2:1) (Borchert, 1981 citado por Schneider et al., 2017).

3.6.1. Relación entre la CFS y el rendimiento de maíz sin paraplow

El rendimiento promedio del cultivo fue mayor en el año 1, asociado a un contenido hídrico más favorable, respecto al 2 (Figura 3). La respuesta al agregado de N fue condicionada por el año, resultando menor en el año con mayores limitantes hídricas en el periodo crítico del cultivo (Figura 3). Independientemente del año y la fertilización, se encontraron diferencias en rendimiento entre ambientes, en parte debido a la CFS. Al eliminar los efectos del año y la dosis de N, analizando los RR, existió una correlación positiva con la MP, y negativa con Dap.

Contrario a lo reportado por Nevens y Reheul (2003), el efecto de la CFS no puede atribuirse, al menos totalmente, a un efecto indirecto sobre la disponibilidad de N, ya que el agregado de hasta 240 kg ha⁻¹ no compensó la pérdida asociada a la CFS. Por tanto, como lo discute Díaz-Zorita (2000) la pérdida de CFS, cuantificada como aumento de la Dap, estaría condicionando la respuesta a la fertilización N.

La existencia de menores rendimientos en ambientes con mayor Dap y menor MP, ha sido reportada por varios autores (ej: Ishaq, Ibrahim y Lal, 2003; Ahmad, Hassan y Belford, 2009) principalmente si éstos se encuentran fuera de los rangos reportados como óptimos. En este sentido, todos los ambientes bajo AC superaron la Dap 1,35 g cm⁻³ relacionada, para el suelo en estudio, a un intervalo hídrico óptimo bajo (Gama y Rubio, 2012), el cual limitaría el crecimiento de los cultivos (Pilatti, Imhoff y Orellana, 2008). La MP es limitante cuando es inferior al 5% (Bezerra de Oliveira, 1968), valor superior al observado en los ambientes de 66%_1, 50%_2, 50%leg_2, AC_2 y ACfor_2; pero tuvo una menor incidencia en los RR que la Dap. La RP no se relacionó con los RR, lo cual puede deberse a su continua variación en función del θ v/v del suelo, y a que en ninguno de los ambientes es superado el valor de 2000 kPa a partir del cual comenzaría a ser limitante según Taylor, Roberson y Parker (1966).

La variable con mayor correlación con el RR fue la Dap (7,5 a 15 cm), pero explicó sólo un 11% de su variabilidad. El bajo RR de los ambientes con un 66% y 50% de pasturas en su rotación se explicaría por un efecto adicional no relacionado a la CFS. Del análisis multivariado de los RR (Cuadro 7) se desprende que la cantidad de residuos de la pastura mezcla (de gramíneas y leguminosas) al inicio del barbecho tuvo un efecto negativo sobre el cultivo. Este efecto ha sido cuantificado en otros trabajos, asociándolo a efecto alelopático de la festuca (*Festuca arundinacea*) (Walters y Gilmore, 1976) especie dominante de las historias 66% y 50%. Por tanto, resultó en una condicionante del RR a pesar de generar una CFS buena. La disponibilidad de P también limitó el RR, a pesar de haber fertilizado con este nutriente. La inclusión de estas variables no físicas en el modelo mejoró la predicción de los RR, pasando a explicar del 11 a 38% de su variabilidad, pero las diferencias entre ambientes no lograron explicarse de la manera esperada por las variables evaluadas en este estudio. Sin embargo, es esperable que las relaciones entre la CFS y el rendimiento sean menores a las logradas en trabajos donde ésta es modificada artificialmente, mediante el tráfico de

maquinaria (Ahmad, Hassan, y Belford, 2009; Gła̧b y Gondek, 2014; entre otros), sin afectar al resto de las variables del suelo (Díaz-Zorita, 2000). Nuestros resultados resultan de variaciones en la CFS generadas por su historia de manejo, representando mejor la degradación observada a nivel de chacras, donde el deterioro de la CFS interacciona con un deterioro en las propiedades químicas y biológicas. Por tanto, no es posible descartar que las relaciones observadas con rendimiento se deban a efectos indirectos explicados por la asociación entre los indicadores de CFS con otras propiedades no cuantificadas.

3.6.2. Efectos indirectos del paraplow

Si bien se confirmó que la descompactación modifica la cantidad de agua y N, indicando ciertas alteraciones en su dinámica en el suelo, considerando los requerimientos del cultivo las magnitudes de cambio resultan mínimas (Cuadros 3 y 4 y Figura 3). El aumento en la disponibilidad de agua a la siembra podría deberse a mejoras en la infiltración CP (Álvarez, et al., 2009; Guecaimburú, et al., 2014), sin embargo el efecto negativo en la Dap superficial podría indicar que estas mejoras se dan en el área del suelo por donde pasa la púa del paraplow y no en el espacio entre púas (donde se tomaron las determinaciones de CFS en este estudio). El efecto en el contenido de agua varió entre ambientes, y fue negativo en uno de ellos a la siembra (0-45 cm) y en el conjunto de ellos luego de ésta (0-20 cm) (Figura 3). Este hecho no respondió a un mayor consumo de agua por el cultivo, pues, el paraplow no afectó su crecimiento al menos en la parte aérea. Así, la mejora inicial desaparece posiblemente debido, a que la recompactación eliminaría las diferencias en infiltración (Álvarez et al., 2006). Adicionalmente, pudieron ocurrir mayores pérdidas de agua en profundidad y/o evaporación CP, como ha sido reportado en condiciones de alta demandas atmosférica y escasa precipitación (Lindstrom et al., 1996).

Un mayor PMN en el tratamiento con paraplow (Cuadro 4), en el conjunto de ambientes, confirmaría que el paraplow modificó la actividad biológica y la dinámica de los nutrientes (Hipps y Hodgson, 1987). Sin embargo, la variabilidad registrada en este indicador biológico no permitió que las diferencias fuesen significativas en todos los casos. Estos cambios en PMN no se reflejan en un mayor valor de N inorgánico en el conjunto de los ambientes, lo cual contrasta con lo reportado por Díaz-Zorita (2000). Los efectos cuando significativos,

desaparecen en determinaciones posteriores, y son de escasa magnitud. El incremento máximo observado fue de 1,57 kg ha⁻¹ de N inorgánico (66%_1) en los primeros 15 cm, valor poco significativo considerando la absorción media del cultivo (188 kg ha⁻¹). El paraplowl, si bien favorecería la mineralización, al mejorar la aireación del suelo y la exposición de COS, favorece también la inmovilización debido al crecimiento de la población microbiana, así la liberación de N dependerá de la cantidad de COS fresco. Por otro lado, las pérdidas de N también pueden ser favorecidas CP, al mejorar la infiltración, o las pérdidas de N por volatilización, si al aflojar el suelo éste se seca más rápido. En algunos trabajos el paraplowl resultó en una mayor disponibilidad de N, pero ésta no se reflejó en una mayor concentración de N mineral en suelo, sino en una mayor absorción de N por el cultivo (Motavalli, Stevens y Hartwig, 2003). No obstante, en el presente estudio tampoco hubo diferencias en la absorción de N debidas a la descompactación. Estos resultados se alinean con los obtenidos por Franzluebbers, Schomberg y Endale (2007) quienes concluyeron que en el mediano plazo el paraplowl no afecta la disponibilidad de N.

3.6.3. Impacto del paraplowl en el cultivo de maíz

Considerando el gradiente de CFS evaluado, era esperable tener respuestas al paraplowl en la productividad de maíz, al menos en aquellas situaciones más críticas (Paredes et al., 1994; Álvarez et al., 2006), donde la descompactación mejoró la CFS. Si bien el efecto del paraplowl en rendimiento varió -3,7 y 11% relativo, éste no fue significativo y su magnitud no se relacionó con la CFS inicial, ni con los cambios generados en ésta. La falta de respuesta al paraplowl ha sido reportada por varios investigadores (Schneider et al., 2017), sugiriendo que las variables de CFS modificadas por el paraplowl (RP) no fueron la limitante principal de los sitios más degradados. La falta de respuesta significativa a la descompactación en el ambiente de AC_1, donde la Dap se redujo a valores por debajo de los considerados como críticos (de 1,43 a 1,28 g cm⁻³), indicaría que otras variables además de la Dap estarían determinando los menores rendimientos de este ambiente.

La falta de respuesta al paraplowl ha sido explicada por la ocurrencia de condiciones climáticas favorables, en las cuales la CFS resulta menos restrictiva (Sadras, O'Leary y Rogert, 2005). Podría asumirse que en años climáticos más extremos a los evaluados, (por

excesos o déficits hídricos) las limitantes físicas podrían ser mayores, y por tanto el efecto del paraplow podría expresarse (Schneider et al., 2017). Sin embargo, no se observó mayor respuesta en el año 2, en el cual pudieron existir limitantes hídricas moderadas (figura 3). La falta de respuesta también podría explicarse porque en estadios reproductivos del cultivo podrían haber desaparecido los efectos del paraplow, producto de la recompactación del suelo que se comprobó en este estudio (Girardello et al., 2014).

Es posible que, en este suelo donde los efectos residuales fueron cortos, los beneficios del paraplow se restrinjan a años con limitantes al inicio del período de crecimiento. Este sería el caso de los antecedentes nacionales reportados por Martino, (1998) en cuyo estudio existieron excesos hídricos a la siembra, y CP se mejoró la aireación aumentando el rendimiento de maíz un 102%. Por otro lado, hay que considerar, que según los autores parte de la respuesta fue explicada por un mejor contacto de la semilla con el suelo y un mejor control de malezas. Por lo tanto, considerando que la tecnología actual ha permitido superar estas limitantes, no se esperarían respuestas de tanta magnitud.

La escasa modificación generada CP en la disponibilidad de agua y N implica que no se esperen efectos indirectos del tratamiento asociados a una mejora en la disponibilidad de estos recursos. Sadras, O'Leary y Rogert (2005) plantean que respuestas a la descompactación son esperables cuando se modifica la captura y/o disponibilidad de recursos y no como efecto directo de modificar la CFS. En nuestro trabajo, no se observaron diferencias en crecimiento del cultivo (en ningún momento del ciclo) ni en la absorción de nutrientes no móviles (P y K), lo que sugiere que la descompactación no alteró el acceso de las plantas a los recursos, y posiblemente tampoco el crecimiento radicular. En ninguno de los ambientes evaluados se identificaron capas compactadas continuas, cuya existencia ha sido identificada como uno de los principales factores determinantes de la respuesta al paraplow, en condiciones de laboreo convencional (Schneider et al., 2017). La SD, permitiría mantener estables los poros generados por las raíces de cultivos anteriores, la biota del suelo y/o por los mecanismos de expansión y contracción (asociados a los cambios de humedad). Así, la presencia de capas que impidan la exploración de las raíces en profundidad es menor ya que las raíces pueden compensar su crecimiento a través de estos poros (White y

Kirkegaard, 2010). En este sentido, el paraplow podría incluso destruir dichos poros generando un efecto negativo (Schneider et al., 2017).

El tratamiento CP no modificó el crecimiento y absorción de N, por lo que no habría modificado la oferta del nutriente para el cultivo dentro de cada ambiente. Esto explicaría que la descompactación del suelo no modificó la respuesta a la fertilización nitrogenada.

3.7. CONCLUSIÓN

El rendimiento de maíz en los ambientes con peor calidad física del suelo (CFS) fue menor. El paraplow mejoró la CFS, aunque su efecto en Dap y MP fue bajo, no así en RP donde se observaron mayores cambios. Los efectos del paraplow no se manifestaron en el rendimiento del cultivo. Es posible que: la escasa magnitud de los cambios generados en las variables que se asociaron con rendimiento (Dap y MP); la condición climática favorable al inicio de ambas zafras; y/o la rápida recompactación del suelo expliquen estos resultados. Por otro lado, efectos indirectos del paraplow asociados a la mejora en la disponibilidad de agua y N no se constataron, o su efecto fue escaso. Adicionalmente, aunque se evaluaron suelos con una larga historia de AC, y muy degradados, no se observaron capas compactadas continuas que impidieran la exploración radicular en profundidad, y el paraplow no mejoraría el acceso a los recursos. Independientemente de las causas, se puede concluir que el uso de paraplow resulta una herramienta poco efectiva para remediar la degradación de CFS generada por el uso de suelo en SD en el suelo evaluado.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, N., Hassan, F. y Belford, R. (2009). Effect of soil compaction in the subhumid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*).I. Compaction. *Field Crops Research*, 110, 54–60.

Álvarez, C., Taboada, M., Perelman, S. y Morrás, H. (2014). Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *CSIRO Soil Research*, 52, 533-542.

Álvarez, C., Costantini, A., Bono, A., Taboada, M., Gutierrez-Boem, F., Fernández, P. y Prystupa, P. (2011). Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under

different managements in the Pampean Region of Argentina. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 35, 1985-1994.

Álvarez, C., Duggan, M., Chamorro, E., Ambrosio, D. y Taboada, M. (2009). Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del suelo Argentina*, 27, 159–169.

Álvarez, C., Taboada, M., Bustingorri C. y Gutierrez Boem F. (2006). Descompactación de suelo en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo Argentina*, 24, 1-10.

Amato, M. y Ritchie, J. (2002). Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Science*, 42, 773-780

Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management -a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335–345.

Beretta, A., Bassahún, D. y Musselli, R. (2014). ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando?. *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 90-94.

Beretta, A., Silbermann, A., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R. y García-Lamohite, A (2014). Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. *Ciencia e investigación agraria*, 41(2), 263-271.

Bezerra de Oliveira, L. (1968). Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em mostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 3, 197-200.

Blake, G. y Hartge, K. (1986). Bulk Density. En: A Klute (Eds.) *Methods of soil Analysis*. Part 1. *Agronomy Monography* 9. (pp. 363-375). Madison, Wisconsin, EEUU: American Society of Agronomy.

Botta, G, Joraujuria, D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rossato, H. y Tourn, M. (2006). Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil and Tillage Research*, 91, 164-172.

Bundy, L. y Meisinger, J. (1994). Nitrogen availability indices. En: Weaver, R.W., Angle, J.S., Bottomley, P.S. (Eds.), *Methods of soil Analysis, Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. (pp. 951-984). Madison: Soil Science Society of America.

Busscher, W, Bauer, P y Frederick, J. (2002). Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil and Tillage Research*, 68, 49–57.

Camargo, O, Moniz, A., Jorge, J. y Valaderes, J. (1986). Metodos de análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas. En: Camargo, O.A., Moniz, A., Jorge, J., Valaderes, J. (Eds.), *Boletim técnico Nº 106*. Brasil: IAC (SP).

Díaz-Zorita, M. (2000). Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*, 54, 11-19.

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. (2017). InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

DSF. (1979) Carta de reconocimiento de suelos de Uruguay. Tomo 3. Montevideo: MAP. 452p.

Franzluebbers, A., Schomberg, H. y Endale, D. (2007). Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research*, 96, 303–315.

Gama, D. y Rubio, V. (2012). Determinación del intervalo hídrico óptimo del suelo en situaciones contrastantes de intensidad de uso agrícola (Tesis de grado). Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo Uruguay.

Gelderman R H, Beegle D. (1998). Nitrate–Nitrogen. En: Brown, J. R. (Eds.), *Recommended chemical soil testing procedures for North Central Region* Pub. No. 221 (pp.17 – 20) Missouri: Agricultural Experiment Station.

Girardello, V., Carneiro, T., Santi, A., Cherubin, M., Kunz, J. y de Gregori T. (2014). Resistencia a penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade de soja em

latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duracao. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1234-1244.

Głąb, T. y Gondek K. (2014). The influence of soil compaction and N fertilization on physico-chemical properties of Mollic Fluvisol soil under red clover/grass mixture. *Geoderma*, 226-227, 204-212.

Gonçalves, S., Lopes, E., Fiedler, N., Cavalieri-polizeli K. y Stahl, J. (2017). Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. *Nativa*, 5, 224-229.

Guecaimburú, J., Introcaso, R., Vázquez, J. M., Rojo, V. y Reposo, G. (2014). Persistence of Soil Loosening With Bent Leg Subsoilers in no tillage systems. *Chilenean Journal Agriculture and Animal science*, 30 (2), 109–115.

Hamza, M. y Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82, 121-145.

Hipps, N.A. y Hodgson, D.R. (1987). The effect of a slant-legged subsoiler on soil compaction and the growth of direct-drilled winter wheat. *Journal of Agricultural Science*, 109, 79- 85.

Ishaq, M., Ibrahim, M. y Lal, R. (2003). Persistence of subsoil compaction effects on soil properties and growth of wheat and cotton in Pakistan. *Experimental Agriculture*, 39, 341–348.

Jackson, M.L. (1964). *Análisis químico de suelos*. Barcelona: Omega S.A.

Lindstrom, M. J., Voorhees, W. B., Moncrief, J. F. y Nelson, G. A. (1996). Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*, 38(21), 35–46.

Logsdon, S.y Karlen, D. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78,143-149.

Martino, D. L. (1998). Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. (Tesis doctoral). University of Manitoba, Canada USA.

- Morón, A.** (2003). Principales contribuciones del experimento de rotaciones cultivos – pasturas de INIA La Estanzuela, en el área de fertilidad de suelos (1963- 2003). En: *Simposio 40º años de rotaciones agrícola–ganaderas*. INIA Serie Técnica, 134, 1-7.
- Motavalli, P. P., Stevens, W. E. y Hartwig, G.** (2003). Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil and Tillage Research*, 71(2), 121–131.
- Nawaz, M.F. y Bourri, G.** (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291-309-
- Nevens, F. y Reheul, D.** (2003). The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil and Tillage Research*, 70, 175–184.
- Paredes, D., Roba, M., D´amico, J., Romito, A., Florean, R., Tesouro, O.** (1994). Labranza vertical: efecto sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de soja (glycine max) bajo diferentes grados de compactación. *Revista INTA*. 6pp
- Pilatti, M.A., Imhoff, S. y Orellana, J.** (2008). Propuesta de interpretación del IHO para evaluar calidad del suelo. *21º Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. San Luis, Argentina. 6 pp.
- Rhine E, Sims G, Mulvaney R, Pratt E.** (1998). Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. *Soil Science Society of American Journal*, 62, 473-480.
- Ritchie, S. y Hanway, J.** (1982). How a corn plant develops. Iowa State University Cooperative Extension Services. Ames. *Special Report*, 48, 24 pp.
- RStudio Team.** (2015). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA. Recuperado de: <http://www.rstudio.com/>.
- Sadras, V., O’Leary, G. y Roget, D.** (2005). Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, 91, 131-148.

Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., Seidel, S. (2017). The effect of deep tillage on crop yield- What do we really know?. *Soil and Tillage Research*, 174, 193-204.

Smith, J., Aucana, M. y Hilbert, J. (2002). Potencia demanda por un escarificador en un suelo Argiudol Típico. Boletín de divulgación INTA. Castelar, Argentina. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-potencia_demandada_por_un_escarificador.pdf

Taylor, H., Roberson, G. y Parker, J. (1966). Soil strength—root penetration relations for medium coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102, 18–22.

Torbert, H., Potter, K. y Morrison, J. (2001). Tillage system, fertilizer nitrogen rate, and timing effect on corn yields in the Texas Blackland Prairie. *Agronomy Journal*, 93, 1119–1124.

Tormena, C., Barbosa, M., Costa, A. y Goncalves, A. (2002). Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems. *Scientia Agricola* 59, 795–801.

Uhart SA, Andrade FH. (1995). Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Science*, 35, 1376-1383.

Walters, D. y Gilmore A. (1976). Allelopathic effects of fescue on the growth of sweetgum. *Journal of chemical Ecology*, 2, 469-479.

White, R. y Kirkegaard, J. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil: implications for water uptake. *Plant, Cell and Environment*, 33, 133-148.

Wright A.F. y Bailey J. (2001). Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32, 3243 – 3258.

4. DISCUSIÓN GENERAL

Encontrar alternativas viables para la prevención y el manejo de la degradación de la calidad física del suelo (CFS) es uno de los grandes desafíos que enfrentan los sistemas agrícolas. Ha sido ampliamente diagnosticado que los sistemas actuales, con alto tráfico de maquinaria, alta extracción de nutrientes y balances negativos de COS provocan la degradación del suelo. Sin embargo, ¿Cuál es la mejor estrategia para el diagnóstico de la CFS? Esta pregunta se encuentra todavía en discusión a nivel académico.

La técnica evaluada en este trabajo para la determinación de la estabilidad de agregados (EA) permitió obtener tres indicadores sensibles a la historia de uso del suelo en Molisoles. La menor EA se asoció a aumentos en la Dap, lo cual indicaría la relación entre esta propiedad y otros indicadores del deterioro de la CFS. Así, la EA podría ser usada para el diagnóstico de la degradación, aunque más evaluaciones son necesarias para determinar su relación con otras propiedades y procesos del suelo como la erosión. La ventaja del uso de la EA frente a otras propiedades físicas del suelo, como por ejemplo la Dap y macroporosidad, radica en que la misma puede ser determinada en muestras de suelo disturbadas, lo cual facilita el muestreo. Esto implica, además, una ventaja para su incorporación como análisis de rutina que pueda ser brindado como un servicio por los laboratorios de suelos.

Nuestros resultados confirman que aumentos en el contenido de carbono del suelo (COS) permitirían aumentar la EA, y por tanto prácticas tendientes a aumentar el COS ayudarían a prevenir el problema de compactación. Adicionalmente, se observó que las pasturas mezcla de gramíneas y leguminosa serían más efectivas en el aumento de la EA respecto a las pasturas puras de leguminosas, aunque más estudios son necesarios para entender las causas de estas diferencias. En este sentido resulta interesante continuar evaluando los factores que aumentan la EA, para explorar otras alternativas de manejo. La existencia de una relación de tipo cuadrática entre la EA y el COS confirma nuestra hipótesis sobre la falta de respuestas positivas por encima de ciertos niveles de COS en Molisoles. Este nivel de COS es ampliamente superior a los valores observados a nivel de chacra y por tanto existiría un gran margen de mejora de la EA a través de un aumento en los niveles de COS.

La estrecha relación entre el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo constituye una dificultad a la hora de relacionar el efecto de la pérdida de CFS con el rendimiento de los cultivos. Aún así, en nuestro estudio fue posible asociar el deterioro de la CFS, generada por el uso y manejo del suelo, con una disminución del rendimiento del cultivo de maíz. A pesar de que los rendimientos fueron limitados en los sistemas de peor CFS (de mayor densidad aparente y menor macroporosidad), el uso del paraplow no resultó en mayores rendimientos. Esto podría asociarse a la escasa magnitud y residualidad de los cambios directos generados por el paraplow sobre las variables de CFS determinantes del rendimiento. Además, los efectos indirectos sobre la disponibilidad de agua y N fueron mínimos, por lo que tampoco se esperarían respuestas en este sentido. Es posible, que las condiciones climáticas favorecieran las condiciones físicas a inicios del ciclo del cultivo, en especial en relación a la resistencia a la penetración, y que las limitantes ocurrieran cuando gran parte de los efectos del tratamiento habrían desaparecido.

Podría considerarse entonces que es necesario realizar nuevas evaluaciones en condiciones climáticas más extremas. Respuestas positivas al paraplow podrían esperarse en años con un déficit hídrico a inicios del crecimiento del cultivo, donde los efectos positivos en RP pueden resultar en una mejora en el crecimiento radicular del cultivo. Sin embargo, a mi entender se trataría de años puntuales, y considerando el costo de descompactación y lo difícil de predecir la ocurrencia de estas situaciones, no se justificaría el uso de la herramienta. Además, nuestros resultados ponen de manifiesto que en condiciones de déficit hídrico no necesariamente tendríamos efectos positivos, ya que la descompactación podría favorecer las pérdidas de agua del suelo. Así, las respuestas positivas al paraplow podrían limitarse a condiciones de excesos hídricos, en los cuales los problemas de aireación pueden agravarse por la pérdida de CFS. Estas situaciones son relativamente frecuentes en cultivos de invierno en Uruguay, aunque sería necesario evaluar la residualidad de los efectos del tratamiento frente a los mayores contenidos de humedad del suelo.

Si en el presente estudio, donde se evaluaron situaciones con más de 50 años de agricultura continua y se tomaron todas las precauciones para asegurar el correcto descompactado, no hubo respuesta en el cultivo no se esperarían mayores respuestas en estos suelos a nivel

comercial. Posiblemente, la no ocurrencia de capas compactadas continuas en estos suelos, favorecida por la no remoción del suelo por el laboreo, disminuiría la respuesta al paraplow.

Independientemente de las causas de la no respuesta al paraplow, nuestros resultados son concluyentes respecto a que su uso para la remediación de la degradación generada por la historia de uso en Argiudoles, bajo siembra directa resulta poco prometedor. Ante la falta de herramientas rápidas y efectivas para la corrección del problema, se vuelve aún más crítico el buen manejo para la prevención del problema.

5. **BIBLIOGRAFÍA**

- Ahmad N, Hassan F, Belford R. 2009. Effect of soil compaction in the subhumid cropping environment in Pakistan on uptake of NPK and grain yield in wheat (*Triticum aestivum*). I. Compaction. *Field Crops Research*, 110: 54–60.
- Al Adawi S, Reeder RC. 1996. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Transaction of the ASAE*, 39 (5): 1641 – 1649.
- Alakukku L, Weisskopf P, Chamen W, Tijink F, Van Der Linden J, Pires S, Sommer C, Spoor G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*, 73:145–160
- Alaoui A, Lipiec J, Gerke HH. 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 116: 1–15.
- Álvarez C, Taboada M, Perelman S, Morrás H. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. *CSIRO Soil Research*, 52: 533-542
- Amézketa E. 1999. Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3): 83–151.
- Batey T. 2009. Soil compaction and soil management -a review. *Soil Use and Management*, 25(4): 335–345.
- Beutler AN, Centurion JF. 2004. Effect of soil compaction in root development and soybean yield. *Brazilian Journal of Agricultural Research*, 39: 581–588.
- Botta GF, Jorajuria D, Balbuena R, Rosatto H. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil and Tillage Research*, 78(1): 53-78.
- Díaz-Zorita M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*, 54: 11-19.

- Doran J, Parkin T. 1994. Defining and assessing soil quality. En: Doran J. (Eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, WI: SSSA. (Spec. Publ. SSSA 35 and ASA). 3–22.
- Hamza M, Anderson W. 2005. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82: 121-145.
- Hartemink A. 2008. Soils are back on the global agenda. *Soil Use and Management*, 24: 327–330.
- Idowu O. 2003. Relationships between aggregate stability and selected soil properties in humid tropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34: 695–708.
- Ishaq M, Ibrahim M, Lal R. 2003. Persistence of subsoil compaction effects on soil properties and growth of wheat and cotton in Pakistan. *Experimental Agriculture*, 39: 341–348.
- Kamiji Y, Pang J, Milroy SP, Palta JA. 2014. Shoot biomass in wheat is the driver for nitrogen uptake under low nitrogen supply, but not under high nitrogen supply. *Field and Crops Research*, 165: 92–98.
- Le Bissonnais Y, Blavet D, De Noni G, Laurent JY, Asseline J y Chenu C. 2007. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables. *European Journal of Soil Science*, 58(1):188–195.
- Le Bissonnais, Y. 1996. Aggregate stability and assesment of soil crustability and erodability. I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- Logsdon SD, Karlen DL. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78: 143–149.
- Mijangos I, Perez R, Albitu I, Garbisu C. 2006. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 40: 100–106.

- Nevens F, Reheul D. 2003. The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil and Tillage research*, 70: 175–184.
- Nicoloso S, Jorge T, Amado C, Schneider S, Lanza Nova ME. 2008. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista brasileira de Ciência do Solo*, 32 (4): 1723–1734.
- Nosalewicz A, Lipiec J. 2014. The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant and Soil*, 375(1-2): 229-240.
- Novelli L, Caviglia O, Wilson M, Sasal M. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195–196: 260–267.
- Palta JA, Chen X, Milroy SP, Rebetzke GJ, Dreccer F, Watt M. 2011. Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, 38: 347–354.
- Regelink I, Stoof C, Rousseva S, Weng L, Lair G, Kram P, Nikolaidis N, Kercheva M, Banwart S, Comans R. 2015. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. *Geoderma*, 247–248: 24–37.
- Reichert JM, Suzuki I, Reinert D. 2015. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. En: Ceretta CA, Silva I, Reichert JM. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 5:49-134.
- Sadras V, O’Leary G, Roget D. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*, 91: 131-148.

- Schaffer B, Stauber M, Mueller TL, Muller R, Schulin R. 2008. Soil and macro- pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. *Geoderma*, 146: 183–191.
- Smith J, Aucana M, Hilbert J. 2002. Potencial demanda por un escarificador en un suelo Argiudol típico. INTA, Buenos aires. 2002:1-5. [En línea]. 16 marzo 2018. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-potencia_demandada_por_un_escarificador.pdf
- Spoor G, Tijink FG, Weisskopf P. 2003. Subsoil compaction: risk, avoidance, identification and alleviation. *Soil and Tillage Research*, 73: 175-182.