

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA ROTACIÓN CON SORGO DULCE EN LAS PROPIEDADES
FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

por

Juan Francisco RODRÍGUEZ PEDRAJA

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2012

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Guillermo Siri

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Fecha: 10 de mayo de 2012

Autor: -----
Juan Francisco Rodríguez Pedraja

AGRADECIMIENTOS

Al director de tesis Ing. Agr. Guillermo Siri Prieto, por su orientación técnica y conocimientos aportados durante todo el proceso de elaboración del trabajo.

Al los Profs. Ing. Agr. Oswaldo Ernst e Ing. Agr. Sebastián Mazzilli por sus valiosos aportes.

A los funcionarios de la biblioteca y de los laboratorios de la estación experimental Mario A. Cassinoni, por su colaboración incondicional.

Y por supuesto, a mi familia y amigos por su apoyo durante toda la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 ROTACIONES.....	3
2.2 CARBONO.....	3
2.2.1 <u>Rol del carbono orgánico en el suelo</u>	4
2.2.2 <u>Factores que modifican el carbono orgánico del suelo</u>	5
2.2.3 <u>Paralelismo del carbono y nitrógeno</u>	8
2.3 ESTABILIDAD DE AGREGADOS.....	11
2.4 INFILTRACIÓN.....	17
2.5 FÓSFORO.....	20
2.5.1 <u>Fósforo total</u>	20
2.5.2 <u>Fósforo inorgánico</u>	20
2.5.3 <u>Fósforo orgánico</u>	20
2.5.3.1 Humus del suelo.....	20
2.5.3.2 Restos frescos.....	20
2.5.3.3 Biomasa microbiana del suelo.....	21
2.5.4 <u>Dinámica del fósforo</u>	21
2.6 POTASIO.....	26
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	31
3.1 UBICACIÓN DEL ENSAYO.....	31
3.2 EXPERIMENTO.....	31
3.2.1 <u>Diseño experimental</u>	31
3.2.2 <u>Tratamientos</u>	32

3.3	DETERMINACIONES.....	33
3.3.1	<u>Herramientas y criterios para las mediciones.....</u>	33
3.3.1.1	N total, P bray 1, k intercambiable, carbono total	33
3.3.1.2	Tiempo de Infiltración	34
3.3.1.3	Estabilidad de agregados	34
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	34
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	35
4.1	CARBONO TOTAL.....	35
4.2	ESTABILIDAD DE AGREGADOS	39
4.3	INFILTRACIÓN.....	42
4.4	POTASIO INTERCAMBIABLE.....	44
4.5	FÓSFORO.....	45
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	48
6.	<u>RESUMEN</u>	50
7.	<u>SUMMARY</u>	52
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	54

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Análisis de agregados en un suelo franco-limoso bajo diferentes cultivos en Iowa.....	16
2. Rotación en los años evaluados según tratamiento.....	32
3. Pérdida de suelo por erosión estimada a través del software Erosión 5.91.....	36
Figura No.	
1. Concentración de carbono orgánico del suelo según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm profundidad) dadas las diferentes alternativas en la intensidad del sorgo dulce luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).....	35
2. Diámetro medio de los agregados (MWD) según tratamiento.....	40
3. Infiltración (mm/h) según tratamiento.....	42
4. Concentración de K en el suelo (meq/100 g) según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm profundidad) comparando dos intensidades del sorgo dulce en la rotación luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).....	44
5. Concentración de P Bray I (ppm) según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm profundidad) dadas las diferentes alternativas en la intensidad del sorgo dulce luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).....	46

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de las fuentes de energía convencionales y el efecto de su uso en el calentamiento global, ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas, que sean capaces de producir energía mediante el uso de recursos renovables. A su vez estos deben ser mantenidos en condiciones de ser reutilizados. En tal sentido se propone la utilización de la biomasa como fuente de energía, dentro de la que se incluye al sorgo dulce (*Sorghum bicolor*) que por sus características frente a otros cultivos, sería una excelente alternativa para nuestro país.

No obstante, para contemplar los propósitos de la generación de energía renovable, se deben mantener a largo plazo los recursos utilizados para su producción. Un recurso obviamente fundamental en el proceso es el suelo, por lo que el estudio del impacto del cultivo en el mismo, es de primordial importancia para determinar su aptitud en el mencionado propósito.

Con el objetivo de estudiar su viabilidad, es que se propone el siguiente trabajo llevado a cabo en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, que pretende determinar mediante algunos indicadores, la compleja evolución de las principales características químicas y físicas del suelo, en una rotación o serie de rotaciones que incluye sorgo dulce

El carbono del suelo, fue estimado no solo por su importancia en mantener la capacidad productiva del suelo, sino también por su relevancia al oficiar de fosa para el CO₂ de la atmosfera; por lo que es considerado como uno de los principales indicadores de sustentabilidad.

Una de las principales vías de pérdida de carbono orgánico del suelo (COS), es la erosión, por lo que se realizaron estimaciones de pérdida de suelo a través del software Erosión 5.91 desarrollada para tal fin, para tratar de considerar los aspectos relacionados a diferencias de los tratamientos en este aspecto.

La evolución del COS a su vez está influenciada por otros factores, entre los que se incluye la entrada de carbono al sistema. Esto está determinado por la productividad que se genera y la proporción de esta que es

devuelta al suelo. Esta productividad es afectada a su vez por varios agentes, entre los que se incluyen características físicas y químicas del suelo, como el fósforo disponible, el potasio intercambiable, la velocidad de infiltración y la estabilidad de agregados medidos en este trabajo.

Es reconocido por varios autores el efecto benéfico de la rotación con pasturas perennes en las condiciones productivas del suelo, por lo que fueron incluidas en distintas proporciones para detectar la necesidad relativa del componente pastura, en mantener los indicadores de calidad del suelo cuando es cultivado sorgo dulce para la producción de biomasa, en el que se retira la totalidad de su parte aérea.

La hipótesis planteada en el presente trabajo fue: Las rotaciones de sorgo dulce continuo, sin la inclusión de pasturas plurianuales, afectan tanto las propiedades físicas como químicas del suelo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROTACIONES

La rotación de cultivos anuales y pasturas perennes fue considerada una de las principales características de la agricultura nacional (Ernst, 2000). Frente al deterioro producido por los cultivos con laboreo y el conocimiento de la recuperación de la calidad del suelo que generan las pasturas de gramíneas y leguminosas, en el país se comenzó a trabajar en rotaciones desde fines de la década de 1950.

Tanto los resultados de investigación de largo plazo, como los resultados de productividad física y económica, al igual que la variabilidad de esta última, explican la adopción generalizada de rotaciones de cultivos con pasturas. La superioridad de la performance física y económica se fundamenta en una mejor calidad del suelo, en características productivas y en un mejor nivel de conservación del recurso (Durán y García Préchac, 2007). También Ernst y Siri (2009) afirman que la adopción de esta forma de producción se explica por las ventajas en rendimiento de los cultivos y el funcionamiento del sistema de producción. Similares resultados fueron reportados por Fernández (1992) al analizar rotaciones con y sin pasturas de larga duración.

La inclusión de cultivos determina un deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y aceleran su ritmo de erosión reduciendo su productividad. Si el ciclo de cultivo se interrumpe con la siembra de una pastura, en cierta medida se está volviendo a la situación original; esta es la principal razón de los beneficios derivados de la rotación de cultivos con pasturas en términos de productividad del recurso suelo (García Préchac, 1992).

2.2 CARBONO

Tal como señala Morón (2001), en condiciones naturales el nivel de carbono orgánico de un suelo es función del clima, vegetación, topografía, material madre y tiempo. En un sistema agrícola, las entradas de carbono están dadas por rastrojos, biomasa radicular y exudados radiculares, mientras que las salidas, son las pérdidas por erosión y mineralización.

En el estudio de un sistema biológico, existe siempre la tentación de separar los componentes para su mejor comprensión, pero dada la intrínseca relación que existe entre los factores, la forma de entender los procesos en el suelo es integrar las variables conocidas que afectan el resultado en estudio.

Tal es el caso del carbono orgánico que es el sustrato de toda la actividad biológica del suelo y por lo tanto origen de sus propiedades biológicas. La actividad biológica es determinante en el desarrollo de estructura y porosidad. Por lo tanto desde el punto de vista físico interviene en determinar la dinámica del agua, del aire y por ende del régimen térmico, así como en la resistencia a la erosión del suelo. Desde el punto de vista químico, es la única fuente de nitrógeno y principal de azufre en el suelo y tiene un importante rol en el aporte de otros nutrientes así como en la regulación de su dinámica (CIC, pH, etc.) (Durán y García Préchac, 2007).

Lo anterior explica la consideración del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) como el principal indicador de calidad del mismo (Doran y Parkin, Reeves, Seybold et al., citados por Durán y García Préchac, 2007).

En el sentido de la importancia del COS, Morón (2001) señala que este trasciende el interés agronómico. Constituye un pool dinámico que integra el ciclo general del carbono y que se relaciona con el CO₂ de la atmósfera el cual se vincula con el denominado efecto invernadero

2.2.1 Rol del carbono orgánico en el suelo

El contenido de carbono de los suelos, como ya fue mencionado, está fuertemente asociado a las propiedades físicas y químicas del mismo (Morón y Sawchik, citados por Morón, 2003). Además, según Robert (2002) sirve como fuente de energía para los procesos microbianos y almacenaje de nutrientes, determina la actividad biológica de los suelos, la cantidad, diversidad y actividad de la fauna y de los microorganismos y por lo tanto mejora la dinámica y la disponibilidad de los principales nutrientes de las plantas. Hay una gran cantidad de indicadores de suelo ligados directamente al COS, como lo son, el agua disponible para las plantas, la tasa de infiltración, la formación de agregados, densidad aparente y estructura del suelo (Hudson, Tisdall y Oades, Soane, citados por Ernst y Siri, 2009).

Por esto es razonable pensar la vinculación de la productividad y su estabilidad, con el contenido de carbono orgánico del suelo. En tal sentido Morón y Baethgen (1996a) expresan que no hay duda de que un suelo con mayor contenido de carbono orgánico tiene un potencial productivo mayor. No obstante, debe recordarse que por lo menos, parte de los roles del mismo, pueden ser sustituidos por prácticas agrícolas: el suministro de nutrientes por fertilizantes, el régimen de agua por riego, la acidez por el uso de cal, etc. Pero estas prácticas requieren un uso mayor de energía suministrada por combustibles fósiles; y dada la tendencia actual en que se busca fuentes

renovables de energía, este es un factor a tener en cuenta en el diseño de un sistema productivo.

2.2.2 Factores que modifican el carbono orgánico del suelo

Según Durán y García Préchac (2007) en nuestras condiciones de suelo, ambiente y sistema de producción agrícola- ganadero, un alto porcentaje de la reducción de la materia orgánica del suelo y por lo tanto del carbono es debida al proceso de erosión. A su vez estos autores indican que cuanto mayor es la erosión que provoca un sistema de rotaciones, estimado a través de un modelo de simulación, mayor es la contribución porcentual de la misma a la pérdida de carbono.

Robert (2002) menciona que los principales factores que actúan sobre la evolución de la materia orgánica del suelo, son la vegetación (ingresos de residuos, composición de las plantas), factores climáticos (condiciones de humedad y temperatura) y las propiedades del suelo (textura, contenido y mineralogía de la arcilla y acidez). Otros factores relacionados con la fertilidad del suelo (N, P o S) o con el riego, tienen efecto sobre la producción de las plantas y por lo tanto sobre el contenido de M.O de equilibrio.

Las rotaciones que incluyen pasturas en general mineralizan más carbono debido a que contienen más cantidad de carbono orgánico y a su vez en la distribución interna de las diferentes fracciones, presenta mayor cantidad absoluta y relativa de carbono en las fracciones orgánicas menos descompuestas y más susceptibles a ser mineralizadas (Morón y Sawchik, citados por Morón, 2003). En tal sentido en un experimento de rotaciones de larga duración realizado en INIA La Estanzuela, se determinó que el carbono y el nitrógeno total son indicadores menos sensibles a los cambios de uso y manejo del suelo. Estos indicadores presentan una muy pequeña variación anual, siendo sus variaciones detectadas a lo largo de varios años debido a los efectos acumulados (Díaz Roselló, 1992a). Sin embargo, existen algunos indicadores más sensibles a los cambios anuales de COS y N, tales como el potencial de mineralización del nitrógeno (PMN) y el carbono de la materia orgánica particulada (C-POM) 212-2000 y N-POM 212-2000 (Morón, 2003).

Según García Préchac (1992) el contenido de materia orgánica del suelo aumenta o se mantiene, bajo siembra directa en suelos no degradados, generando una importante actividad biológica que contribuye a una mejor estructura y porosidad. Esto mejora la dinámica del agua, entre otros efectos, lo que redundará en una mayor infiltración y menor escurrimiento.

El COS es afectado por el manejo del mismo y es resultado del balance entre el aporte de residuos vegetales y su tasa de descomposición. Las principales formas de obtener un incremento del COS están asociadas a la agricultura conservacionista (siembra directa y mínimo laboreo) y al uso de una cobertura vegetal continua (pasturas perennes y/o cultivos de cobertura) sobre la superficie del suelo (Lal et al., citados por Ernst y Siri, 2009). Por ello, Siri y Ernst (2009) señalan que estas prácticas en el uso del suelo han permitido el secuestro de carbono atmosférico y/o reducción de emisiones de gases con efecto invernadero.

El carbono orgánico del suelo (COS) aumenta cuando se producen grandes cantidades de rastrojo/ha; a su vez es reducido cuando existen períodos de baja producción Ziclke y Christensen, Campbell y Zetner, citados por Ernst (2000), una alta proporción del tiempo en que el suelo esta en barbecho (Campbell et al., citados por Ernst, 2000) y cuando se retira el 100% del rastrojo o biomasa producida.

Ernst y Siri (2009), expresan que un sistema con monocultivo deja la mitad del año sin producir, con el suelo expuesto a la erosión, por lo que depende de que el cultivo produzca suficiente biomasa como para compensar el tiempo improductivo y además de que el rastrojo cubra el suelo entre el momento de la cosecha y el cierre de la entrefila del cultivo siguiente.

También debe contemplar las pérdidas producto de la respiración, que fueron estimadas por Álvarez (2006), en un suelo de la Pampa Ondulada con un nivel inicial de 50 t de carbono/ha en los primeros 30 cm, en 7,9 t CO₂/ha/año que eran emitidas por descomposición de residuos vegetales y mineralización de la materia orgánica del suelo. Según Lal et al., citados por Robert (2002), la tasa de mineralización de la M.O del suelo depende sobre todo de la temperatura, la disponibilidad de oxígeno-drenaje, el uso de la tierra, los sistemas de cultivos, el manejo del suelo y de los cultivos.

La información experimental disponible en la región permite afirmar que los sistemas basados en un cultivo por año no son sostenibles (Ernst, 2000). Según el mismo autor para lograr sistemas productivos sostenibles estos deben lograr: altas producciones anuales, ser efectivos en el control de la erosión, manejar altas cantidades de rastrojo en superficie, reducir el tiempo de barbecho y mantener el suelo cubierto; sin duda estos factores necesarios para lograr un balance positivo de COS.

En un experimento de larga duración, se observó una pérdida de 929 kg.há⁻¹.año⁻¹ de materia orgánica para el sistema de agricultura continua sin

fertilización, mientras que con cultivos fertilizados la pérdida fue de 670 y 643 kg.há⁻¹.año⁻¹ para dos secuencias de cultivos diferentes (Díaz Rosselló, 1992b). El autor señala que la pérdida del sistema fertilizado es menor al no fertilizado por la mayor cantidad de materia orgánica devuelta como residuos de cosecha y sistemas radiculares del primer sistema. También señala una menor cobertura vegetal de protección frente a tormentas erosivas en el sistema sin fertilizar. La pérdida anual estimada en el sistema de agricultura continua sin fertilización es de 27 ton .há⁻¹.año⁻¹.

Se debe considerar que con la inclusión de pasturas plurianuales, luego de las mismas el ritmo de pérdida de materia orgánica es mucho mayor que en sistemas de agricultura continua, lo que revela una tasa más elevada de oxidación de los restos frescos poco humificados (Díaz Rosselló, 1992b). Este factor determina una fuente de mineralización que constituye una pérdida de carbono deseable en el sistema (Ernst, 2000).

Cuando en los sistemas de rotaciones se realizan mediciones para detectar los efectos de los diferentes manejos se debe contemplar un aspecto importante destacado por Díaz Rosselló (1992b). Este es el hecho de que las estimaciones de materia orgánica del suelo, realizadas a través de la concentración de la misma, subestima la pérdida de carbono absoluta, ya que no contempla la pérdida de carbono erosionado junto con el suelo. Además también debe agregarse lo señalado por Barrows et al., citados por Díaz Rosselló (1992b), que la erosión es un procesos de pérdida de materia orgánica selectivo, ya que la concentración de MO de los sedimentos es en promedio 2,1 veces mayor que el suelo que los originó.

Como vía de entrada de carbono al sistema, no todos los residuos vegetales hacen un aporte de igual importancia ya que según Ernst (2000), la entrada está gobernada por la cantidad y también por el tipo de rastrojo que produce el sistema. A su vez también según Bolinder et al., citados por Ernst y Siri (2009) la relación PA/R (parte aérea/raíz) para el caso de las pasturas (gramíneas + leguminosas) está entorno a 1,5, siendo solo 6 para los cultivos anuales. Este diferente potencial de fijar carbono en profundidad a través de la producción de biomasa radicular, explica mayormente el aumento de COS en la fase pastura de la rotación. En cuanto al aporte de biomasa por parte del cultivo de sorgo dulce, fueron reportados por Siri y Ernst¹ para la parte aérea entre 22

¹Siri, G.; Ernst, O. 2010. Impacto de la intensidad del cultivo de sorgo dulce en la rotación sobre el balance de nutrientes y calidad del suelo en Uruguay (sin publicar).

y 27 t/ha de MS, y dado que la parte aérea es removida totalmente, estaría aportando al suelo sólo lo producido por el sistema radicular, que si asumimos una relación parte aérea/ raíz de 6, sería entre 3,7 y 4,5 t/ha de MS de raíces.

Ernst y Siri (2009) afirman que el principal factor de control de la erosión de suelo es el tipo de laboreo afectando la tasa de mineralización, con un impacto relativamente menor de la inclusión o no de las pasturas; este hecho se mantiene, si en la técnica de no laboreo se conserva el suelo cubierto por residuos para reducir las pérdidas producto de la erosión, que ya fue presentada su importancia relativa.

2.2.3 Paralelismo del carbono y nitrógeno

Dado la intrínseca relación existente entre el carbono del suelo y el nitrógeno, considero necesario hacer algunas apreciaciones de la dinámica de este nutriente, presentadas a continuación.

Más allá de la capacidad de las pasturas de recuperar el contenido de materia orgánica de los suelos sometidos a agricultura, la mayor contribución a la sostenibilidad productiva y económica de los sistemas mixtos de producción, es quizás el enriquecimiento de nitrógeno de esa MO cuando se emplean pasturas de leguminosas (Díaz Rosselló, 1992a).

Sosteniendo esta postura en un experimento realizado en INTA Rafaela se encontró que el contenido de nitrógeno total fue un parámetro más sensible que la materia orgánica del suelo, para detectar cambios relacionados al manejo de la fertilidad del mismo (Fontanetto y Keller, 2001).

En un experimento de larga duración instalado en La Estanzuela en 1963, Díaz Rosselló (1992a) encontró un paralelismo del nitrógeno total con la materia orgánica del suelo, esperable, ya que a excepción del nitrógeno mineral que hay en el suelo, el resto del N se asocia a la materia orgánica.

Dado el paralelismo en el comportamiento de estos dos elementos en el suelo, Díaz Rosselló (1992a) en el mismo experimento de larga duración, encontró que la variación de la relación C/N entre los tratamientos fue escasa, al término de casi tres décadas, solo fue de 6 y 9 % entre tratamientos extremos: agricultura continua sin fertilizante, mostró la relación C/N más alta con un valor de 11,9 y los sistemas con pasturas varían entre 11,3 y 10,8.

El nitrógeno del suelo, tal como lo enfoca Baethgen (1992) tiene tres aspectos importantes a ser considerados: 1) en la agricultura actual, muy

extractiva con rendimientos cada vez mayores y/o en la cual existe la remoción de los restos vegetales, las cantidades de N exportado son cada vez mayores, sumado además a las pérdidas por volatilización, denitrificación, erosión y lavado del N del suelo. Para intentar compensar estas pérdidas la agricultura moderna se complementa con el N del fertilizante y rotación con leguminosas para la fijación del N atmosférico, pero en muchos casos estos mecanismos han sido insuficientes, lo que ha originado una pérdida constante de materia orgánica (y por lo tanto de N) y una creciente dependencia de los fertilizantes químicos; 2) es notoria la importancia del N en la agricultura y su efecto en el rendimiento de los cultivos; 3) relacionado con la contaminación ambiental: contaminación de aguas con nitratos, así como también óxidos de nitrógeno originados de la denitrificación, con efecto invernadero.

En el suelo existe una continua pérdida y ganancia de las diferentes fracciones, tal como señala Black (1975a); en cada ciclo anual se mineraliza parte del nitrógeno orgánico y se inmoviliza parte del mineral. Parte del N lo toman las plantas, mientras que otra vuelve al suelo en los residuos vegetales; parte se pierde en la atmosfera y otra regresa al suelo; una parte es perdida por lixiviación y otra se gana por fertilización o fijación biológica de nitrógeno. Una fracción puede perderse por erosión o agregarse por sedimentación.

La fertilización como vía de aporte de N al suelo en sistemas agrícolas es considerada por Díaz Rosselló (1992a) como poco relevante. Sin embargo, en algunas condiciones en que la capacidad de las plantas para generar nitrógeno orgánico, supere la producción de nitrógeno mineral por parte de la actividad microbiana, la aplicación de fertilizante nitrogenado puede resultar en un incremento del nitrógeno orgánico del suelo (Black, 1975a).

La remoción por los cultivos y los animales es considerada como la principal vía de pérdida de N de los sistemas agrícola - ganaderos de la región. Según Baethgen (1992), la cantidad de N removido en la etapa de cultivo de una rotación agrícola-ganadera más o menos típica equivale a 50-100 kg de N/ha/por año. En tal sentido fue reportado por Siri y Ernst¹ en un experimento de larga duración, en el que se incluye en diferente proporción sorgo dulce, una concentración de nitrógeno de 1,7; 5 y 14,4 g Kg⁻¹, de tallo, hoja y grano respectivamente. Este resultado cuando es ponderado por la producción de materia seca de sorgo dulce, arroja una remoción de N de entre 97 y 115 kg/ha/año promedio en el periodo 2005-2009 para las rotaciones de sorgo continuo.

La inclusión de pasturas plurianuales, permite que el balance aparente de nitrógeno, medido como la diferencia entre ingreso de nitrógeno vía

fertilizante, fijación simbiótica y las salidas de N en los productos, sea positivo (Ernst y Siri, 2009). Este balance positivo aparente no significa que todo el nitrógeno extra esté en el suelo, ya que no contabiliza las pérdidas de N por otras vías (volatilización, lavado de nitratos, denitrificación, pérdida de suelo). De todas maneras este hecho explica el mayor uso de fertilizantes nitrogenados en sistemas de cultivo continuo comparados con sistemas que rotan con pasturas.

La inclusión de leguminosas en los sistemas de rotación cultivos-pastura se plantean de forma necesaria en la agricultura contemporánea, por la vulnerabilidad de los sistemas sostenidos con fertilizantes químicos enteramente dependientes de los combustibles fósiles (Power, citado por Baethgen, 1992).

Además de ello la fuente de nitrógeno proveniente de la FBN es de liberación lenta y por lo tanto sujeta a menores oportunidades de pérdida, con mejor aprovechamiento por parte de los cultivos (Pannel y Falconer, citados por Baethgen, 1992).

En un experimento de larga duración instalado en La Estanzuela en 1963, Díaz Rosselló (1992a), encontró una ganancia de NT decreciente en la fase de pastura, ya que el componente leguminosa disminuye a medida que esta envejece, y una fase también asintótica de pérdida decreciente en los años de cultivos sucesivos, pues la mineralización disminuye a medida que la materia orgánica remanente es más estable.

En los sistemas mixtos que rotan cultivos con pasturas que incluyan leguminosas, existen tres vías importantes de entrada de nitrógeno: los residuos de los cultivos, los fertilizantes nitrogenados y la fijación de N atmosférico por la asociación *Rhizobium*-leguminosa (Sawchik, 2001). La cantidad de N fijado por una leguminosa en un determinado período va a depender de: 1) su productividad, que como referencia se considera 30 kg de N fijado por tonelada de MS de leguminosa producida, mientras que Díaz Rosselló (1992a) cuantificó que se incorporó aproximadamente 1 kg de NT ha⁻¹ por cada 25 kg de MS de parte aérea producida por leguminosa, 2) del contenido de nitrógeno del forraje 3) de la proporción del N que derivó de la atmósfera por acción de la simbiosis.

Existe una vía de entrada de N al sistema, que en algunos casos puede ser relevante, que es la fijación no simbiótica realizada por organismos heterótrofos, la cual se beneficia de la materia orgánica con escaso contenido

de nitrógeno como fuente de energía, como es el caso de residuos producidos por gramíneas C4.

En el experimento de larga duración iniciado en 1963 en La Estranzuela, los sistemas de cultivo continuo perdieron en 36 años un 22 y 31 % del contenido original de nitrógeno total de la capa arable en los tratamientos con y sin agregado de fertilizantes respectivamente (Sawchik, 2001).

La duración de la fase de pasturas tiene un efecto directo sobre la residualidad del N para los cultivos siguientes, ya que el suministro de este nutriente se hace mas largo y estable en el tiempo con pasturas de 4 años de duración (Martino et al., citados por Sawchik, 2001). No obstante, la recuperación por parte del cultivo del N proveniente de la leguminosa, no es tan importante como el del fertilizante, dado que grandes cantidades de N de las leguminosas son retenidas en el suelo en forma orgánica (Harris et al., citados por Sawchik, 2001)

2.3 ESTABILIDAD DE AGREGADOS

Los suelos se componen de unidades estructurales. Estas pueden contener muchas partículas individuales que, al adherirse entre si, actúan en definitiva como un conjunto. La estructura del suelo no proporciona ninguno de los factores esenciales para el crecimiento vegetal; no obstante puede modificarlo de diversas maneras (Black, 1975a).

La estabilidad de la estructura significa la resistencia que los agregados del suelo oponen a las influencias de desintegración del agua y de la manipulación mecánica. La estabilidad de los agregados es de máxima importancia en la formación y en la conservación de la estructura de los suelos (Baver, citado por Ponce de León y Capurro, 1980).

La estructura del suelo no es fácilmente medible, debido a la complejidad del mismo y a la multiplicidad de sus funciones. Los principales factores que determinan las propiedades físicas del suelo son la composición mineralógica básica y la distribución del tamaño de partículas, así como el modo en el cual las partículas se unen para formar los agregados (Martino, 2001).

Como forma de aproximarse a estimar la estabilidad estructural, se han propuesto varios métodos, entre los que se incluye, uno que asigna un factor de ponderación proporcional al tamaño de los agregados, el tamaño medio de los agregados (MWD).

Las propiedades físicas de los suelos, dentro de los cuales se incluye la estabilidad de agregados, según Calegari (2001), son afectadas por la rotación empleada, las especies introducidas, épocas de siembra, distancia entre las plantas, cantidad de biomasa producida (aérea y radicular). Dada la estrecha relación de las propiedades físicas con el COS, todos los factores mencionados que modifiquen a este, afectan de alguna manera a aquellas.

Las propiedades físicas que afectan directamente a las plantas, son la disponibilidad de agua y oxígeno, la temperatura y la resistencia mecánica al crecimiento radicular (Letey, citado por Durán y García Préchac, 2007). Estas propiedades están determinadas por los regímenes de lluvia y radiación, por la cobertura y rugosidad de la superficie y por la textura y estructura del suelo. De los factores mencionados algunos son gobernados por las características propias del suelo, su ubicación geográfica y posición en el paisaje, pero la cobertura y rugosidad de la superficie y la estructura, son afectadas por el uso y manejo del suelo. También el tráfico de maquinaria y el pisoteo de animales en pastoreo, afectan la estructura del suelo (Durán y García Préchac, 2007).

La evolución de las propiedades físico-químicas del suelo puede variar dependiendo de las condiciones in situ, Ernst y Siri (2009) establecen que cualquier rotación de cultivo y/o pastura puede presentar grandes diferencias, con respecto a niveles de pérdida de suelo, definida por la combinación de ambiente-suelo en la que se implemente.

De las propiedades físicas del suelo solo cuatro afectan directamente el crecimiento de las plantas: disponibilidad de agua, disponibilidad de oxígeno, temperatura, y resistencia mecánica al desarrollo de órganos subterráneos. Otras propiedades comúnmente consideradas, tales como densidad aparente, estabilidad de agregados, textura, conductividad hidráulica, densidad de las partículas, etc, afectan indirectamente el desarrollo vegetal a través de sus efectos sobre los parámetros anteriores.

En la formación de los agregados existen dos aspectos distintos: primero la aparición de enlaces entre partículas que confieren estabilidad, y segundo, la separación de las unidades estructurales entre sí, que determinan el tamaño y forma característica en cada unidad. Los enlaces entre partículas pueden suceder por la atracción existente entre las partículas de arcilla, pero a su vez existe diferencia entre la composición mineralógica de esta fracción, Hagin y Bodman, citados por Black (1975b), indican que la montmorillonita forma enlaces más estables que caolinita. Por lo tanto las características mineralógicas son importantes para las características físicas de un suelo entre otras razones, porque el contenido de materia orgánica estabilizado

(componente primordial de la formación de estructura) depende de las características mineralógicas y además por las características mencionadas de los diferentes minerales de establecer agregados.

La mencionada relación es puesta de manifiesto en una serie de ensayos realizados en la Unidad Experimental Palo a Pique, del INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). Durán y García Préchac (2007) establecieron una alta correlación entre carbono orgánico (CORG) y densidad aparente, aún en un rango pequeño de variación del CORG (1,48% en cultivo continuo a 1,9% en pradera de 4to. año de las rotaciones largas). Dicha variable está muy correlacionada con la densidad aparente, dependiente ésta a su vez, del estado de la estructura del suelo.

La importancia relativa de la materia orgánica de un suelo en la formación de la estructura y su estabilidad, es dependiente del contenido de arcilla del mismo tal como es expresado por Ponce de León y Capurro (1980). La M.O juega un rol principal en la estabilidad estructural del horizonte A, mientras que el contenido de arcilla lo hace a nivel del horizonte B. La estabilidad de agregados incrementa marcadamente con el contenido de materia orgánica de los suelos, especialmente en aquellos con contenidos menores a 2% (Ruks et al., 2004).

La formación de agregados y su estabilidad en agua, en general está directamente relacionada con los niveles de materia orgánica, con la actividad de los microorganismos (principalmente por acción de las hifas de hongos) y con los exudados radiculares (polisacáridos). Mientras que experimentos llevados a cabo por Mehta y Greenland, citados por Black (1975b), mostraron que en ciertos suelos, son los polisacáridos los que más contribuyen a la estabilidad de agregados, en otros suelos el mayor aporte a la estabilidad de los agregados estaría dado por la lignina y las sustancias húmicas. En tal sentido Baver et al., citados por Ruks et al. (2004) señalan que existe una correlación positiva entre la agregación y el contenido de arcilla y materia orgánica del suelo. Esta correlación con la materia orgánica es mayor cuanto menor es el contenido de arcilla y viceversa.

La MO humificada junto con los minerales de arcilla son los dos agentes cementantes más importantes en la formación de agregados (Morón, 1996b). En tal sentido Black (1975b) ratifica que la materia orgánica afirma las uniones que la arcilla, por sí, produce entre las grandes partículas.

Por esto la materia orgánica tiene un efecto profundo en la estructura de muchos suelos. Cuando la materia orgánica disminuye, los suelos tienden a

transformarse en duros y compactos. El aporte de MO conduce a la síntesis de compuestos como polisacáridos que unen las partículas del suelo en unidades estructurales llamadas agregados (Silva, 1995). Según Martino (2001) la distribución del tamaño de las partículas y la forma en que las mismas se unen para formar tales agregados, así como la composición mineralógica básica de los suelos, son los principales factores que determinan las propiedades físicas de los mismos.

Existe una asociación positiva y muy estrecha entre la estabilidad de los agregados y los hidratos de carbono solubles en agua (que representan del 10 al 20% de la MOS), y también con carbono orgánico total.

El mucílago excretado por el crecimiento de las raíces y la microflora de la rizósfera son una fuente importante de hidratos de carbono del suelo (Haynes et al., 1991). En el mismo sentido Ruks et al. (2004) indican que los elementos orgánicos capaces de producir uniones de partículas, son los productos de la síntesis producidos por los microorganismos, los productos de la descomposición provenientes de los restos orgánicos y sus propios tejidos. Así también Peele, citado por Black (1975b), comprobó que si se trata un suelo estéril con sacarosa y se le inocula una suspensión de suelo, se obtiene una notable adición de partículas en unidades estables al agua; esto no sucede cuando se omite la inoculación, lo que demuestra la importancia de la actividad microbiana en la génesis de la estabilidad.

La humedad y su variación en el suelo también afecta la estructura. Según Kemper y Rosenau (1986) los compuestos solubles, tales como carbonatos y moléculas orgánicas se concentran en la fase líquida cuando el suelo se seca. Los puntos de unión de las partículas son los que ofrecen menor energía libre para el soluto formado, y se encuentran con moléculas o iones de las uniones adyacentes, muchas de estas uniones forman tanto precipitados semicristalinos como compuestos inorgánicos amorfos en torno a estas partículas, consolidando su unión. Sin embargo, esta cementación es generalmente frágil, y una vez rota, no se forma hasta un nuevo proceso de humedecimiento y secado. A su vez debe considerarse la naturaleza catiónica en este proceso, dado que, tal como es reportado por Califra y Taro (1982), la cementación entre las micelas de arcilla y materia orgánica desciende según la valencia del ión, siguiendo la serie mono-trivalentes (Na^+ , Ca^{++} , Al^{+++} y Fe^{+++}). Es por eso que suelos con contenidos importantes de sodio generan una estructura pobre (Ruks et al., 2004).

Es conocido que durante el ciclo de cultivos las propiedades físicas, químicas y biológicas se deterioran, y su ritmo de erosión se acelera,

reduciendo su productividad (García Préchac, 1992). En este sentido Ponce de León y Capurro (1980) determinaron que el manejo de los suelos bajo cultivo produce el deterioro de la estabilidad estructural, y esta degradación se agudiza cuanto más intensiva sea la explotación del recurso. Si el ciclo de cultivos se interrumpe con la siembra de una pastura, en buena medida se está volviendo a una situación parecida a la natural (García Préchac, 1992). Así Haynes et al. (1991) encontraron que con la inclusión de pasturas, y la formación de un sistema radicular denso y ramificado, con el consecuente crecimiento de la biomasa microbiana, se producen grandes cantidades de hidratos de carbono, lo que produce un aumento de la estabilidad de los agregados. Estos hidratos de carbono son rápidamente degradados por la microflora del suelo, por lo que cuando se incluye un cultivo, con un sistema radicular menos abundante, la producción de agentes aglutinantes y de los hidratos de carbono se reduce y por lo tanto disminuye la estabilidad de agregados. También Panigatti y Hein, citados por Panigatti (1992), en un seguimiento de manejos contrastantes (pasturas vs. trigo-soja) en Argiudoles típicos encontraron un aumento progresivo de la estabilidad de agregados con la edad de la pastura y una brusca disminución en el comienzo del período agrícola.

Black (1975a) concuerda en cierta forma con lo anterior al señalar que los efectos de la materia orgánica son de corto y de largo plazo. Frente a un abundante suministro de materia orgánica descomponible, los filamentos microbianos y polisacáridos mucilaginosos pueden estabilizar las partículas minerales en pocos días; una estabilización continuada y de largo plazo con esta fracción necesita de una producción constante, pues no son muy resistentes a la descomposición (menos de 8 semanas). Sin embargo, la mayor parte de la materia orgánica de los suelos se ha acumulado a lo largo de muchos años y posee una vida media prolonga. La estabilización de esta fracción de la materia orgánica es, por lo tanto, un proceso a largo plazo.

En un trabajo inédito de Ernst y Siri, citados por Durán y García Préchac (2007) de rotaciones cortas y cultivos continuos, en el que se incluyen cultivo de sorgo o maíz en un caso y girasol o soja en otro como cultivos de verano, el peor valor de MWD (diámetro medio de agregados, luego de tamizados en seco) correspondió al cultivo continuo con laboreo convencional. La rotación de cultivos y pasturas con laboreo convencional y la rotación de cultivo con pastura pero con soja o girasol como cultivo de verano, mostraron valores intermedios y no diferentes entre ellos. Por último la rotación de cultivos y pasturas con SD y cultivos continuos con siembra directa y con maíz o sorgo como cultivos de verano presentaron los mejores valores sin diferencia entre ambos tratamientos. A su vez estos valores de MWD presentaron alta correlación con el contenido de CORG.

Las relaciones causa efecto son difíciles de determinar en sistemas complejos como lo es el suelo-planta. Los mejores rendimientos de los cultivos post-pasturas, fueron presentados por Voss y Shrader, citados por García Préchac (1992), para sucesivos cultivos, en donde el primer año de maíz en rotación, produjo rendimientos mayores que el maíz en cultivo continuo, independientemente del nivel de fertilización nitrogenada. Esto fue atribuido, entre otras causas, a mejoras en las propiedades físicas del suelo debidas a la rotación. La inclusión de leguminosas en rotación cultivo pasturas, además de la fijación de N al sistema también mejora las propiedades físicas del suelo, que permite una mejor exploración radicular y por lo tanto un mejor aprovechamiento del agua y nutrientes (Baethgen, 1992).

Pilatti et al. (1987), en un trabajo para cuantificar la mejora sobre las restricciones físicas y químicas de un suelo Argiudol ácuico del centro de Santa Fé, mediante la inclusión de pasturas semipermanentes, constataron que los sistemas radiculares fasciculados eliminaron el factor restrictivo mejorando la macroporosidad del horizonte B1 (32-37 cm) y de la parte superior del B21 (39-49 cm); en cambio las raíces pivotantes solo mostraron capacidad mejoradora en el B1; mientras que el tratamiento en el que el suelo se encontraba un período sin crecimiento radicular, presentaba los valores inferiores de macroporosidad. Asimismo se señala un incremento sustancial de la estabilidad de los agregados en agua, lo que se relaciona con la macroporosidad, y se atribuye a los aumentos de CORG, en los tratamientos con pasturas.

Cuadro 1: Análisis de agregados en un suelo franco-limoso bajo diferentes cultivos en Iowa.

Cultivo	% de suelo en agregados de diámetro > 0,25 mm
Maíz en monocultivo	33
Maíz en rotación Maíz-avena-trébol	42
Avena en rotación Maíz-avena-trébol	51
Trébol en rotación Maíz-avena-trébol	57
Alfalfa (pradera permanente)	60
Poa (Pradera permanente)	62

Fuente: Browning et al., citados por Black (1975b)

García Préchac (1992), en un experimento realizado con la inclusión de una secuencia de cultivos luego de una pastura de alfalfa y en el que se midieron algunas propiedades físicas como densidad aparente, macroporosidad, resistencia mecánica a la penetración y un índice combinado de estos parámetros, no encontró diferencias significativas en las propiedades físicas del suelo medidas en diferentes secuencias de cultivos, pero sí entre las diferentes duraciones de la etapa de cultivos. Luego del cuarto cultivo el deterioro fue significativo en todas las propiedades medidas.

En un trabajo realizado por el mismo autor, con la inclusión de pasturas de diferente composición con gramíneas y leguminosas, en un suelo de similares características al del experimento anterior, encontró una correlación entre las propiedades físicas medidas y la producción de materia seca acumulada de la pastura en toda su duración. A su vez si se considera solamente el componente gramínea, el coeficiente de correlación aumenta. Estos resultados sugieren que la recuperación de la estructura del suelo durante el ciclo de pasturas de la rotación, esta asociada a la productividad de la misma y principalmente al componente gramínea.

En el mismo sentido García Préchac (1992), en un experimento de larga duración iniciado en 1963 en La Estanzuela, indica menor densidad aparente y una mejor condición de estructura para los sistemas que incluyen pasturas, mientras que en los sistemas sin pasturas sucede lo contrario. A su vez, al mejorar la productividad de los cultivos por el agregado de fertilizantes, y por lo tanto aumentar el retorno de residuos al suelo, el valor de densidad aparente fue menor al sistema sin fertilización.

2.4 INFILTRACIÓN

La infiltración se define como el proceso por el cual el agua penetra por la superficie del suelo y llega hasta sus capas inferiores. Muchos factores del suelo afectan el control de la infiltración, así como también gobiernan el movimiento del agua dentro del mismo y su distribución durante y luego de la infiltración (Vélez et al., citados por Ruiz Estévez et al., 2004).

La velocidad de infiltración también es modificada por otros factores, como ser el espesor de agua empleado para el riego o lluvia, la temperatura del agua y del suelo, la estructura y la compactación, textura, estratificación, contenido de humedad, agregación y actividades microbianas (Gavande et al., citados por Ruiz Estévez et al., 2004).

También debe ser considerado dentro de los factores que afectan la infiltración en sistemas de rotación con pasturas, el efecto del pisoteo de animales. En este sentido Martino (2001) encontró que cuando se pastoreaba con ovejas de forma continua una pastura, en un suelo franco arcilloso la capacidad de infiltración de agua se redujo a un 58% de la del testigo sin pastorear. Sin embargo, cuando los animales fueron retirados cada vez que el suelo alcanzaba el límite plástico, el deterioro de las propiedades físicas fue mucho menos pronunciado que con pastoreo continuo.

A su vez, es propuesto el beneficio de las pasturas, a través del laboreo biológico, en modificar la tasa de infiltración del suelo. Tal es el caso de resultados preliminares obtenidos en La Estanzuela por Martino, citado por Martino (2001), en que se encontró que la alfalfa y la achicoria desarrollan sistemas de biocanales más profundos que los de festuca, trébol rojo y trébol blanco, y esto ha resultado en una mayor capacidad de infiltración de agua.

La cobertura continua del suelo, que fue mencionada con preponderante importancia en la conservación del contenido de carbono del suelo, y dado la vinculación entre estos factores, también tiene importancia como factor vinculado a la infiltración, no solo por los efectos indirectos a través de la mejora de la estructura producto de la materia orgánica, sino también por efecto directo, como se describe para el caso de suelos de texturas franco limosas, en estudios de infiltración realizados con lluvia simulada, (Marelli, 2001) concluye que:

- En suelos sin cobertura, la infiltración del agua es rápidamente limitada por el encostramiento superficial que se produce a partir de los primeros minutos de iniciada una lluvia de 60 mm/h de intensidad.
- Las cubiertas de residuo vegetal, son muy efectivas en evitar el encostramiento superficial y permitir un elevado nivel de infiltración inicial.

En un cultivo de soja de primera implantado con dos sistemas de labranza (siembra directa y laboreo reducido), y en una franja de alfalfa, todos con tres años de antigüedad, se obtuvieron datos de infiltración con dos anillos concéntricos de registración continua, e indican que hasta 20 minutos de iniciada la experiencia, el suelo bajo labranza presento los mayores valores de infiltración. Pero desde los 30 minutos en adelante, la relación se invierte y se estabiliza con valores superiores en siembra directa y alfalfa, indicando las ventajas de la cobertura de rastrojos y la de un estado estructural más estable que provoca la alfalfa y la siembra directa (Marelli, 2001).

El efecto beneficio de los sistemas radiculares de las gramíneas sobre las propiedades estructurales ya fueron mencionados previamente, por lo que es dable esperar beneficios en la captación de agua del suelo. Al respecto del efecto de las pasturas sobre la infiltración, Fontanetto y Keller (2001) encontraron en dos rotaciones forrajeras, la mejora de la infiltración, por efecto del aumento de la cantidad de poros medianos y a la estabilidad de los mismos lograda luego de 7 años de siembra directa y con predominio de gramíneas.

También en este sentido, Stewart (2009) indica que la materia orgánica y la arcilla tienen un rol importante en la infiltración, mediante la formación de agregados y en la resistencia de los mismos a ser desintegrados. Como resultado de los distintos tratamientos de residuos en un ensayo realizado en la Universidad de Oregon, encontró que el aumento de pequeñas cantidades de materia orgánica tiene un efecto sustancial en la tasa de infiltración. Por otro lado la remoción total de residuos del suelo, sumado a la no protección de la superficie del suelo (quemado de residuos) resultó ser el tratamiento con menor infiltración.

Por lo tanto la estructura del suelo tiene un destacado papel en la infiltración. Las unidades estructurales que no tienen una buena unión interna se desintegran con rapidez ante la energía producida por las gotas de lluvia. Las partículas finas de suelo liberadas, quedan retenidas cuando el agua penetra en el suelo y cierran los macroporos, reduciendo así la velocidad de infiltración (Black, 1975b).

Stewart (2009) menciona a la capacidad de la superficie del suelo para resistir el proceso de encostramiento como el factor más importante para controlar el escurrimiento y por lo tanto mejorar la infiltración. La formación de costra se da como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia, con la consecuente desintegración de los agregados en pequeñas partículas (arena, limo o arcilla) que se desplazan con el movimiento del agua, y se asientan formando una capa muy compacta y limitando la infiltración. Por lo tanto, para mejorar la infiltración según los autores, es muy importante mantener el suelo cubierto por residuos, más importante aun, que la formación de canales de raíz.

Fontanetto y Keller (2001) encontraron en dos rotaciones (trigo/soja-maíz y trigo/soja) con siembra directa, laboreo reducido y laboreo convencional; que la infiltración fue mayor en siembra directa, provocada esta diferencia, según los autores, debido a una mejor condición superficial del suelo, producto de una mayor cobertura de rastrojos, estabilidad de agregados y poros grandes y chicos principalmente. Mientras tanto, la secuencia no afectó la porosidad del suelo, por lo que la diferencia en infiltración debida a la secuencia de cultivos, si

bien no fueron presentadas, es esperable no sean muy relevantes, aunque existen diferencias en la rugosidad de la superficie debido a la cobertura del suelo por residuos.

2.5 FÓSFORO

El fósforo está presente en el suelo como parte de un ciclo y es representado por dos fracciones: fósforo orgánico e inorgánico

2.5.1 Fósforo total

Los contenidos del mismo guardan relación con el material de origen de los suelos. Los contenidos más altos están asociados a suelos de textura pesada y altos contenidos de materia orgánica (Abella y Nin, 2003).

Las dos fracciones -orgánica e inorgánica- en las que se divide el fósforo total en el suelo y que facilitan su estudio, en realidad forman parte de un único ciclo complejo (Smeck, citado por Abella y Nin, 2003).

2.5.2 Fósforo inorgánico

Los compuestos fosfatados presentes en los suelos tienen baja solubilidad, por lo que el contenido de fósforo en la solución del suelo es extremadamente bajo.

2.5.3 Fósforo orgánico

El fósforo orgánico en los suelos se encuentra bajo diferentes formas que pueden ser agrupadas en las siguientes fracciones:

2.5.3.1 Humus del suelo

Este elemento se encuentra formando parte de compuestos muy diversos, de diferente estabilidad, por lo que se los ha clasificado en fracción lábil y no lábil. Hernández, citado por Abella y Nin (2003) menciona valores de P en la materia orgánica del orden de 0.3 y 0.4% para suelos del Uruguay.

2.5.3.2 Restos frescos

Según Hernández, citado por Abella y Nin (2003) los restos frescos incorporados a un suelo pueden variar en contenidos del orden de 0,1 a 0,2 % de P en la materia seca.

2.5.3.3 Biomasa microbiana del suelo

El fósforo forma parte de las estructuras de los microorganismos del suelo. Morón y Kiehl (1992a) en el estudio realizado sobre dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay, encontraron valores de P en la biomasa microbiana del suelo que variaban promedialmente entre 7.45 y 22.78 μg de P g^{-1} .

La relación C/P de la fracción orgánica de los suelos osciló entre 84:1 y 253:1, con un promedio de 170:1 (Hernández et al., citados por Abella y Nin, 2003).

2.5.4 Dinámica del fósforo

Al esquematizar el ciclo del fósforo, Stewart y Sharpley, citados por Abella y Nin (2003) comparan la actividad microbiana con una rueda que se pone en movimiento en respuesta a las entradas de carbono. La marcha de la rueda podría enlentecerse o detenerse por una disminución en la entrada de carbono, por lo que el suministro de P para las plantas estaría limitado al P inorgánico lábil. Cuando la rueda está en marcha las plantas tienen mayor cantidad de P en solución pues éste está siendo repuesto desde formas inorgánicas y orgánicas lábiles.

La fracción lábil o disponible es la fracción de fósforo presente en fase sólida capaz de reponer el fósforo presente en la solución del suelo en la medida que disminuya su valor de equilibrio. La absorción por parte de las raíces de plantas en crecimiento disminuye constantemente la concentración de P respecto al valor de equilibrio (Abella y Nin, 2003).

Stewart y Sharpley, citados por Abella y Nin (2003), afirman que los métodos de análisis de P disponible presentan la desventaja de que sólo miden las formas inorgánicas, sin tener en cuenta la contribución de las formas orgánicas mineralizables y la historia de manejo previo.

La actividad microbiana aumenta la disponibilidad del P, y la mayoría de los análisis de suelo no reflejan esto, ya que solamente miden el P inorgánico (Abella y Nin, 2003).

Dalton et al., citados por Abella y Nin (2003) estudiaron el efecto de la materia orgánica en la disponibilidad de los fosfatos. Los resultados muestran que la materia orgánica agregada al suelo provoca un aumento de la solubilidad

del fosfato presente en el suelo. La materia orgánica de fácil descomposición resulta más efectiva que las sustancias orgánicas de descomposición lenta.

El fósforo orgánico es la fracción que presenta mayor disminución cuando se realizan cultivos continuos laboreados sin fertilización. La aplicación de fertilizantes fosfatados no detiene esa disminución, mientras que sí aumenta la concentración de P inorgánico (Morón y Kiehl, 1992a), mientras que la inclusión de pasturas en la rotación permite mantener el contenido de P orgánico.

Según Morón (2003) cuando se cultiva un suelo vírgen el P orgánico es el principal afectado. La fertilización no evita la disminución del P orgánico, y generalmente produce un aumento del P inorgánico. No se verificó cuánto de la disminución del P orgánico es producto de la mineralización y cuánto es causado por erosión.

En un trabajo de Parton et al., citados por Abella y Nin (2003) se estudió en un modelo de simulación el impacto de cultivar un suelo sin fertilizar durante 100 años, considerando erosión nula. El P orgánico disminuye marcadamente hasta aproximadamente 60 años, mientras que el P inorgánico se muestra poco afectado.

El P puede ser perdido en solución por lixiviación dentro del perfil del suelo, en solución por escurrimiento superficial y en las partículas de suelo por escurrimiento superficial, procesos que ocurren naturalmente pero que aumentan de manera significativa cuando el hombre utiliza el suelo (Abella y Nin, 2003).

El fósforo es uno de los elementos que más limitan la reproducción y la productividad, dado que en general las concentraciones de P en los organismos son superiores a aquellas de donde es retirado. En las regiones subtropicales, debido a las reacciones de adsorción con el coloide, el P es limitante para la agricultura, exigiendo mayores adiciones de fertilizantes fosfatados (Colozzi Filho et al., 2001).

Las raíces de las plantas toman el fósforo desde la solución del suelo y dado que esta concentración normalmente es inferior a la necesaria, se torna un factor limitante en la absorción (Lindsay, citado por Morón, 1992b).

El fósforo en la fase sólida puede dividirse en dos grandes grupos: inorgánico y orgánico, y para desarrollar un conocimiento más comprensivo de

la dinámica del mismo en el ecosistema suelo es necesario integrar esas dos aproximaciones (Smeck, citado por Morón, 1992b).

El contenido de fósforo orgánico en los suelos varía considerablemente, oscilando entre el 20 y el 80 % del fósforo total en el horizonte superficial del suelo (Dalal, citado por Morón, 1992b).

El contenido de P orgánico es medido por el incremento que se produce en la fracción inorgánica cuando el P orgánico es convertido en ortofosfato (Morón, 1992b).

En un modelo de simulación, en el que se incluye la dinámica de C, N, P y S, en el submodelo de fósforo, Parton et al., citados por Morón y Kiehl (1992a) dividen la fracción orgánica en tres fracciones:

- a) una fracción activa, constituida por la biomasa microbiana y metabolitos. Con una relación C/P variando de 30 a 80 y un valor de “turnover time” de 2 a 4 años,
- b) una fracción protegida física y químicamente que es más resistente a la descomposición, con un “turnover time” de 20 a 50 años,
- c) una fracción que es química y físicamente protegida y que tiene un largo “turnover time”: 800 a 1200 años. Con una relación C/P de 20 a 200.

En un estudio que resume los resultados del sistema de rotaciones de larga duración de INIA Morón (2003) señala que el balance de P total de suelo revela a la erosión como la principal vía de pérdida. En el sistema más extractivo de agricultura continua sin fertilización, la fracción orgánica del mismo fue la que presentó mayor disminución, la fertilización no detuvo esa pérdida, mientras que con la inclusión de pasturas se logra mantener el nivel de fósforo orgánico.

En el mismo trabajo en cuanto al P disponible (Bray I, Resinas) se reporta una marcada disminución en el sistema más extractivo de agricultura continua sin fertilización, valores superiores en el sistema de agricultura continua con fertilización, mientras que en el sistema que incluye pasturas en la mayoría de los casos presentó valores inferiores al sistema anterior.

En el experimento de larga duración de La Estanzuela Moron y Kiehl (1992a) encontraron que en el sistema de agricultura continua sin fertilización la erosión fue la principal vía de salida de P del sistema, con pérdidas 2,6 veces superiores a la extracción por los cultivos. De todas maneras, la extracción por parte de los cultivos es dependiente de la rotación empleada ya que datos de extracción muy importantes fueron reportados por Siri y Ernst¹ en un experimento de larga duración, en el que se incluye sorgo dulce en diferente proporción, y se cuantificó una concentración de fósforo de 0,39; 0,87 y 2,73 g Kg⁻¹, en tallo, hoja y grano respectivamente. Este resultado, cuando es multiplicado por la producción de materia seca de sorgo, arroja una remoción de P de entre 19,3 y 22,6 kg.ha.año⁻¹ en el periodo 2005-2009 para las rotaciones que incluyen sorgo continuo.

En cuanto al efecto de los cultivos sobre el nivel de P, Morón (1992b), en un suelo que previamente soporta vegetación nativa o pastura, revela que estos alteran el equilibrio, lo que generalmente provoca una reducción del P total.

De acuerdo con lo anterior Haas et al., citados por Morón (1992b) en un experimento estudiando el efecto del agregado de estiércol, encontraron después de 33 años, una reducción del P total de 9% en la rotación de cultivos sin fertilizante, mientras que el agregado de 6,2 a 12,3 kg de P/ha/año de estiércol de ave, elevó el mismo parámetro en 14 %. El P inorgánico no fue influenciado por la rotación, en cambio el P orgánico fue reducido en promedio 35 % comparado en el suelo vírgen. La incorporación de estiércol incrementó el contenido de P inorgánico pero no tuvo efecto en reducir las pérdidas de P orgánico. La rotación de cultivos sin agregado de estiércol presentó una tendencia a aumentar los niveles de P disponible-Olsen, y cuando se agregaba estiércol, los valores aumentaban casi 5 veces sobre el suelo vírgen.

En el mismo sentido Tiessen et al., citados por Morón (1992b), estudiaron el efecto de los cultivos con bajo agregado de fertilizante, sobre la pérdida de P; luego de 60 a 70 años el P total disminuyó 12 % la concentración, mientras que el P inorgánico no presentó variaciones significativas, quedando explicado esta disminución por la fracción orgánica del P total.

El mismo autor en un suelo más liviano al anterior encontró disminuciones mayores del P total y a su vez disminuciones de las dos fracciones, tanto orgánica como inorgánica.

Sharpley y Smith, citados por Morón (1992b), analizaron las cantidades relativas y la distribución de las distintas fracciones de P en suelos vírgenes en

comparación con los mismos suelos cultivados y fertilizados, encontrando que el cultivo y la fertilización provocan aumento en el P total e inorgánico y una disminución de P orgánico. Promediando los cambios para 8 suelos en los 15 cm superficiales encontró: +25% en P total, + 118 %en P inorgánico y – 43%en P orgánico, mientras que el subsuelo era relativamente no afectado por los cambios.

Morón y Kiehl (1992a) encontraron en el sistema 1 de agricultura continua sin fertilización, del experimento de larga duración de La Estanzuela, una disminución del P inorgánico aunque menor que la disminución de la fracción orgánica, dentro de la fracción inorgánica la mayor disminución se debió a las fracciones ligadas al Fe y Al, mientras que la fracción P-Ca, fue la menos afectada debido a que las primeras pertenecen a una granulometría mas fina y por lo tanto más susceptibles a la erosión.

En el mismo experimento pero en el sistema 2 de agricultura continua con fertilización Morón y Kiehl (1992a) encontraron que la concentración de P disponible-Bray I aumentó con el tiempo, acompañando la tendencia general de la fracción inorgánica, mientras que para el sistema 5 en rotación cultivo-pastura, si bien presentó una evolución creciente, para la mayoría de los años los tenores de P Bray I, fueron inferiores al sistema 2. Como explicación de lo anterior Bowman y Cole, citados por Morón y Kiehl (1992a) indican que la consideración del P disponible (Bray I o Resinas) como indicador de la evolución de los sistemas, debe ser observado en forma relativa, dado que la fracción P orgánico también puede contribuir a la disponibilidad de ese elemento, principalmente en suelos bajo pasturas. Asimismo indican al método Olsen modificado capaz de medir compuestos lábiles del P orgánico. Señala el autor que para P Bray I es explicado la mayor parte de su variación (93%), por las fracciones P Al y P Fe, lo que denota la estrecha relación con el P inorgánico. En cuanto a la disponibilidad de esta fracción para las plantas Colozzi Filho et al. (2001) encontraron que cuando son mejoradas las condiciones para el desarrollo y actividad microbiana mediante el agregado de residuos vegetales, aumenta la biomasa microbiana y con ello mayores cantidades de C, N y P y otros nutrientes están siendo transitoriamente inmovilizados en los tejidos microbianos, evitándose pérdidas de nutrientes por lixiviación, fijación u otras, que posteriormente pueden ser mineralizadas y ser disponibles en el sistema suelo-planta.

Mediante la inclusión de pasturas fertilizadas, Russell, citado por Morón (1992b), en un experimento realizado en Australia donde se pastoreó con ovejas, encontró que los tratamientos fertilizados con 483 kg de P/ha en el periodo 1926-1957 y pastoreados, tuvieron un incremento de materia orgánica y

de todas las fracciones de P. Según el autor, la evolución del P orgánico parece ser más relacionada al contenido de materia orgánica que a las fuentes y niveles de P aplicados.

Morón (1992b) en síntesis de varios autores establece que la fase de pasturas mejoradas induce a un importante aumento en el contenido de P orgánico en el suelo. En cuanto a la importancia de esta fuente de P para las plantas, Zamalvide (1992) señala que luego de un período de mineralización de compuestos orgánicos, la disponibilidad de P aumenta significativamente para las plantas.

En un trabajo realizado por Batten et al., citados por Morón (1992b) en un estudio de residualidad, en que previamente pasó por una fase de cultivos y pasturas ambos fertilizados con P, se constató un aumento en el P total así como en las fracciones no ocluidas del P inorgánico. El P Al fue el que más aumentó por kg de P agregado. Luego, durante la fase residual de pastura, mientras el P orgánico se incrementaba, el P Al y el P disponible Bray I disminuían su contenido.

En la fase de pasturas la fracción inorgánica se ve sometida a una competencia con la fracción orgánica por el P soluble, siendo parte de esta fracción mineralizable rápidamente y con rápido reciclaje (biomasa microbiana) (Morón, 1992b).

Cuando un suelo está ganando cantidades significativas de materia orgánica, debe pagarse un costo en P asimilable que quedará inmovilizado (por los menos transitoriamente) en la misma, la cuantificación de ello en forma de referencia, podría ser de 32 kg de P_2O_5 en un período de pasturas. Esto supondrá tener que agregar más fertilizante que en una situación sin cambios o con pérdida de materia orgánica. Mientras que en el caso contrario en la etapa de cultivos, en la medida que se de una caída de la materia orgánica, se espera un aporte adicional de P proveniente de la mineralización de P orgánico (Zamalvide, 1992).

2.6 POTASIO

La mayoría de los nutrientes de las plantas se encuentra en los residuos, ejerciendo una función estructural o como sustancia de reserva. El potasio es requerido en grandes cantidades, igualando a las de nitrógeno y llega a ser tres o cuatro veces mas que las cantidades de fosforo acumulado en los residuos vegetales (Rodrigues y Pereira, 2008).

El potasio es absorbido por las plantas fundamentalmente bajo la forma de ion K^+ de la solución del suelo. La concentración de K en la solución requerida para las plantas es variable, y depende del tipo de cultivo y el potencial productivo (Hernández, 1992).

En cuanto a los factores que afectan la disponibilidad de potasio para las plantas, el contenido de agua es uno de los que ha tenido mayor investigación. Black (1975a) sostiene que la disponibilidad del potasio aumenta con el contenido de agua del suelo, dado que tanto la proporción del volumen del suelo en que puede darse la difusión del K, como el volumen de agua que puede transportar potasio a las raíces aumenta con el volumen de suelo que ocupe el agua. También se sostiene otra teoría basada en observaciones de Schuffelen citado por Black (1975a) que explica esa mayor disponibilidad de potasio para las plantas en suelo húmedo, debido a un aumento relativo del potasio respecto al magnesio y al calcio (cationes que afectan la absorción de potasio), cuando el suelo se humedece.

Las necesidades de K para un óptimo crecimiento se encuentra en el rango de $20-50 \text{ g.Kg}^{-1}$ de materia seca de partes vegetativas de plantas, frutas y tubérculos, sin embargo, las plantas tienen la posibilidad de absorberlo en cantidades por encima de las requeridas, lo que se conoce como consumo de lujo (Meuer, citado por Rodrigues y Pereira, 2008).

Las fases de K en el suelo se dividen en: potasio solución (K_s), potasio intercambiable (K_i) y potasio no intercambiable (K_{ni}). Éstas se encuentran en equilibrio dinámico, el cual se modifica por las entradas de K al sistema, a través de la fertilización y por los residuos de cosecha, y por las salidas del mismo mediante la absorción de K por los cultivos. La modificación de los reservorios anteriores depende de la capacidad amortiguadora de K del suelo (Rodríguez, citado por Agudo et al., 2002)

El ión (K^+) es retenido por atracción electrostática en coloides del suelo cargados en forma negativa. Los cationes retenidos de esta forma son fácilmente desplazados o intercambiados; a esta fracción se le denomina K intercambiable (Hernández, 1992).

La capacidad de intercambio catiónico que a su vez es afectado por la materia orgánica, puede modificar la disponibilidad de K para las plantas, según la siguiente función que se ajusta para suelos de Ohio (Hernández, 1992).

$$K_{int} = 0,281 + 0,00639 \text{ CIC}$$

Otro factor mencionado por el mismo autor en referencia a la disponibilidad de K para las plantas, es la aeración e indica que altos niveles de humedad y la compactación del suelo disminuyen la tasa de difusión de oxígeno y la absorción de K y otros nutrientes.

Estudios realizados por Schmitz y Pratt, citados por Hernández et al. (1998), comprobaron que el valor de potasio intercambiable en suelos poco alterados es un buen indicador del K liberado por el suelo durante varios años de cultivo. Sin embargo, en suelos medianamente a muy alterados, la correlación entre formas intercambiables y la liberación de potasio durante el mismo período de tiempo fue muy baja. En tal sentido Hernández et al. (1998) identificaron que las formas de K no intercambiables explican mayoritariamente las diferencias en absorción por plantas de raigrás en sucesivos cortes, mientras que el K intercambiable se ajustó para los primeros cortes, esto según el autor indicaría que la primera fracción correlaciona mejor que la segunda para sistemas muy extractivos de este nutriente. Esto puede explicar la falta de certeza en el valor crítico de K intercambiable en diferentes suelos y bajo diferentes manejos de extracción (Bautés et al., 2009).

Thomas y Hipp, citados por Hernández et al. (1998) consideran que el equilibrio entre las formas intercambiables y solución toma gran importancia en la nutrición potásica de las plantas durante una estación de crecimiento, en tanto que para mantener niveles adecuados de absorción durante periodos largos de tiempo es de mayor importancia el nivel de equilibrio entre K intercambiable y K no intercambiable.

En un experimento realizado en Hawaii, donde se cultivaron especies gramíneas en forma continua durante algo más de 2 años y se efectuaron mediciones del K absorbido, y la suma del potasio intercambiable y soluble en los 92 cm superficiales del suelo, se encontró que si bien disminuyó el contenido de K intercambiable (lo que concuerda con la teoría de que las plantas obtienen el K de las formas intercambiables) esa disminución fue muy pequeña en comparación con el K absorbido por las plantas, lo que aporta pruebas de que el la mayoría del potasio absorbido por las plantas provenía del potasio no intercambiable que reponía la fracción intercambiable (Black, 1975b).

Los niveles de absorción de potasio deben ser evaluados en función de los niveles de extracción y reciclaje, capacidad de suministro por el suelo, así como por su frecuencia en el tiempo. La mayor parte de los cultivos de cereales y pasturas bajo pastoreo, permiten un elevado reciclaje, a través de los restos y de los animales. No sucede lo mismo cuando el reciclaje no se produce en la superficie explotada (Casanova, 1996). En este sentido el autor cita como

cultivos de alta extracción: caña de azúcar, papa, tomate, vid, citrus, alfalfa, pradera henificada y maíz para silo.

El crecimiento de la agricultura, que se ha dado no solo en una mayor área, sino también por una intensificación de la rotación en las zonas tradicionalmente agrícolas, sumado a un aumento del rendimiento de los cultivos, crea una mayor extracción de nutrientes, dándose para los nutrientes que no son agregados, como es el caso del potasio, un balance claramente negativo. Este balance podría producir disminuciones en el K del suelo, y en algunos suelos llegar a valores limitantes para el desarrollo de los cultivos (Núñez, 2010).

La erosión también es considerada como pérdida de potasio para el sistema, Lipman y Conybeare, citados por Black (1975a) calcularon en 158 kg/ha la pérdida anual de potasio por esta vía, en las tierras cultivadas de E.U.A

En cuanto a los suelos, Casanova (1996) indica que mientras los de textura arenosa, baja CIC y formado sobre materiales pobres en potasio no serán capaces de sostener adecuados aportes de potasio en sistemas de elevada extracción; en condiciones de suelo no tan extremas, mostrarán problemas de suministro frente a sistemas de elevada extracción, a partir de varios ciclos productivos. Mientras tanto Hernández et al. (1998) en un estudio de 13 suelos de Uruguay, encontraron que la capacidad de suministro de potasio en el corto y largo plazo presentaba diferencias importantes entre suelos. Según los autores, los suelos se diferencian no solo por la capacidad de suministrar potasio, sino también en la capacidad de mantener el suministro en el tiempo y en la respuesta a la fertilización.

Tres años de alfalfa, produciendo 21 t/ha, son capaces de extraer más de 400 kg/ha de K, mientras que un maíz para silo de 20 t/ha de MS, extrae aproximadamente 300 kg/ha de K. La repetición en el tiempo de un sistema con alta proporción de los cultivos anteriores, puede agotar las reservas de potasio, aún en suelos de elevado suministro inicial (Casanova, 1996). Así también según Black (1975a) la mayor parte del potasio de las plantas se encuentra en las partes vegetativas y subterráneas; cuando estas son removidas del sistema, el potasio del suelo se agota rápidamente.

Siri y Ernst¹ en un experimento de larga duración, en el que se incluye sorgo dulce en diferente proporción, determinaron una concentración de 11,7; 10,7 y 4,7 g Kg⁻¹, para tallo, hoja y grano de potasio respectivamente. Este resultado cuando se multiplica por la producción de materia seca de sorgo,

arroja una remoción de potasio de entre 972 y 1148 kg/ha en el periodo 2005-2009 para las rotaciones de sorgo continuo.

En tal sentido Morón y Baethgen (1996a) en un relevamiento que comprendió suelos dentro del área de influencia de Conaprole de Libertad, Villa Rodríguez, Tarariras, San José, y San Ramón; y además la zona de Young encontraron que aproximadamente el 50 % de los cultivos muestreados (maíz para silo) en ambas regiones presentaba niveles sub-óptimos de K en planta. Lo que fue explicado por los autores por el hecho de la alta extracción del nutriente en el sistema utilizando heno y silo para reservas y además por la no fertilización con potasio por parte de la gran mayoría de los productores.

Grimes, citado por Black (1975b) en experimentos realizados sobre suelos franco-limosos, encontró que el Kint puede disminuir mucho en una estación de crecimiento. Desde primavera hasta el otoño el Kint disminuyó a 50 µg por gramo de suelo de un suelo con alto contenido (125µg). También registró disminuciones muy importantes, más aun que las anteriores después de una pradera destinada a heno. El autor indica que dado que la parte aérea se retira y muchas de las raíces de la pastura perenne se mantienen vivas, existe poca devolución de K al suelo por los residuos vegetales.

En base a estos resultados concluye, en cuanto al concepto general del ciclo que cumple el potasio en sistema suelo-planta: las plantas extraen K de la solución del suelo y de la forma intercambiable, que constantemente se aproxima al equilibrio con la solución. Si hay amplio suministro de potasio en estas formas es posible satisfacer la demanda total derivada del crecimiento vegetal. Cuando en la solución del suelo y los sitios de intercambio catiónico se comienza a agotar el K, este se libera de la forma no intercambiable pero la liberación cesa casi por completo en cuanto las plantas dejan de extraer.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DEL ENSAYO

El experimento está localizado en la estación experimental Dr. Mario A. Cassinoni, ubicada 10 km al sur de la ciudad de Paysandú, Uruguay. El clima es meso termal sub-húmedo con temperatura media anual de entre 18,4°C; el mes más cálido de la localidad es enero con una temperatura media de 25 °C y julio el más frío con un promedio de 11,9 °C .La precipitación anual promedio es de 1240 mm con distribución positiva de las lluvias hacia el período entre noviembre y abril; el mes más lluvioso es abril con 158 mm y el menos lluvioso agosto con 55 mm.

Las muestras fueron sacadas en el verano de 2009/10, en las parcelas del ensayo ubicadas en el potrero 34 de la estación experimental.

El suelo del experimento perteneciente a la unidad San Manuel es un es un Argiudol típico, con un espesor de 70 cm de profundidad y 1% de pendiente. Según el compendio de suelos del Uruguay sus materiales generadores son sedimentos limosos con niveles calcáreos similares a los de unidad Fray Bentos.

El experimento se inició sobre campo reestablecido con predominancia de gramíneas estivales en agosto del 2005.

3.2 EXPERIMENTO

El experimento pretende detectar el efecto de la inclusión de sorgo dulce en distintas proporciones, sobre algunas propiedades físicas y químicas del suelo, luego de 4 años de instalado.

3.2.1 Diseño experimental

El diseño corresponde a bloques al azar con dos repeticiones. La unidad experimental es de 100 m² (20 × 5 m).

3.2.2 Tratamientos

Se evaluaron 4 tratamientos compuestos de:

- 1) sorgo dulce continuo sin cultivo de cobertura invernal (SDCsc).
- 2) sorgo dulce continuo con cultivo de cobertura invernal (SDCcc).
- 3) rotación corta sorgo dulce- pastura, con 2 años de pastura
- 4) rotación larga sorgo dulce- pastura, con 4 años de pastura.

Los tratamientos 3 y 4 con inclusión de pasturas se realizaron desfasadas en el tiempo para que todos los años haya sorgo dulce en algunas de las parcelas del tratamiento.

Cuadro 2: Rotación en los años evaluados según tratamiento.

Tratamiento	2005	2006	2007	2008	2009
1	S	S	S	S	S
2	S/V	S/V	S/V	S/V	S/V
3	V	S	V	S	V
3	S	V	S	V	S
4	S	P1	P2	P3	S
4	P1	P2	P3	S	P1
4	P2	P3	S	P1	P2
4	P3	S	P1	P2	P3

Para la cobertura invernal se siembra avena común (*Avena sativa* L.) luego de cosechado el sorgo en el tratamiento 2; en el tratamiento 4 la pastura utilizada es una mezcla de especies perennes compuesta de: lotus (*Lotus corniculatus* L.), trébol blanco (*Trifolium repens* L.) y festuca (*Festuca arundinacea* L.) en tanto en el tratamiento 3, la pastura estuvo compuesta por las mismas especies que en el anterior pero además se incluyó avena común. Las pasturas perennes y las coberturas se siembran en otoño, luego de cosechado el sorgo dulce.

La siembra tanto de las pasturas como del sorgo se realiza bajo siembra directa.

El sorgo es sembrado en noviembre de cada año, con una distancia entre hileras de 50 cm. El material genético sembrado fue la variedad M81-E con el objetivo de lograr 14 plantas m². El control de malezas fue realizado a la

siembra con una única aplicación de Atrazina con Dual (1.2 Kg + 1.4 l ha⁻¹), habiéndose tratado la semilla con Concept (protector).

La fertilización de P fue de 46 kg de P₂O₅ en la instalación de cada sorgo y pastura. Las pasturas no fueron refertilizadas.

El N fue fertilizado según análisis de suelo, siendo por lo tanto variable entre años, con un promedio de los 4 tratamientos 118 kg de N ha⁻¹ año⁻¹. Las pasturas y las coberturas no fueron fertilizadas con este nutriente.

La cosecha del sorgo consistió en el corte a 10 cm del suelo con machete y la remoción completa de la biomasa, en el caso de las pasturas fue cortada con rotativa cada vez que alcanzaba una altura entorno a los 18 cm y no se removió la biomasa.

3.3 DETERMINACIONES

Fueron realizadas las mediciones de:

1. Carbono orgánico del suelo (COS), determinado usando la técnica de Walkey y Black (Nelson y Sommers, 1982).
2. Fósforo, mediante el método de extracción Bray I.
3. Potasio intercambiable.
4. Infiltración a través del método de doble anillo.
5. Estabilidad de agregados (MWD).

Las determinaciones 1, 2, 3 y 4 se realizaron en las siguientes profundidades: 0-10, 10-20, 20-40, 40-60. Estabilidad de agregados con muestras a 5 cm de profundidad.

3.3.1 Herramientas y criterios para las mediciones

3.3.1.1 N total, P bray 1, K intercambiable, carbono total

Fueron muestreadas con calador, 20 sub.-muestras por parcela de 0-10, 10-20. Para las muestras más profundas se hicieron 6 sub.-muestras por parcela. Fueron todas secadas en estufa a 55 °C por 48 hs luego molidas y tamizadas en malla de 2mm, luego enviadas al laboratorio para las determinaciones correspondientes.

3.3.1.2 Tiempo de Infiltración

Se enterraron, hasta que no exista pérdida de agua lateral, 3 cilindros plásticos de 10, 16 cm de diámetro por parcela, Por fuera de estos, otros 3 cilindros de 12,7 cm. de diámetro fueron colocados con el mismo criterio de profundidad que los anteriores. Al cilindro externo se le agrega agua para que mantenga un cierto nivel, al cilindro interno se le hacen dos agregados de 450 mm cada uno, para determinar el tiempo de infiltración 1 y tiempo de infiltración 2 respectivamente. En la infiltración 1 se toma el tiempo que transcurre desde la aplicación del volumen de agua antes dicho, y la completa infiltración del mismo. Para la infiltración 2 se toma el mismo criterio excepto si el tiempo requerido es mayor a 40 minutos, donde se mide la columna de agua restante que no llegó a infiltrar.

3.3.1.3 Estabilidad de agregados

Para evaluar estabilidad de agregados al agua (EAA), muestras de suelo fueron tomadas en diciembre usando el procedimiento de Yoder del año 1936, modificado por Kemper y Rosenau (1986). Cinco muestras por parcela de 0-10-cm de profundidad fueron tomadas y secadas a la sombra por 10 días. Luego agregados entre 4.5 y 9.5 mm fueron separados a mano. Una submuestras de 30 g fue utilizada para calcular la EEA. Se utilizaron mallas de diferentes calibres (4.5, 2.8, 2.0, 1.0, 0.6 y 0.3 mm) donde se introducían en el agua por 15 min y con 40 oscilaciones por minuto. El suelo que quedaba en las diferentes mallas fue secado a 105°C por 48-h y pesado. La estabilidad de agregados al agua fue calculada como media de los diámetros de los agregados (MWD).

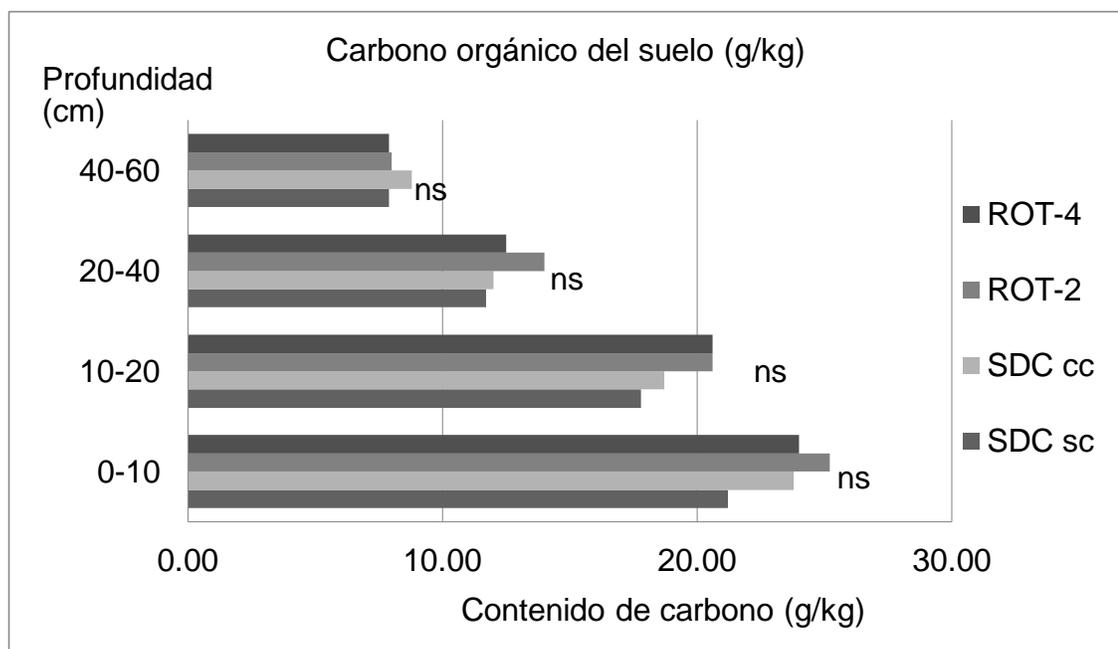
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se analizó el efecto de los diferentes tratamientos sobre las diferentes variables medidas. Los efectos aleatorios fueron las repeticiones conjuntamente con sus interacciones con los efectos fijos (tratamientos). La separación de medias se realizó a través de la MDS al 10 % de probabilidad de error. Los resultados fueron analizados utilizando el PROC mixed Statistical Analysis System (versión 6.11 del año 1996 del SAS Institute).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARBONO TOTAL

El efecto de los distintos tratamientos sobre el carbono orgánico del suelo (COS), no produjo cambios con diferencias significativas entre las distintas rotaciones, como se aprecia en la figura 1.



Referencias: SDCsc= Sorgo Dulce Continuo sin cultivo cobertura, SDCcc = Sorgo Dulce Continuo con cultivo cobertura, ROT-2= rotación 1.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce, ROT- 4 = rotación 3.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce.

Figura 1: Concentración de carbono orgánico del suelo según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad) dadas las diferentes alternativas en la intensidad del sorgo dulce, luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).

No obstante, existe una tendencia de los tratamientos, a diferenciarse en los primeros 10 cm, donde el sistema de sorgo continuo sin cobertura (SDC sc) presenta el menor valor y las rotaciones que incluyen pasturas los más

altos. Esta tendencia con respecto a las pasturas, se reduce en el sistema de sorgo continuo con cobertura (SDC cc), dado esto por: las diferentes entradas de carbono entre ambos sistemas, a través de la mayor producción de raíces dado la mayor producción del sorgo dulce en el sistema con cobertura y además por el aporte de carbono de la cobertura¹. En segundo lugar existe una diferencia en las pérdidas por erosión, que fueron calculadas en 1,5 ton de suelo/ha/año menos de este sistema con respecto a SDC sc y presentados en la figura 1.

El tratamiento SDCcc , se mantiene con un nivel muy similar de carbono total a los sistemas que rotan con pastura, este hecho posiblemente se deba a que se reduce la erosión mediante la cobertura invernal con un cultivo de crecimiento inicial rápido, como la avena, pero además debe ser considerado el aporte de la biomasa radicular del sorgo, que estimada a partir de datos presentados por Siri y Ernst¹, es de aproximadamente 4,5 ton/ha/año, lo que se asemeja a la producción de raíces de las pasturas plurianuales (Formoso, 2010). Si bien en el caso de las pasturas del experimento, además del aporte radicular existe el aporte a través de la biomasa aérea, dado que esta fue cortada pero no removida; debe tenerse en cuenta que estos restos orgánicos son más susceptibles a la mineralización debido a su relación C/N baja, por lo que si bien estarían aportando mayor cantidad de biomasa, esta tendría una mayor tasa de mineralización con respecto a los residuos aportados por el sorgo dulce, por lo que las diferencias medidas a través del COS se atenúan (Morón y Sawchik, citados por Morón, 2003).

Cuadro 3: Pérdida de suelo por erosión estimada a través del software Erosión 5.91.

Tratamiento	Erosión estimada (ton/há/año)
1	4,9
2	3,4
3	1,2
4	0,9

En ningún tratamiento se estimó una erosión por encima del nivel de tolerancia (5 ton/há/año). Esto demuestra la baja erodabilidad del suelo en estudio. No obstante la erosión estimada a través del modelo subestima la real, puesto que el nivel de rastrojo, luego de la cosecha del sorgo dulce, es muy escaso y no es posible contemplarlo en el modelo.

Además del efecto de las pasturas en las ganancias, dadas por su elevada relación raíz/parte aérea, también debe considerarse en las pérdidas (figura 1) ya que a mayor proporción de pasturas permanentes en una rotación, mayor es el tiempo que el suelo permanece cubierto y por lo tanto menor pérdida de COS por erosión (Lal et al., citados por Ernst y Siri, 2009). Este es posiblemente el principal factor que ocasiona la tendencia observada en los primeros 10 cm de suelo, donde se observa que los sistemas con mayor proporción del tiempo con suelo cubierto (ROT-2 y ROT-4) tienen la tendencia más positiva con respecto al COS. Esta tendencia va desapareciendo en profundidad, dado que la erosión hídrica afecta la capa más superficial.

Dado que fue medido el carbono total, la tendencia es atenuada. Este es un indicador menos sensible a los cambios que otros indicadores como el carbono de la materia orgánica particulada (C-POM), por lo que si bien no existen diferencias significativas en cantidad de carbono, es esperable diferencias más acentuadas en calidad (Morón, 2003). Si bien el sorgo dulce hace un aporte muy importante en carbono a través de su sistema radicular dada su alta producción, este aporte de carbono no es acompañado de una ganancia de nitrógeno en el sistema, por lo que ese carbono es respirado hasta alcanzar la relación C/N del suelo (Díaz Rosselló, 1992a).

Producto de lo anterior es necesario considerar que en los sistemas que incluyen pasturas, existe una mayor pérdida de carbono vía mineralización en comparación con los sistemas de agricultura continua (Morón y Sawchic, citados por Morón, 2003), tal como es el caso del sorgo dulce continuo en los sistemas 1 y 2. Esta mayor pérdida esperada en los sistemas ROT-2 y ROT-4 es deseada dado que se refleja en diferente tasa de mineralización del carbono remanente y por lo tanto en el mayor aporte de nutrientes con fase orgánica (Ernst, 2000) por lo que se esperarían mayores producciones de biomasa en estos sistemas. No obstante esta mineralización opera en las pérdidas de carbono en el suelo, y por lo tanto hace que para ser posible la detección de estos cambios, deba pasar un período mayor de tiempo.

Estos cambios en el contenido de carbono total del suelo, están determinados por factores tales como la mineralogía del suelo, la estructura y el sistema de laboreo empleado, entre otros factores (García Préchac, 1992). Es por esto que si el experimento planteado fuera desarrollado en un suelo de textura más gruesa, cuyo carbono es más sensible a ser mineralizado, y con mayor riego de erosión debido a la estructura más débil, las diferencias entre los tratamientos quizá ya hubieran sido detectadas mediante el indicador carbono total.

Cuando se incorporan restos vegetales de elevada relación C/N, como es el caso del sorgo, estos tienen mejores posibilidades de ser humificados. No obstante, deben ser acompañados por aportes de nitrógeno para tal fin, ya sea, realizado a través de la fertilización o mediante FBN. En el primer caso, dado que el N está sujeto a mayores posibilidades de pérdida por diferentes vías, la humificación es menos efectiva (Díaz Rosselló, 1992a). Por lo tanto en los sistemas de sorgo continuo que no exista aporte de nitrógeno vía FBN, se perderá además de nitrógeno, el carbono respirado necesario para ese aporte de nitrógeno. Estos sistemas altamente extractivos, como lo son el SCcc y SCsc, exportan entre 97 y 115 kg de nitrógeno/ha/año (Siri y Ernst¹) sumadas además a las mayores pérdidas por erosión, generan grandes pérdidas de nitrógeno del sistema, lo que provoca en definitiva una disminución sostenida de la materia orgánica del suelo (Baethgen, 1992).

Los cultivos de sorgo dulce en el presente experimento son fertilizados con nitrógeno, pero esta vía de aporte no asegura una incorporación de nitrógeno orgánico. Este es incorporado a la fase orgánica, si la capacidad de las plantas para generar nitrógeno orgánico supera a la producción de nitrógeno mineral por parte de los microorganismos (Black, 1975b), por lo que si bien el balance es más favorable que en sistema sin fertilización, este aporte continua siendo poco relevante (Díaz Rosselló, 1992a).

En contrapartida, en el caso de las pasturas, además de existir un aporte de carbono a través del sistema radicular, hay un aporte de nitrógeno vía FBN por parte de las leguminosas, lo que posibilita la ganancia de ese carbono en el suelo y a su vez con una relación C/N más favorable para la mineralización (Díaz Rosselló, 1992a). Este aporte sucede principalmente en los primeros 20 cm de suelo, donde existe la mayor producción de biomasa radicular por parte de las pasturas, que está entre el 80- 85 % del total (Formoso, 2010). Este hecho explica el mayor uso de nitrógeno en los sistemas que no incluyen pasturas en la rotación, lo que determina un mayor uso de energía fósil en estos sistemas.

La duración de la fase de pasturas tiene efecto directo sobre la residualidad del N para los cultivos siguientes, por lo que el aporte de nitrógeno para el cultivo de sorgo siguiente del sistema ROT-4 será más importante que el ROT-2, por lo que el primero sería menos dependiente de los fertilizantes (Díaz Rosselló, 1992a).

No obstante existe otra vía de entrada de nitrógeno al sistema que es la fijación no simbiótica de nitrógeno, que en los sistemas de SDCcc y SDCsc

hacen probablemente un aporte al disminuir las pérdidas de nitrógeno orgánico y por lo tanto de carbono orgánico.

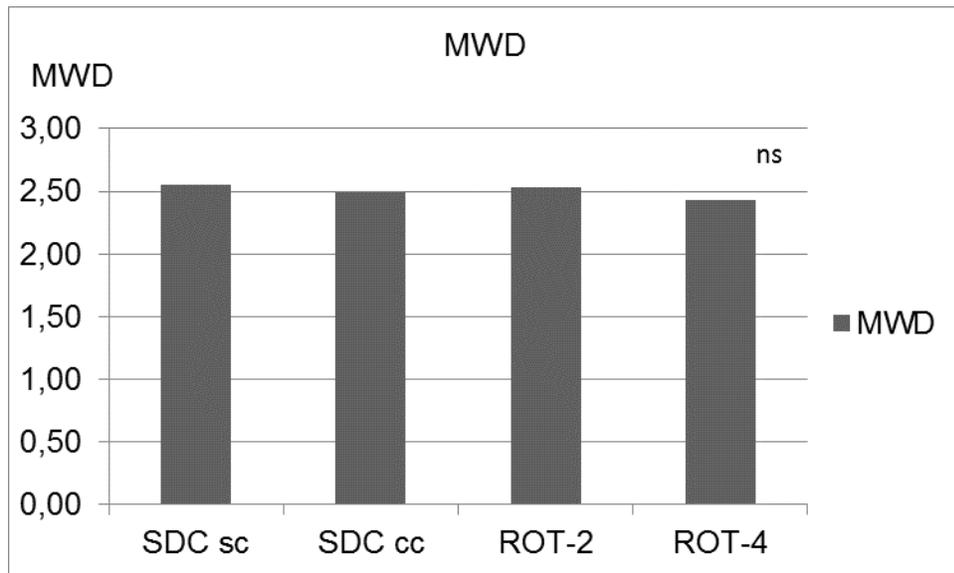
Debe considerarse además el factor tiempo, este experimento está siendo analizado con sólo 4 años de transcurrido, y teniendo en cuenta los lentos cambios en carbono total bajo sistemas de siembra directa y en suelos muy estables como el bajo estudio, los resultados encontrados son esperables.

Estos factores son los principales que afectan el contenido de carbono, y si bien en este caso no fueron encontradas diferencias significativas en el carbono total, existe una tendencia de las pasturas en mantener un contenido mayor de COS, que con el transcurso del tiempo es esperable que se genere una brecha mayor, sobre todo comparado con el sistema de sorgo continuo sin cobertura. Donde es más probable encontrar diferencias es en el factor calidad, dada su mayor sensibilidad a los cambios, tal como el carbono de la materia orgánica particulada (C-POM) 212-2000 (Morón, 2003).

Debido a que el balance de nitrógeno es negativo y que este guarda estrecha relación con el carbono, se espera en un plazo más largo una disminución del mismo. Para revertir esta situación se debería producir una cobertura que mantenga el suelo cubierto y además haga un aporte de nitrógeno vía FBN.

4.2 ESTABILIDAD DE AGREGADOS

No fueron detectadas diferencias significativas en el tamaño medio de los agregados de los diferentes tratamientos (figura 2).



Referencias: SDCsc= Sorgo Dulce Continuo sin cultivo cobertura, SDCcc = Sorgo Dulce Continuo con cultivo cobertura, ROT-2= rotación 1.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce, ROT- 4 = rotación 3.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce.

Figura 2: Diámetro medio de los agregados (MWD) según tratamiento.

Dada la alta correlación entre tamaño medio de agregados (MWD) y el carbono orgánico (Durán y García Préchac, 2007) son presumibles los resultados encontrados para MWD, puesto que no se detectaron cambios significativos en el carbono orgánico, los pequeños cambios que se produjeron en el COS no generaron modificaciones en la estructura. Esto sucede cuando el rango de carbono orgánico es elevado como en el suelo del experimento. No obstante, cuando esas pequeñas modificaciones se producen en suelos con menor contenido inicial, como en el experimento de Durán y García Préchac (2007) con un rango de contenido de carbono (1,48 vs 1,9%) produce cambios en la densidad aparente y por lo tanto en su estructura, lo que pone en evidencia la importancia trascendental de la materia orgánica, sobre todo en suelos naturalmente pobres en carbono, puesto que son más dependientes del mismo para mantener su estructura.

Por otra parte, suelos con alto contenido de arcilla, como es de hecho el suelo bajo estudio, los cambios en la estabilidad estructural producto de cambios en el contenido de carbono, son amortiguados, debido a la complementariedad de ambos componentes en la formación de agregados y su estabilización (Morón, 1996b). Por lo tanto la importancia relativa del contenido

de carbono en mantener los agregados, disminuye al aumentar el contenido de arcilla (Ruks et al., 2004). Este es otro aspecto a ser considerado como mecanismo que amortiguó las pequeñas modificaciones producidas por los diferentes tratamientos en el contenido del carbono. El alto contenido de arcilla confiere al suelo menor sensibilidad a la degradación estructural.

Como ya fue mencionado anteriormente existe una relación positiva entre estabilidad estructural y contenido de carbono del suelo. Esta relación es particularmente muy estrecha entre la estabilidad de los agregados y la fracción hidratos de carbono solubles en agua del carbono total. El mucílago excretado por el crecimiento radicular y la microflora de la rizósfera son una fuente importante de hidratos de carbono del suelo. Es por esto que la productividad de los sistemas radiculares de los sistemas es de fundamental importancia en mantener la estabilidad estructural del suelo. En el experimento las producciones estimadas a partir de la parte aérea y de antecedentes indican una muy buena producción de los sistemas que rotan con pasturas, pero también de los sistemas de sorgo continuo. Esto se debe a que es un cultivo de altísimos rendimientos y considerando su relación raíz/parte aérea, esta producción de hidratos de carbono sería semejante entre los tratamientos y por lo tanto mantendrían una estructura similar (Ruks et al., 2004).

La recuperación de la estructura de un suelo luego del periodo de cultivos está principalmente correlacionada con la producción radicular del componente gramínea, y dado que todos los tratamientos estudiados incluyen este componente, no habría diferencias en cuanto a la contribución de los sistemas radiculares fasciculados García Préchac (1992).

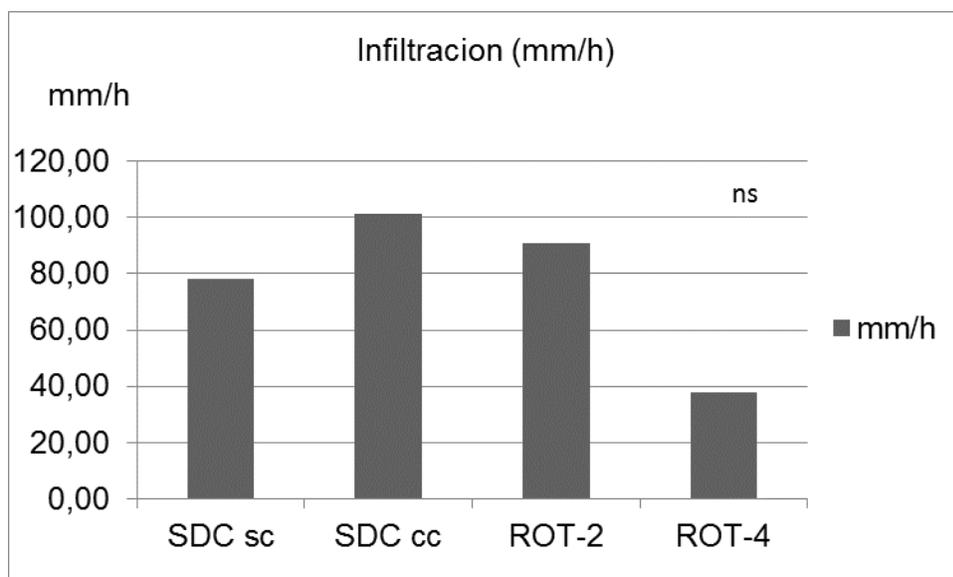
La humedad y su variación en el suelo también afecta la estructura del suelo. Es por esto que el tratamiento SDCsc, que permanece con el suelo desnudo gran parte del año, experimenta cambios más profundos de humedad y por lo tanto estaría generando agregados y compensando en cierta medida la condición más desfavorable de carbono Kemper y Rosenau (1986).

Otro factor que influye en la estabilidad de agregados de un suelo es el nivel de saturación de bases, sobre todo de bivalentes y trivalentes, debido al efecto que tienen en la cementación de las partículas del suelo (Califra y Taro, 1982). El suelo en estudio se desarrolló sobre sedimentos calcáreos con elevado contenido de arcilla y calcio (Durán y García Préchac, 2007). Este es otro factor que podría estar atenuando las pequeñas diferencias en el carbono orgánico. Es decir que las diferencias en el COS no llega a ser tan importante como para producir cambios estructurales, dada la textura y el contenido de bases del mismo.

Otro hecho que posiblemente incida en los resultados es el sistema de siembra directa, puesto que en laboreo convencional Ernst y Siri, citados por Durán y García Préchac (2007) encontraron diferencias a favor de los sistemas que rotan con pasturas, mientras que los mismos tratamientos en siembra directa no arrojaron diferencias. Por lo tanto fue más importante el sistema de labranza que la rotación empleada.

4.3 INFILTRACION

Los resultados de infiltración desde el punto de vista estadístico, no son diferentes. No obstante el sistema ROT-4, de sorgo en rotación con pastura larga duración presentó el valor más bajo de infiltración (figura 3).



Referencias: SDCsc= Sorgo Dulce Continuo sin cultivo cobertura, SDCcc = Sorgo Dulce Continuo con cultivo cobertura, ROT-2= rotación 1.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce, ROT- 4 = rotación 3.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce.

Figura 3: Infiltración (mm/h) según tratamiento

Esta tendencia, puede ser debida al crecimiento radicular de la pastura que provoca compactación del suelo, reduciendo el tamaño de los poros más grandes, con la consecuente disminución de la tasa de infiltración. En contrapartida, sistemas con crecimiento, muerte y descomposición completa de

esos sistemas radiculares como en los casos de SDCcc y SDCsc o incluso en el sistema ROT-2 que se incluye el cultivo de avena, se producen biocanales que mejoran la infiltración del suelo (Martino, 2001).

En el tratamiento SDCsc, es posible que sobreestime la realidad, puesto que el método de estimación de doble anillo, al no ser con lluvia simulada no contempla la diferente capacidad de los tratamientos a resistir el encostramiento superficial producto del impacto de la gota de agua, que provoca el sellado de los canales como consecuencia de la desintegración de las partículas de la superficie del suelo y por lo tanto disminuye drásticamente la tasa de infiltración (Martino 2001, Stewart 2009).

El tratamiento ROT-4 incluye pasturas, integrada por *Festuca arundinacea* y *Trifolium repens* entre otras especies. Las mismas no son consideradas especies que construyen los biocanales más extensos (Martino, 2001). Además debe considerarse que las muestras fueron realizadas con las pasturas en plena actividad, mientras que los tratamientos de sorgo continuo tenían los restos de raíces en descomposición, este factor es importante en la descompactación del suelo ya que la muerte de raíces mejora la infiltración.

El tratamiento ROT-2, es una situación intermedia, con mayor proporción de sorgo que el ROT-4, además de la avena, que también produce crecimiento y muerte de raíces y tiene buena producción de biomasa, por lo que arroja buenos resultados de infiltración.

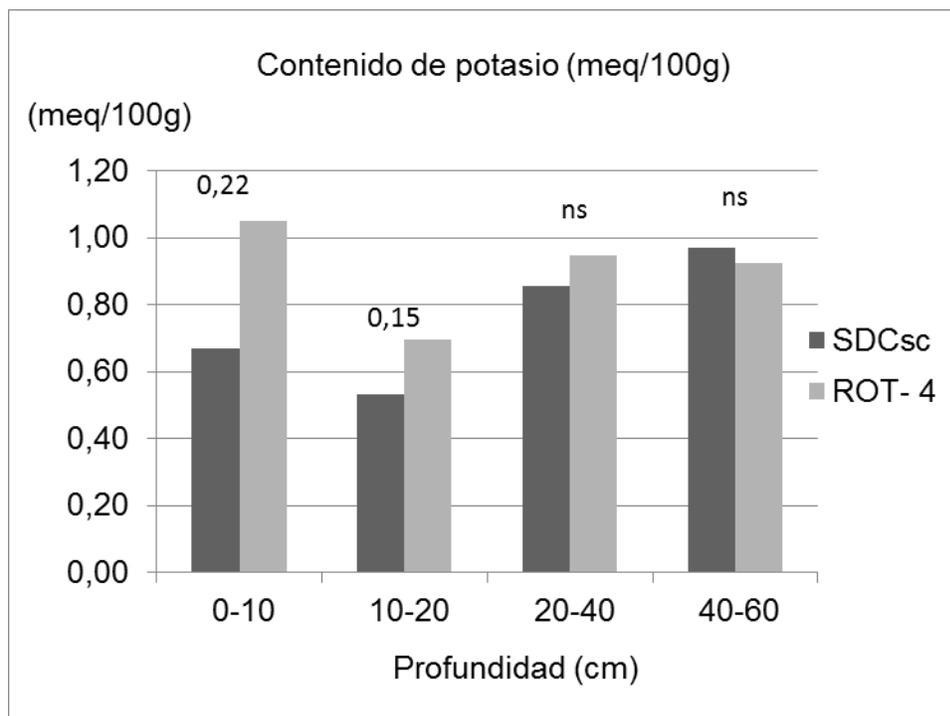
Como ya fue mencionado el método de estimación de infiltración es de doble anillo, donde permanece la lámina de agua sobre la superficie, por lo que no se cuantifica la importancia de la rugosidad de la superficie del suelo en la infiltración, factor que sí tendría relevancia en la tasa de infiltración luego de lluvias. Es por esto que las diferencias entre los tratamientos que mantienen el suelo cubierto y el tratamiento sin cobertura (SDCsc) no se ven reflejadas con este método (García Préchac, 1992).

La estructura del suelo como es sabido es uno de los aspectos mas importantes en la tasa de infiltración y puesto que los tratamientos no arrojaron diferencias significativas en MWD (indicador de estructura), es esperable que no existan diferencias en la infiltración. No obstante, la infiltración en condiciones naturales de precipitaciones, depende de otros factores como la capacidad de resistir el encostramiento, y por ende de la cobertura y la rugosidad. Es por esto que posiblemente el tratamiento que deja gran parte del año sin protección frente a precipitaciones erosivas, como el SDCsc, tenga en

realidad un valor más bajo de infiltración que el estimado (Black 1975b, Marelli 2001, Stewart 2009).

4.4 POTASIO INTERCAMBIABLE

En el caso del potasio intercambiable existe una diferencia significativa entre los tratamientos contrastantes (SCsc vs. ROT-4) en los primeros 20 cm. Tal diferencia a su vez es mayor en el rango de 0-10 cm que en el rango de 10-20 cm, pero de todas maneras se mantiene. Incluso, a pesar de no ser ya significativa, hay una tendencia hasta los 40 cm del perfil (figura 4). Esta reducción es totalmente previsible dadas las altísimas tasas de extracción del nutriente por parte del cultivo de sorgo, en el que además no se realizaron reposiciones del nutriente.



Referencias: SDC sc = Sorgo Dulce Continuo sin cultivo cobertura, ROT- 4 = rotación 3.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce

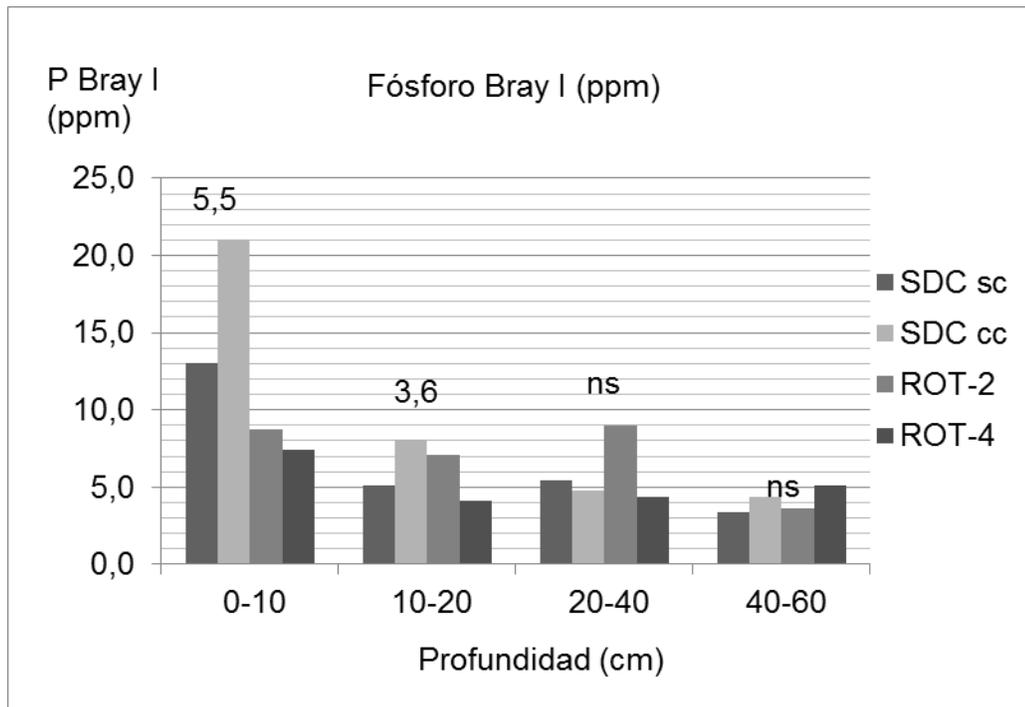
Figura 4: Concentración de K en el suelo (meq/100 g) según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm profundidad) comparando dos intensidades del sorgo dulce en la rotación luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).

El principal factor que explica la diferencia entre los tratamientos, como ya fue mencionado, es la elevada tasa de extracción de K por parte del cultivo de sorgo, que fue estimada entre 972 y 1148 kg/ha en el periodo 2005-2009 para las rotaciones de sorgo continuo. Además de ello, dado que el K intercambiable es un indicador de la evolución del potasio, deben considerarse también los factores que pueden afectarlo, para hacer una lectura más aproximada de la realidad. La CIC tiene una relación positiva con el potasio intercambiable (Hernández, 1992) por lo que los sistemas con sorgo continuo (SDCsc y SDCcc), con la tendencia ya analizada de disminuir el carbono orgánico, sumada a una elevada extracción de bases (Siri y Ernst¹) provocan una disminución de la CIC (Morón y Pérez Gomar, 1994) y por ende magnifican la disminución del potasio medido a través del K intercambiable.

El potasio intercambiable que repone al de la solución, es a su vez repuesto por la fracción no intercambiable. Estas reposiciones se producen a diferentes tasas (Hernández et al., 1998) por lo que en el presente análisis, que lleva 4 años de extracción, parte de ese potasio intercambiable se encontraba como no intercambiable, y por lo tanto al comparar los resultados de este indicador se subestima el efecto extractivo del cultivo, dado que el potasio no intercambiable repuso parte del intercambiable que fue extraído por el cultivo.

4.5 FÓSFORO

El fósforo medido en el experimento a través del método Bray I, mostró diferencias significativas en los primeros 20 cm, donde los sistemas con sorgo continuo y especialmente el SC cc, tuvieron los valores más altos.



Referencias: SDCsc = Sorgo Dulce Continuo sin cultivo cobertura, SDCcc= Sorgo Dulce Continuo con cultivo cobertura, ROT- 2= rotación 1.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce, ROT- 4= rotación 3.5 años pastura con un cultivo Sorgo Dulce

Figura 5: Concentración de P Bray I (ppm) según estratificación (0-10, 10-20, 20-40 y 40-60 cm profundidad) dadas las diferentes alternativas en la intensidad del sorgo dulce luego de 4 años de evaluación en el experimento de largo plazo en Paysandú, Uruguay (2005-2009).

El tratamiento SCcc difiere estadísticamente con el tratamiento SCsc, a las profundidades de 0-10 y 10-20, posiblemente esta diferencia se deba a la erosión selectiva, que si bien puede pensarse de poca importancia (3,4 vs.4,9 toneladas/ha), dado el error de estimación de la erosión por las características del cultivo, es esperable que cuando, luego del cultivo de sorgo, no se mantenga el suelo cubierto, se provoque una pérdida de fósforo de relativa importancia, debido a la estratificación de nutrientes en siembra directa (Morón y Kiehl, 1992a).

El fósforo extraído por el método de extracción Bray I representa la fracción inorgánica (Morón y Kiehl, 1992a) por los que si bien estos resultados indican una mayor disponibilidad de fósforo inorgánico en los sistemas SCcc y

SCsc, ésta es sólo una fracción del fósforo en el suelo. Cuando existen sistemas con evolución positiva de la materia orgánica, esta materia orgánica, también está integrada por fósforo (Abella y Nin, 2003) por lo que el fósforo inorgánico entra en competencia con el orgánico por el fósforo disponible (Morón, 1992b). Es así, que parte es incorporado a la materia orgánica y a la biomasa microbiana. Esto provoca una disminución del P Bray I en los sistemas con pastura, respecto a los sistemas de sorgo continuo, pero en definitiva no es otra cosa que el aumento relativo de la fracción orgánica del fósforo (Morón, 1992b). Esto es lo que determina el nivel inferior de P inorgánico (Bray I) en los sistemas que rotan con pastura.

Por lo tanto este indicador debe ser observado de forma relativa en cuanto a la nutrición de las plantas, dado que el fosforo orgánico también contribuye a la disponibilidad de este elemento, principalmente en los tratamientos que rotan con pasturas (Morón y Kiehl, 1992a) y luego de un período de mineralización (Zamalvide, 1992).

Estas diferencias encontradas en P Bray I, son explicadas por los factores antes mencionados. Sin embargo, es importante señalar que en el experimento, si bien todos los balances de fósforo fueron positivos, los mayores valores se dieron en las rotaciones de sorgo continuo (Siri y Ernst¹). A su vez la fertilización con fosforo, no evita la disminución del fosforo orgánico y generalmente produce un aumento del P inorgánico. Sobre todo cuando se trata de suelos con elevado contenido de calcio, como es el bajo estudio, donde el PCa es menos afectado por la erosión que cuando es ligado al Al ó al Fe.

5. CONCLUSIONES

No fueron detectadas diferencias significativas en el carbono total, los tratamientos que incluían pastura tendieron a valores superiores en los primeros 20 cm, con respecto a los de sorgo continuo. Esta tendencia fue más marcada cuando se compara con el tratamiento de sorgo continuo sin cobertura invernal.

Con respecto a la erosión, los sistemas de sorgo dulce continuo tuvieron las mayores pérdidas por esta vía. No obstante, ningún tratamiento estuvo por encima del nivel de tolerancia, producto de ser un suelo de baja erodabilidad (Durán y García Préchac, 2007).

Si bien el carbono total no alcanzó diferencias significativas entre tratamientos, se espera que existan mayores diferencias en cuanto a la calidad de ese carbono, siendo más fácilmente mineralizados los provenientes de los sistemas sorgo-pastura, este es un factor a ser considerado en futuras investigaciones.

La estabilidad de agregados no mostró diferencias significativas entre tratamientos, por lo que mantuvo la relación directa con el carbono orgánico.

La infiltración medida a través de doble anillo, no arrojó diferencias significativas, sin embargo la tendencia presentada fue reducirse en la rotación que incluye pastura larga. Esto último atribuido al efecto de compresión producto del crecimiento radicular, con la reducción de los espacios porosos del suelo (Martino, 2001).

Para el caso de sorgo continuo sin cobertura, si bien fue medido una alta tasa de infiltración, se espera que bajo lluvia simulada, se reduzca severamente producto del encostramiento superficial, dado que el suelo permanece desnudo entre la cosecha del sorgo y hasta que se cubre el suelo por el siguiente cultivo.

En el tratamiento 2, de sorgo continuo que mantiene el suelo cubierto, se consigue una alta tasa de infiltración, dada por la formación de biocanales producidos por el crecimiento y muerte de raíces reiteradas en el tiempo (Martino, 2001).

Los sistemas de sorgo continuo tuvieron valores superiores de fósforo (Bray I) a los de las rotaciones con pastura en los primeros 20 cm de suelo,

resultado de una menor proporción de formas orgánicas en los primeros. La diferencia es más importante en el sistema de sorgo continuo con cobertura debido a la menor pérdida por erosión selectiva que mantiene este sistema.

Con respecto a potasio, medido a través K intercambiable, el mismo disminuyó considerablemente en el sistema de sorgo continuo sin cobertura con respecto a la rotación de pastura plurianual, por lo que para hacerse sostenible debe ser agregado de acuerdo con la tasa de extracción.

6. RESUMEN

El agotamiento de las fuentes de energía convencionales y el efecto de su implementación en el calentamiento global, ha llevado a la búsqueda de nuevas alternativas, que sean capaces de producir energía mediante el uso de recursos renovables, a su vez estos recursos deben ser mantenidos en condiciones de ser reutilizados. En tal sentido se propone la utilización de la biomasa como fuente de energía, dentro de la que se incluye al sorgo duce (*Sorghum bicolor*) que por sus características frente a otros cultivos, lo harían una excelente alternativa para nuestro país. En este sentido se instaló en el año 2005, en la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni de la Facultad de Agronomía, un experimento con el propósito de detectar la viabilidad de los diferentes tratamientos propuestos, en la producción de biomasa de forma sostenible, y por lo tanto manteniendo el recurso suelo productivo a largo plazo. Se implementaron 4 tratamientos, SDCsc, SDcc, ROT-2, ROT-4; sorgo dulce continuo con y sin cobertura, y en rotación con pasturas de 2,5 y 3,5 años de duración respectivamente. Las mediciones en este trabajo fueron hechas en el año 2009, en el que se estimó carbono orgánico del suelo (COS), fósforo (Bray I), potasio intercambiable, infiltración y estabilidad de agregados (MWD). El COS mostró una tendencia a ser menor en los primeros centímetros para los tratamientos que incluyen sorgo todos los años y sobre todo cuando no se implementa una cobertura invernal. Sin embargo, esta tendencia aún no fue considerada significativa desde el punto de vista estadístico. Esta pequeña diferenciación entre tratamientos es debida probablemente a la escasa erodabilidad del suelo en cuestión y al poco tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo. En cuanto a la estabilidad estructural medida a través de MWD, dada la relación existente con el componente COS, tampoco mostro diferencias significativas; cabe señalar también que el suelo presenta características físico-químicas que lo hacen resistente a la pérdida de estructura. Los valores de infiltración no difirieron estadísticamente entre sí, no obstante existe una tendencia en el tratamiento ROT-4 a ser menor al resto. Esto es debido probablemente al crecimiento radicular que provoca compactación en el suelo, disminuyendo el tamaño de los poros. Otro factor a considerar es la construcción de biocanales en los demás tratamientos, en el que hay crecimiento y muerte de una proporción mayor de raíces. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el método empleado para la estimación de la infiltración no contempla el factor condiciones de cobertura del suelo, por lo que el SDCsc probablemente tenga un valor menor al estimado. El potasio medido a través del indicador K intercambiable arrojó diferencias significativas, donde el tratamiento de sorgo dulce continuo sin cobertura dio valores inferiores en los

primeros 20 cm con respecto al tratamiento ROT-4 con un solo cultivo de sorgo en el periodo analizado. Esto fundamentalmente explicado por la elevada tasa de extracción del cultivo en donde no existe reposición del nutriente. En cuanto a la estimación de fósforo a través de Bray I, se encontró que el SDC_{cc} posee los valores mas altos, fundamentalmente explicado por la fracción orgánica del fosforo, en el que entra en competencia por el fosforo inorgánico medido a través de este método, por lo que sistemas con evolución positiva del carbono como posiblemente sean los ROT-2 y ROT-4 aunque aún no detectables por el COS, van a tener valores inferiores de fosforo inorgánico ya que entra en competencia con este último. Asimismo, el balance más positivo de los tratamientos SDC con respecto a ROT-2 y ROT-4 para este nutriente, es debido a que las pasturas no fueron refertilizadas. Las diferencias encontradas en los primeros centímetros entre SDC_{sc} y SDC_{cc} son posiblemente explicadas por la erosión selectiva producto de la elevada estratificación de nutrientes en los sistemas de siembra directa.

Palabras clave: Sorgo dulce; Suelo; Energía renovable; Biomasa; Carbono orgánico; Fósforo; Infiltración; Estabilidad de agregados.

7. SUMMARY

The depletion of conventional energy sources and the effect of its implementation in global warming has led to the search for new alternatives that are capable of producing energy using renewable resources to turn these resources must be maintained in condition to be reused. In this regard we propose the use of biomass as an energy source within the included leads to sorghum (*Sorghum bicolor*) which by its nature compared to other crops, they would do an excellent alternative for our country. In this connection was installed in 2005, at the Experimental Station Dr. Mario A. Cassinoni of the College of Agriculture, an experiment to detect the viability of various proposed treatments, biomass production in a sustainable manner, and thus maintaining the soil resource productive in the long term. 4 treatments were implemented, SDCsc, SDCC, ROT-2, ROT-4, continue with sweet sorghum and without coverage, and in rotation with pastures of 2.5 and 3.5 year respectively. The measurements in this work were made in 2009, which was estimated soil organic carbon (SOC), phosphorus (Bray I), exchangeable potassium, infiltration and aggregate stability (MWD). The COS showed a tendency to be lower in the first few inches for treatments that include sorghum every year and especially when coverage is not implemented winter, even though this trend was not considered significant from a statistical point of view. This small difference between treatments probably due to the low erodibility of the soil in question and the short time since its inception. As for the structural stability as measured by MWD, given the existing relationship with the component COS, no show significant differences as well as being a ground with physical-chemical characteristics that make it resistant to loss of structure. Values did not differ statistically between infiltration, however, if there is a tendency for the treatment ROT-4 to be less than the rest, this probably due to which causes root growth in soil compaction by decreasing the pore size, also because of duct construction in the other treatments, in which no growth and death of a greater proportion of roots, however it should be noted that the method for estimation using the factor does not provide coverage of the soil conditions, so that the SDCsc probably have a value less than estimated. The potassium measured by the indicator showed significant differences exchangeable K, where the continuous treatment of sweet sorghum uninsured gave lower values in the first 20 cm with respect to treatment ROT-4 with a single crop of sorghum in the period analyzed. This mainly explained by the high rate of extraction of the culture in which there is no replenishment of the nutrient. As for the estimation of phosphorus through Bray I, it was found that SDCC has higher values, mainly explained by the organic fraction of phosphorus, which competes for the inorganic phosphorus measured by Bray

I, systems so that positive developments are likely to be carbon-2 and the ROT ROT-4 but not yet detected by the COS, will have lower values of inorganic phosphorus as it competes with the latter. It adds to this more positive balance of treatments with respect to SDC-2 and ROT ROT-4 for the nutrient in question because the pastures were not fertilitation. The differences found in the first centimeters between SDCcc SDCsc and are possibly explained by the selective erosion product of the high nutrient stratification in no-till systems.

Keywords: Sweet sorghum; Soil; Renewable energy; Biomass; Carbon Organic; Phosphorus; Infiltration; Aggregate stability.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABELLA FAGUAGA, M.; NIN GARCÍA, A. 2003. Evolución en las formas y contenidos de fósforo del suelo bajo sistemas de rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo convencional y siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 71 p.
2. AGUADO LARA, G.; ETCHEVERS BARRA, J. D.; HIDALGO MORENO, C.; GALVIS SPÍNOLA, A.; AGUIRRE GÓMEZ, A. 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia*. 36: 11-21.
3. ALVAREZ, R. 2006. Información técnica de trigo en la campaña 2006; balance de carbono en los suelos. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Publicación miscelánea no. 105: 36-43.
4. BAETHGEN, E. W. 1992. Dinámica del nitrógeno en sistemas de rotación cultivo-pastura. *Investigaciones Agronómicas*. 1(1): 3-25.
5. BAUTES, B.; BARBAZÁN, M.; BEUX, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas cretácicas y transicionales. (en línea). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 44: 1-8. Consultado 16 jun. 2011. Disponible en <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf>.
6. BLACK, C.A. 1975a. Relaciones suelo-planta. Buenos Aires, Hemisferio Sur. v.1, 444 p. (Colección de textos de agronomía y veterinaria no. 12).
7. _____. 1975b. Relaciones suelo-planta. Buenos Aires, Hemisferio Sur. v.2, 420 p. (Colección de textos de agronomía y veterinaria no. 12).
8. CALEGARI, A. 2001. Uso de abonos verdes y rotación de cultivos en el sistema de siembra directa. In: Díaz Rosello, R. ed. *Siembra directa en el Cono Sur*. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 365-384.

9. CALIFRA, A.; TARO, G. 1982. Caracterización de una toposecuencia de suelos representativos de la cuenca de Aceguá (Dpto. Cerro Largo). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 261 p.
10. CASANOVA, O. 1996. Potasio; consideraciones sobre su situación en el Uruguay. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).
11. COLOZZI FILHO, A.; DE SOUZA ANDRADE, D.; LIBORIO BALOTA, E. 2001. Comunidad microbiana en suelos en siembra directa. In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 407-418.
12. DÍAZ ROSELLO, R. 1992a. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. Investigaciones Agronómicas. 1(1): 27-35.
13. _____. 1992b. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. Investigaciones Agronómicas. 1(1): 103-110.
14. DURÁN, A.; GARCÍA PRÉCHAC, F. 2007. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. v. 2, 358 p.
15. ERNST, O. 2000. Siete años de siembra sin laboreo. Cangüé. no. 20: 9-13.
16. _____.; SIRI, G. 2009. Manejo del suelo y rotación con pasturas; efecto sobre rendimiento de los cultivos, su variabilidad y el uso de insumos. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, Facultad de Agronomía. pp. 125-140.
17. FERNÁNDEZ, E. 1992. Análisis físico y económico de siete rotaciones de cultivos y pasturas en el suroeste de Uruguay. Investigaciones Agronómicas. 1(2): 251-257.

18. FONTANETTO, H.; KELLER, O. 2001. Efecto de diferentes secuencias de cultivos en siembra directa continua; sobre algunas propiedades edáficas de un Argiudol en la región pampeana norte de Argentina. In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 269-273.
19. FORMOSO, F. 2010. Festuca arundinácea, manejo para producción de forraje y semillas. Montevideo, INIA. 192 p. (Serie Técnica no. 182).
20. GARCÍA PRÉCHAC, F. 1992. Propiedades físicas y erosión en rotaciones de cultivos y pasturas. Investigaciones Agronómicas. 1 (1): 127-140.
21. HAYNES, R. J.; SWIFT, R. S.; STEPHEN, R. C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. Soil and Tillage Research. 19 (1): 77-87.
22. HERNÁNDEZ, J. 1992. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 35 p.
23. _____.; CASANOVA, O.N.; ZAMALVIDE, J.P. 1998. Capacidad de suministro de potasio en suelos de Uruguay. Facultad de Agronomía (Montevideo). Boletín de Investigación no. 19. 20 p.
24. KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. ed. Physical and mineralogical methods-agronomy. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. pp. 425-442 (Monograph no. 9).
25. MARELLI, H, J. 2001. El agua y la siembra directa. In: Díaz Rosello, R.ed. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 259-268.
26. MARTINO, D. L. 1994. Propiedades físicas del suelo que afectan el desarrollo vegetal. In: Morón, A.; Martino, D.; Restaino, E. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 59-63 (Serie Técnica no. 42).

27. _____. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 225-257.
28. MORÓN, A.; KIEHL, J. C. 1992a. Dinámica del fósforo en tres sistemas agrícolas en el suroeste de Uruguay. Investigaciones Agronómicas. 1(1): 61-84.
29. _____. 1992b. El fósforo en el sistema suelo-planta. Investigaciones Agronómicas. 1(1): 45-60.
30. _____.; PÉREZ GOMAR, E. 1994. La acidez del suelo y su corrección. In: Morón, A.; Martino, D.; Restaino, E. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 37-40 (Serie Técnica no. 42).
31. _____.; BAETHGEN, W. 1996a. Relevamiento de la fertilidad de los suelos bajo producción lechera en Uruguay. Montevideo, INIA. 15 p. (Serie Técnica no. 73).
32. _____. 1996b. El rol del carbono en los sistemas productivos agropecuarios. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 1-7 (Serie Técnica no. 76).
33. _____. 2001. El rol de los rastrojos en la fertilidad del suelo; In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 387-405.
34. _____. 2003. Efecto de las rotaciones y el laboreo en la calidad del suelo. (en línea). Informaciones Agronómicas. 20: 1-7. Consultado 16 jun. 2011. Disponible en <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf>.
35. NÚÑEZ, A. 2010. Situación del potasio en la agricultura uruguaya. In: Jornada Técnica; El Efecto de la Agricultura en la Calidad de los

Suelos y Fertilización de Cultivos (2010, Mercedes). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 11-13 (Actividades de Difusión no. 605).

36. PANIGATTI, J, L. 1992. Las rotaciones agrícolas con pasturas en la pampa húmeda de Argentina. Investigaciones Agronómicas. 1(2): 215-225.
37. PILATTI, M.A.; LÁZARO, J.J.; DE ORELLANA, P.; DE ORELLANA, J.A.; PERTUSATI, H.A.; PORCEL DE PERALTA, L.P.; VIVIANI, J.A. 1987. Modificaciones producidas en el suelo por plantas forrajeras. Ciencia del Suelo. 5(2): 150-157.
38. PONCE DE LEON, R.; CAPURRO, M.1980. Caracterización física de suelos representativos del área granjera sur. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 131 p.
39. ROBERT, M. 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Roma, FAO. 70 p. (Informe sobre recursos mundiales de suelos no. 96)
40. RODRIGUES TORRES, L. J.; PERIERA, M. G. 2008. Dinámica do potássio nos resíduos vegetais plantas de cobertura no cerrado. Parte da tese de doutorado do primeiro autor. San Pablo, Brasil. Universidade Estadual Paulista. pp. 1609-1618.
41. RUIZ ESTEVEZ, F.; VENIALGO, C, A.; GUTIERREZ, N, C.; INGARAMO, O.; BRIEND, M. C. 2004. Infiltración de agua en el suelo con diferentes usos en el departamento 9 de Julio (Chaco). (en línea). Corrientes, Universidad Nacional del Nordeste. 4 p. (Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2004/ Agrarias A-070). Consultado 10 abr. 2012. Disponible en <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2004/5-Agrarias/A-070.pdf>.
42. RUKS, L.; GARCIA, F.; KAPLAN, A.; PONCE DE LEON, J. 2004. Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 68 p.

43. SAWCHIK, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo-pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. In: Díaz Roselló, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 323-345.
44. SILVA, A. 1995. La materia orgánica del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 44 p.
45. STEWART, W. 2009. How tillage affects water infiltration. Oregon, Pendleton. 6 p.
46. ZAMALVIDE, J, P. 1992. Dinámica de fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. Investigaciones Agronómicas. 1(1): 85-93.