

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**ALTERNATIVAS DE MANEJO DE CULTIVOS DE COBERTURA ANUALES
INVERNALES COMO HERRAMIENTA PARA APORTAR CARBONO Y
NITRÓGENO A LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS**

por

**Enrique HALTY BAROFFIO
Carlos LAVISTA MONTERO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2016**

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Santiago Arana

Ing. Agr. Gervasio Piñeiro

Ing. Agr. Sebastián Mazzili

Fecha: 7 de setiembre de 2016

Autores:

Halty Baroffio Enrique

Lavista Montero Carlos María

AGRADECIMIENTOS

- A nuestro tutor Ing. Agr. Santiago Arana por su dedicación y apoyo durante todo el proceso de elaboración de este trabajo
- A la familia Arana-Marzaroli por permitirnos realizar el trabajo de campo en la Chacra “Santa Lucía” y recibirnos siempre con gran hospitalidad
- Al personal de la Chacra “Santa Lucía”, Luis y su familia por su enorme colaboración en todas las etapas del trabajo de campo
- A nuestras familias y amigos que nos han acompañado a lo largo de toda la carrera

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. <u>EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)</u>	3
2.1.1. <u>Materia orgánica del suelo (MOS) y COS</u>	3
2.1.2. <u>Fracciones del COS</u>	3
2.1.3. <u>El COS y la calidad del suelo</u>	4
2.1.3.1. <u>El COS y las propiedades químicas del suelo</u>	4
2.1.3.2. <u>El COS y las propiedades físicas del suelo</u>	4
2.1.3.3. <u>El COS y la productividad de los cultivos</u>	5
2.1.4. <u>Balace de COS y sustentabilidad</u>	5
2.1.5. <u>Prácticas de manejo que favorecen la acumulación de COS</u>	6
2.1.6. <u>Las rotaciones de cultivos y pasturas</u>	6
2.2. <u>LOS CULTIVOS DE COBERTURA (CC)</u>	7
2.2.1. <u>Efectos de los CC sobre el control de la erosión</u>	7
2.2.2. <u>Efectos de los CC sobre el COS</u>	9
2.2.3. <u>Efectos de los CC en la dinámica del agua</u>	10
2.2.4. <u>Efectos de los CC sobre la dinámica de nutrientes</u>	10
2.3. <u>CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LAS RAÍCES AL APORTE DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO</u>	13
2.3.1. <u>Raíces y micorrizas simbióticas</u>	14
2.3.2. <u>Aproximaciones a la contribución relativa de las raíces al COS</u>	15
2.3.3. <u>Evidencias de la preservación específica del C raíces (CDR) en el suelo</u>	17
2.3.4. <u>Mecanismos de preservación específica de las raíces en el suelo</u>	18
2.3.4.1. <u>Flujo de C derivado de raíces al suelo (CDR)</u>	18
2.3.4.2. <u>Efecto acelerador de la descomposición (priming) debido a la rizodeposición y a la incorporación de residuos aéreos de cultivos</u>	19
2.3.4.3. <u>Recalcitrancia química</u>	20
2.3.4.4. <u>Protección fisicoquímica mediante interacción con minerales</u>	20
2.3.4.5. <u>Protección física contra microorganismos descomponedores mediante agregación</u>	21

2.3.4.6	Protección por iones metálicos.....	22
2.3.4.7	Descomposición reducida en capas profundas del suelo.....	22
2.3.5	<u>Implicancias del almacenaje de C en del perfil del suelo</u>	23
2.4.	CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPECIES A EVALUAR.....	23
2.4.1	<u>Brassic napus</u>	23
2.4.2	<u>Raphanus sativus var. longipinnatus (tillage radish)</u>	23
2.4.3	<u>Trifolium resupinatum</u>	24
2.4.4	<u>Trifolium vesiculosum</u>	24
2.4.5	<u>Lolium multiflorum</u>	25
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	27
3.1.	MARCO CONCEPTUAL Y CRITERIOS PARA LA COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES.....	27
3.1.1.	<u>Incorporación de C al suelo</u>	27
3.1.2.	<u>Fijación de nitrógeno</u>	27
3.1.3.	<u>Generación de macroporos y descompactación</u>	28
3.2.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO.....	28
3.2.1.	<u>Ubicación espacial y temporal</u>	28
3.2.2.	<u>Descripción general del experimento</u>	28
3.2.3.	<u>Factores experimentales</u>	29
3.3.	DETERMINACIONES REALIZADAS.....	30
3.3.1	<u>Biomasa Aérea (BA)</u>	31
3.3.2	<u>Biomasa Radicular (BR)</u>	31
3.3.3	<u>Algunas consideraciones sobre la determinación de la BR</u>	33
3.4.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	34
3.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	36
3.6.	HIPÓTESIS.....	36
3.6.1	<u>Hipótesis biológicas</u>	36
3.6.2	<u>Hipótesis estadísticas</u>	37
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	38
4.1	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO.....	38
4.1.1.	<u>Temperatura</u>	38
4.1.2.	<u>Precipitaciones y riegos</u>	39
4.1.3.	<u>Heladas agrometeorológicas</u>	40
4.2	PRODUCCIÓN DE BR, BA Y RELACIÓN R/PA.....	41
4.2.1	<u>Factores que afectan la relación R/PA reportados por la bibliografía</u>	42
4.2.1.1.	Metodología y determinaciones experimentales.....	43
4.2.1.2	Temperatura.....	43
4.2.1.3	Agua y nutrientes.....	44
4.2.1.4	Control hormonal en la relación R/PA.....	45
4.3	ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN RADICULAR DE LAS ESPECIES.....	47

4.3.1	<u>Acumulación de MS radicular de las especies</u>	47
4.3.2	<u>Evolución de la relación R/PA</u>	48
4.3.3	<u>Efecto de la fecha de siembra y la densidad</u>	51
4.3.4	<u>Efecto global de la especie sobre la producción radicular</u>	53
4.4	COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES SEGÚN OBJETIVO ECOSISTÉMICO COMO OBJETIVO PRINCIPAL.....	
4.4.1	<u>Incorporación de C al suelo (<i>L.multiflorum</i> y <i>B.napus</i>)</u>	54
4.4.2	<u>Fijación de N (<i>T.vesiculosus</i> y <i>T. resupinatum</i>)</u>	54
4.4.3	<u>Generación de macroporos y descompactación</u>	61
		65
4.5	CORRELACIÓN ENTRE BIOMASA AÉREA Y BIOMASA RADICULAR.....	72
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	77
6.	<u>RESUMEN</u>	79
7.	<u>SUMMARY</u>	81
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	82
9.	<u>ANEXOS</u>	94

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Cálculo de las densidades de siembra por maceta en base a la densidad comercial de cada especie.....	30
2. Fechas de cortes de BA y BR.....	30
3. Número de heladas por mes para el período abarcado por el experimento en 2013 y media histórica.....	41

Figura No.	Página
1. Croquis del experimento.....	35
2. Temperatura media mensual (° C) del período experimental e histórica (1972-2013) para estación INIA Las Brujas.....	38
3. Precipitación media mensual (mm) durante el período experimental, obtenida de de la estación agroclimática de INIA Las Brujas, comparadas con la precipitación media histórica del período abr-nov, desde 1972-2013.....	40
4. Relación R/ PA a la fecha de supresión (24/09) de todos los tratamientos.....	42
5. Curva de acumulación de MS radicular de las especies (FS 20/04, promedio ambas densidades).....	47
6. Evolución de la relación R/ PA según especie (FS 20/04).....	48
7. Efecto de la fecha de siembra en la producción de biomasa aérea,	

radicular y total para el promedio de todos los cultivos de cobertura expresados en gramos/maceta corregidos al 24/09.....	50
8. Efecto fecha de siembra y densidad sobre la curva de producción de BA total de los CC (promedio de todas las especies).....	51
9. Efecto de la fecha de siembra y densidad sobre la curva de producción de BR total de los CC.....	52
10. Producción de MS aérea y radicular al 24/09 de las especies evaluadas (promedio de todas las fechas y densidades).....	53
11. Efecto de la fecha de siembra en la BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra	55
12. Efecto de la densidad de siembra en la BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de ambas fechas de siembra	56
13. Curvas de crecimiento de BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> . (A: densidad alta; B: densidad baja).....	57
14. Efecto de la fecha de siembra en la BR de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de ambas densidades de siembra	58
15. Efecto de la densidad de siembra en la BR de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de ambas fechas de siembra	59
16. Curvas de crecimiento de BR de <i>L. multiflorum</i> y <i>B. napus</i> . (A: densidad alta; B: densidad baja).....	60
17. Efecto de la fecha de siembra en la BA de <i>L. multiflorum</i> , <i>T. resupinatum</i> y <i>T. vesiculosus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.....	61
18. Efecto de la densidad de siembra en la BA de <i>L. multiflorum</i> , <i>T. resupinatum</i> y <i>T. vesiculosus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las fechas de siembra.....	62

19. Efecto de la fecha de siembra en la BR de <i>L. multiflorum</i> , <i>T. resupinatum</i> y <i>T. vesiculosus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.....	63
20. Efecto de la densidad de siembra en la BR de <i>L. multiflorum</i> , <i>T. resupinatum</i> y <i>T. vesiculosus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las fechas de siembra.....	64
21. Efecto de la fecha de siembra en la BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.....	66
22. Curvas de crecimiento de parte aérea para <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> en ambas fechas de siembra, promediado a través de densidades de siembra.....	67
23. Efecto de la densidad de siembra sobre la BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> a la terminación del experimento, promediado a través de fechas de siembra.....	68
24. Curvas de crecimiento de BA de <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> . (A: densidad alta; B: densidad baja).....	69
25. Efecto de la fecha de siembra en la BR de <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.....	70
26. Curvas de crecimiento de raíces para de <i>L. multiflorum</i> y <i>R. sativus</i> para ambas fechas de siembra y densidades en los distintos muestreos.....	71
27. Correlación para <i>T. Resupinatum</i> y <i>T. Vesiculosus</i>	73
28. Correlación para <i>R. Sativus</i> y <i>L. multiflorum</i>	74
29. Correlación para <i>B. napus</i> y <i>L. multiflorum</i>	75

Foto No.

1. Siembra e instalación del experimento.....	32
2. Tamiz y tarrinas utilizadas en el proceso de lavado de raíces.....	32
3. Tamiz y tarrinas utilizadas en el proceso de lavado de raíces.....	32
4. Remojo de raíces en las tarrinas	32
5. Remojo de raíces en las tarrinas	33
6. Desagregación del contenido de la maceta con pala de diente para mayor facilidad de manipuleo del sustrato.....	34
7. Exceso de raíces en la frontera de la maceta (contacto del sustrato con nylon).....	46

1. INTRODUCCIÓN

El carbono orgánico del suelo (COS) se relaciona con la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, afectando las propiedades físico-químicas del suelo relacionadas al rendimiento sostenido de los cultivos (Alvares y Stainbach 2006, Martínez Haedo 2008). La rotación de cultivos es una variable de manejo que afecta significativamente la calidad de los suelos y que puede determinar diferencias importantes en el rendimiento de los cultivos. En 1963 se instaló en el INIA La Estanzuela, Uruguay, un experimento de sistemas de rotación cultivos-pasturas con el objetivo de evaluar los cambios en los factores abióticos y bióticos que afectan la productividad del suelo (Ríos et al., 1992). Este experimento determinó la importancia de la rotación cultivo-pastura en el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la estabilidad del sistema. La necesidad de realizar rotaciones o planteos agrícolas que aumenten la fertilidad del suelo y el secuestro de C atmosférico, son actualmente tema de debate y preocupación entre científicos y productores, tanto a nivel regional como global (Robertson y Swinton, 2005).

El COS resulta de un balance entre los ingresos de materiales de origen vegetal y los egresos por la erosión y la degradación de los compuestos carbonados como consecuencia de la respiración microbiana (Álvarez y Stainbach, 2006). De acuerdo a las prácticas agrícolas y el sistema de manejo adoptado, el suelo actúa como fuente o destino de CO₂ atmosférico (Lal et al., Bruce et al., citados por Dos Santos et al., 2007) y se ha documentado, tanto local (Morón et al. 1994, Álvarez 2001, Fabrizzi et al. 2003) como globalmente (Burke et al., 1989) que el reemplazo de pastizales naturales por cultivos anuales provoca una disminución en el contenido de COS. Reicosky (2002) estimó que desde que se incorporan nuevos suelos a la agricultura, haciendo referencia a suelos de diversa aptitud agrícola, hasta establecer sistemas intensivos de cultivo, se producen pérdidas de COS que fluctúan entre 30 y 50% del nivel inicial de COS.

Esta caída en los contenidos de COS puede deberse tanto a cambios en los egresos o en los ingresos de C al suelo. Los aumentos en los egresos de C del suelo bajo cultivos agrícolas con respecto a la vegetación natural, se asocian principalmente a la erosión y a la oxidación de la materia orgánica del suelo provocada por el laboreo (Balesdent y Balabane, 1992). En la actualidad, los sistemas de producción se destacan por tener un alto porcentaje de agricultura continua, con baja presencia de pasturas o campo natural y exceso de cultivos anuales, impidiendo aumentar los ingresos de C al suelo. Dentro de las razones por las cuales se dan bajos ingresos, se destacan: 1) la cosecha de órganos de interés, como granos por ejemplo, disminuyen una fracción de la productividad primaria neta (PPN) que llega al suelo (Bolinder et al., 1999); 2) la PPN de las pasturas o el campo natural generalmente es superior a la de los cultivos anuales (Guerschman 1998, Álvarez y Steinbach 2006); 3) la fracción de la PPN que se destina a

la biomasa radicular es significativamente superior en pasturas naturales perennes que en cultivos anuales (Bolinder et al. 1997, Guerschman 1998).

A nivel regional, existe una gran preocupación por las pérdidas de COS y nutrientes de los suelos ocasionadas por la agricultura Austin et al. (2006), Viglizzo et al.(2011) sostienen que los altos rendimientos de los cultivos de grano en Argentina, son sostenidos a expensas de descensos en el stock de materia orgánica del suelo (MOS) y a pesar del uso de la siembra directa, las prácticas agrícolas actuales estarían minando el capital de nutrientes de la región.

Como una alternativa para revertir este proceso, los cultivos de cobertura (CC) pueden, entre otros servicios ambientales, controlar la erosión (Reeves, 1994), incrementar la eficiencia en el uso de nutrientes (Lal et al. 1991, Shipley et al. 1992, Lal 1994, Delgado 1998), mejorar la infiltración del suelo (Álvarez et al., 2010) e incrementar el secuestro de C atmosférico hacia el suelo (Lal et al., 1995).

Sin embargo, poco se sabe de la contribución relativa de la parte aérea y raíces de los cultivos sobre la acumulación de COS. Resultados experimentales utilizando ^{14}C marcado, estarían indicando que los principales beneficios de la siembra directa en relación al incremento de COS, se deberían principalmente al aumento de la retención de C derivado de las raíces y no tanto a los residuos de la producción de biomasa aérea (Gale y Cambardella, 2000).

El objetivo de esta tesis, es determinar los efectos de la época y densidad de siembra en la implantación, producción de biomasa aérea, biomasa radicular y biomasa total de distintos cultivos de cobertura, para estimar su potencial contribución a la formación de COS. Para ello se realiza un experimento manipulativo en macetas a campo, en donde se sembraron dos especies de leguminosas anuales (*Trifolium vesiculoso* y *resupinatum*) y tres especies no leguminosas (*Brassica napus*, *Raphanus sativus* y *Lolium multiflorum*). El objetivo específico es recabar información objetiva para determinar la adaptabilidad de las especies estudiadas a las distintas condiciones de los sistemas de producción agrícolas del país (rotación, tipo de suelo, malezas, manejo, fecha de cosecha, etc.). También se intenta evaluar la capacidad de cumplir con los requisitos principales que deben cumplir los cultivos de cobertura de, controlar la erosión y aportar C y N al suelo, así como también el aporte de otros servicios ambientales (mejorar infiltración, controlar malezas, disminuir lavado de N, regular la temperatura del suelo, evitar la evaporación excesiva en el siguiente cultivo, entre otras).

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO (COS)

2.1.1 Materia orgánica del suelo (MOS) y COS

El C orgánico del suelo se encuentra en forma de residuos orgánicos poco alterados de vegetales, animales y microorganismos, y en formas muy condensadas de composición próxima al C elemental (Jackson, citado por Martínez Haedo, 2008). Éste mismo autor, sostiene que el COS es el principal componente de la MOS, por lo que es común que ambos términos se confundan y aclara que los métodos analíticos determinan COS (calcinación húmeda o seca) mientras que la MOS se estima a partir del COS multiplicando por factores empíricos como el de van Benmelen equivalente 1,724.

Allison, citado por Martínez Haedo (2008), aclara que como existe una considerable variación entre diferentes suelos y horizontes en el factor de conversión COS - MOS, es preferible informar el valor de COS sin transformar.

En condiciones naturales el nivel de COS de un suelo es función del clima, vegetación, topografía, material madre y tiempo. Generalmente, los suelos de textura más fina tienen altos contenidos de C orgánico (Burke et al. 1989, Carneiro et al. 2006). La principal explicación estaría dada por la mayor capacidad de protección que obtienen los compuestos orgánicos frente al ataque microbiano en suelos de textura pesada.

2.1.2 Fraciones del COS

Galantini (2002) distingue una fracción lábil del COS, disponible como fuente energética, que mantiene las características químicas de su material de origen (hidratos de carbono, ligninas, proteínas, taninos, ácidos grasos), y una fracción húmica, más estable, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas. De acuerdo con Hayes y Clapp (2001), dentro de la fracción húmica, las huminas son el componente más abundante y éstas incluyen una amplia gama de compuestos químicos insolubles en medio acuoso y contienen, además, compuestos no húmicos como largas cadenas de hidrocarburos, ésteres, ácidos y estructuras polares, que pueden ser de origen microbiano, como polisacáridos y glomalina, íntimamente asociados a los minerales del suelo (Hayes y Clapp, 2001). Las huminas representan más del 50% del COS en suelos minerales (Kononova, citado por Martínez Haedo, 2008).

Es ampliamente aceptado que los productos de la degradación de la lignina y compuestos nitrogenados son los mayores constituyentes de la materia orgánica humificada y estable del suelo (Paustian et al., 1995).

2.1.3 El COS y la calidad del suelo

La materia orgánica del suelo (MOS) es considerada el indicador simple más importante para definir la calidad del suelo (Larson y Pierce, 1991) y está fuertemente asociada a las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo (Díaz Roselló, 2003). A continuación se describen los principales efectos de la MOS y el COS sobre la calidad y sustentabilidad de los suelos.

2.1.3.1 El COS y las propiedades químicas del suelo

La fracción activa o lábil de la MOS, es quien juega un rol fundamental en la dinámica de nutrientes del suelo (Parton et al., 1987) y puede funcionar como una reserva temporaria de nutrientes (Paul, 1984).

Además, a la MOS se la vincula con la cantidad y disponibilidad de nutrientes del suelo, al aportar elementos como el N, cuyo aporte mineral es normalmente deficitario. Por otro lado, al modificar la acidez y la alcalinidad hacia valores cercanos a la neutralidad, el COS aumenta la solubilidad de varios nutrientes. El COS asociado a la MOS proporciona coloides de alta CIC (Martínez Haedo, 2008).

2.1.3.2 El COS y las propiedades físicas del suelo

La MOS del suelo tiene la capacidad, en combinación con minerales arcillosos de cementar las partículas de suelo en unidades llamadas “agregados”, estabilizando la estructura del suelo y permitiendo el intercambio de gases a las raíces (Silva, s.f.).

El COS tiene un efecto importante en la agregación de las partículas del suelo (Folletty Stewart, 1985), existiendo una relación entre tamaño de los agregados y contenido de COS. Mientras mayor es el contenido de COS lábil, mayor es el tamaño de los agregados (Buyanovsky et al., 1994). A su vez, los agregados de menor tamaño están asociados a la fracción altamente humificada con períodos de residencia en el suelo mayores a siete años (Buyanovsky et al., 1994). Rothon (2000) encontró una correlación positiva entre el porcentaje de estabilidad de los agregados y el contenido de MOS.

La MOS mejora la aereación, la permeabilidad y la capacidad de almacenaje de agua del suelo. La MOS puede retener hasta 20 veces su peso en agua (Silva, s.f.).

La estructura del suelo involucra la forma, grado y tamaño de los agregados. En consecuencia, la estructura del suelo afecta la porosidad y por lo tanto, la retención y disponibilidad de agua. Además de su capacidad para contener aire, la porosidad afecta, además, el crecimiento de las raíces de los cultivos (Acevedo y Martínez, citados por Martínez Haedo, 2008).

Krull et al., citados por Martínez Haedo (2008), consideran que la porosidad y retención de agua son dos parámetros que se encuentran estrechamente vinculados ya que la capacidad de retención de agua en el suelo es dependiente del número de poros, de la distribución de tamaño de poros y de la superficie específica de cada suelo.

A su vez, Pikul y Almarías, citados por Martínez Haedo (2008), estudiaron la distribución del espacio poroso con diferentes manejos de suelo y encontraron que al agregar materia orgánica aumentaban los poros de mayor diámetro, los cuales retienen el agua con menor energía.

2.1.3.3 El COS y la productividad de los cultivos

Pese a la existencia de abundante literatura que documenta los efectos del COS sobre las propiedades del suelo que favorecen el desarrollo de los cultivos, existe poca información sobre la contribución directa de un aumento de COS en la productividad del suelo (Martínez Haedo, 2008). El mejor indicador de los cambios en la condición del suelo es el COS, pues a través de la materia orgánica se gobierna la mayor parte de las propiedades físicas y químicas para el crecimiento vegetal y el desempeño productivo. Las estimaciones del efecto del COS en la productividad de varios cultivos, desde un ensayo de largo plazo, habilita a este indicador para su empleo en la valorización económica del recurso suelo para la producción agrícola (Díaz Roselló, 2009).

En síntesis, las pérdidas en el contenido de MOS provocan un deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas, es decir, un deterioro en la calidad del suelo (Cambardella y Elliot 1992, Six et al. 1999, Terra y García Préchac 2001, Morón y Sawchik 2003).

2.1.4 Balance de COS y sustentabilidad

Los niveles de COS son particularmente importantes debido a que los suelos son la principal reserva de C, conteniendo 3 veces más C que la vegetación que sustentan (Post et al., citados por Rasse et al., 2004). El COS corresponde al 69,8 % del C orgánico de la biósfera (FAO 2001, Swift 2001).

La fotosíntesis de la vegetación terrestre es responsable de aproximadamente la mitad del carbono que cicla anualmente entre la tierra y la atmósfera (Schimel, citado por Chapin et al., 2001).

Para afectar el balance de C en los sistemas agrícolas, se debe entender los factores que determinan en qué medida el C contenido en los residuos de los cultivos es

retenido en el suelo o liberado hacia la atmósfera como CO₂ (Buyanovsky y Wagner, 1997).

La pérdida de materia orgánica de los suelos cultivados es superior a la tasa de formación o humificación en suelos no perturbados. Por lo tanto, bajo condiciones de cultivo convencionales, el suelo es una fuente de CO₂ para la atmósfera (Kern y Johnson, Gifford y Reicosky, citados por Álvarez, 2006).

2.1.5 Prácticas de manejo que favorecen la acumulación de COS

Existen prácticas agronómicas que favorecen la captura de C en el suelo (West y Post, 2002) como por ejemplo: la siembra directa (Omonode et al., 2006), el aumento de la frecuencia de cultivos (Bremer et al. 1994, Carneiro et al. 2006) y los cultivos cobertura (Lal et al., 1995).

A partir de extensas y documentadas revisiones de resultados experimentales de largo plazo, así como de los resultados de modelos de simulación, Paustian et al. (1997), sintetizan las medidas prácticas de manejo de los rastrojos que tienen influencia positiva en el balance de C en el suelo. Estas son: 1) incrementar el tiempo del suelo con vegetación, 2) reducir o eliminar el laboreo, 3) aumentar la producción y retornar los rastrojos al suelo, 4) incluir gramíneas perennes y leguminosas, y 5) en la selección de los cultivos incluir maíz y sorgo. Por otro lado, Álvarez (2005), en una revisión de más de 250 ensayos de larga duración del mundo, encontró que los incrementos en el carbono orgánico del suelo (COS) están asociados a sistemas de labranzas conservacionistas y fertilizaciones nitrogenadas reiteradas en el tiempo. Cada nueva tonelada de N determinó, en promedio, un incremento de 2 t/ha de COS sobre los testigos.

La entrada de rastrojos con alta concentración de lignina y la adición de nitrógeno puede ser una opción de manejo que conduzca al incremento del carbono del suelo (Sowden y Atkinson 1968, Paustian et al. 1992).

2.1.6 Las rotaciones de cultivos y pasturas

Las rotaciones de cultivos con pasturas se asocian a la sustentabilidad ambiental y productiva porque presentan un gran potencial para revertir los procesos de degradación de los suelos.

El efecto positivo de la inclusión de pasturas de gramíneas y leguminosas en rotación con cultivos sobre la materia orgánica del suelo ha sido reportado en información nacional (Díaz Roselló 1992, Baethgen et al. 1994, Morón 1994). Podrían señalarse varias razones para el efecto positivo de las pasturas convencionales: a) menor erosión, b) menor mineralización de la materia orgánica del suelo, c) mayor aporte de

rastrojos, especialmente de los sistemas radiculares de las gramíneas, y d) un ingreso importante de N originado en la fijación biológica de las leguminosas.

García Préchac (2004) encontró que rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo realizadas durante 26 años en un Argiudol Típico (Colonia, Uruguay), mantuvieron la productividad del suelo, produciendo entre 18 y 26 % más de rendimiento por unidad de superficie que los sistemas de cultivo continuo. Los resultados de este trabajo indican que el horizonte Ap. bajo cultivo continuo presentó una disminución promedio del COS de 540 kg/ha/año, mientras que las rotaciones de cultivos con pasturas sólo perdieron 80kg de COS /ha/año

La reducción en la intensidad de laboreo y el uso de cultivos que maximicen la cantidad de residuos dejados sobre la superficie del suelo, son prácticas de manejo utilizadas para mantener o aumentar el COS (Martino 1997, Six et al. 1999).

2.2 LOS CULTIVOS DE COBERTURA (CC)

Los cultivos de cobertura brindan un servicio ecosistémico diferente al de los cultivos de provisión o cultivos para cosecha. Los CC pueden incrementar la eficiencia en el uso de nutrientes (Lal et al. 1991, Shipley et al. 1992, Lal 1994, Delgado 1998), proteger al suelo de la erosión y evitar la lixiviación y lavado de N en el invierno durante los períodos de barbecho sin ningún cultivo creciendo (Meisinger et al. 1991, Reeves 1994) y/o proveer de N al cultivo subsiguiente (Hargrove 1986, McVay et al. 1989, Power et al. 1991). A su vez pueden mejorar la agregación del suelo, la capacidad de almacenaje de agua (McVay et al., 1989), la porosidad e infiltración Álvarez et al. (2010), y aumentar el contenido de COS (Sainju et al. 2000, Álvarez et al. 2010).

2.2.1 Efecto de los CC sobre el control de la erosión

La región, y en particular el Uruguay, presentan condiciones edáficas, topográficas y climáticas que determinan un ambiente productivo de alta vulnerabilidad para los suelos. Las principales causas que lo determinan son las bajas tasas de infiltración que, ante frecuentes tormentas de alta intensidad, manifiestan fuertes escurrimientos erosivos. Las rotaciones de cultivos y pasturas reducen la erosión comparadas con el cultivo permanente; El beneficio aumenta con la duración y la productividad de las pasturas. La productividad de los cultivos en la rotación aporta el nivel de conservación de los suelos. La ecuación universal de pérdida de suelo aparece como una herramienta confiable para guiar la toma de decisiones sobre uso, manejo y conservación de suelos y debe trabajarse en su refinamiento para su uso en el Uruguay, sin perder de vista que existe tecnología superior disponible (García Préchac, 1991). La topografía con pendientes promedio del orden del 4% favorecen la expresión de la erosión bajo esas circunstancias (Díaz Roselló, 1992).

La erosión contribuye a la disminución del COS debido a la selectividad del proceso erosivo sobre la MOS (Díaz Roselló, 1992). Barrows et al. (1963) estimaron que para el promedio de suelos de los EEUU, la concentración de MOS en los sedimentos es en promedio 2.1 veces mayor que en el suelo que los originó.

La solución proporcionada por la investigación nacional (50 años del Ensayo de Rotaciones de INIA La Estanzuela) a esta problemática fue la rotación de cultivos y pasturas perennes. Durante la fase de pasturas se minimiza la erosión y se acumula biomasa en el suelo, contrarrestando los altos niveles erosivos de la fase de cultivos con laboreo convencional.

La incorporación de la siembra directa en la década del 90 (García Préchac, 2004) y la expansión del cultivo de soja en los últimos 10 años, transformaron los sistemas tradicionalmente agrícolas ganaderos del litoral en sistemas de agricultura continua sin laboreo con predominancia del cultivo de soja. A su vez, se han incorporado nuevas áreas con potencial agrícola, en zonas con mayores limitantes edáficas, tradicionalmente ganaderas (Ernst, 2009).

Si bien la eliminación del laboreo tiende a reducir las pérdidas de suelo por erosión, el efecto depende de mantener el suelo cubierto por rastrojos o cobertura verde (Ernst y Siri, 2008). Por lo tanto, aún en SD, con rotaciones poco intensas y con bajos niveles de rastrojo como el cultivo de soja, se estiman tasas de erosión muy por encima de las tolerables. Este problema tiende a corregirse al incluir un cultivo o cobertura de invierno entre los cultivos de soja. Las rotaciones de cultivos y pasturas, con o sin laboreo, arrojan estimaciones de erosión por debajo de los niveles tolerables, salvo que la rotación alargue en demasía la fase de cultivos con alta participación de la soja, ya que, del análisis de la participación de cada cultivo en la erosión total generada en los sistemas de producción, surge la soja como el contribuyente mayoritario (62%) (Baethgen et al., 2004).

Teniendo en cuenta los bajos aportes de rastrojo de la soja, junto con su baja relación C/N, su participación en las rotaciones afectaría el mantenimiento de adecuados niveles de cobertura (Rufo, 2003), lo cual podría llevar en el largo plazo al deterioro físico del suelo.

Los sistemas de producción que se basan en un cultivo por año generan tiempos de barbecho excesivamente largos, en los que se aumenta la probabilidad de tener pérdidas por erosión. Los cultivos de cobertura, sembrados en el período invernal normalmente improductivo, permiten mantener el suelo cubierto (Ernst, 2004) y por tanto, disminuir el riesgo de erosión.

2.2.2 Efectos de los CC sobre el COS

El impacto de la reducción del laboreo y los cultivos de cobertura en el secuestro de C, ha sido el foco de numerosos estudios debido a la estrecha relación de esas medidas de manejo con el destino del C atmosférico. Se ha demostrado que el secuestro de C hacia el suelo aumenta con la eliminación del laboreo y con una mayor diversidad en la rotación (Olson et al., 2010).

A partir de 67 experimentos de larga duración, West y Post (2002) resumen que el stock de COS puede ser aumentado mediante un incremento en la intensidad de la rotación (incluyendo CC) o por el aporte de residuos orgánicos y compost.

Los cultivos de cobertura de especies no-leguminosas son efectivas en incrementar el COS producto de una mayor producción de biomasa en comparación con CC de leguminosas (Kuo et al., 1997).

Olson et al. (2010) realizaron un experimento de 8 años de duración en un suelo moderadamente bien drenado y con erosión moderada del sur de Illinois, para una rotación maíz-soja, con tres diferentes laboreos, con y sin cultivos de cobertura. Los CC no afectaron la población de plantas ni los rendimientos de grano. Sin embargo en los tratamientos con siembra directa y cultivos de cobertura la erosión fue reducida y se logró mantener el contenido de COS en niveles más altos que en el resto de los tratamientos.

Venkateswarlu et al. (2007) encontraron que la incorporación de *Macrotyloma uniflora* (leguminosa anual estival) como cultivo de cobertura en suelos (alfisoles) de muy bajo contenido de MO (menor a 0.5%), en una región semi-árida-húmeda (700mm anuales) de India, provocó incrementos de 24% en el contenido de MO en comparación con los tratamientos con barbecho fuera de la estación lluviosa de crecimiento (octubre a mayo). Al finalizar el experimento, el incremento en los rendimientos promedio de grano de la rotación sorgo-CC-girasol, fue de 28% (22 a 33%) y 18% (10 a 33%) en tratamientos sin fertilización, en comparación con los tratamientos con barbecho para el sorgo y el girasol respectivamente. Los efectos de la incorporación del cultivo de cobertura fueron aún mayores en los tratamientos que recibieron fertilización, lo cual permitió obtener rendimientos mayores de ambos cultivos para la mayoría de los años del período de evaluación 1994-2003.

A partir de varios experimentos realizados en el sureste de Brasil, Carneiro et al. (2006), concluyeron que la acumulación de carbono en suelos bajo siembra directa, ocurrió principalmente en las capas superiores del suelo y los mayores niveles fueron obtenidos con la combinación de siembra directa y una leguminosa tropical como cultivo de cobertura en sistemas de producción de maíz. La textura no tuvo efectos sobre la acumulación de C bajo sistemas de manejo conservacionista del suelo. El incremento de las entradas de C y N proveniente de los residuos de los cultivos determinó un

incremento en el COS y este efecto fue más pronunciado bajo siembra directa que bajo laboreo convencional. Los diferentes manejos del suelo afectaron en mayor medida al C orgánico particulado que el carbono total. La protección física de la COS fue evidenciada como un importante mecanismo de acumulación de C bajo siembra directa.

2.2.3 Efectos de los CC sobre la dinámica del agua

Álvarez et al. (2010), en un experimento realizado por EE INTA- Gral. Villegas en 4 localidades de la provincia de la Región Pampeana, encontraron cambios positivos - por la incorporación de CC (gramíneas invernales en sistemas con soja como cultivo predominante) en la estructura del suelo, que se manifiestan a través de mejoras en la infiltración, estabilidad de los fragmentos, MOT (materia orgánica total) y MOJ (fracción mayor a 100 μm). Los resultados de este experimento indican que la variable que más se modificó en todos los sitios fue la infiltración acumulada (+36% promedio 4 localidades). La MOT, MOJ, estabilidad de fragmentos y porosidad aumentaron 9.3, 7.7, 18.6 y 10,4% respectivamente. Por otro lado la densidad aparente disminuyó 1.4% en promedio.

En los sitios con régimen subhúmedo, se observó un efecto negativo sobre la oferta hídrica para el cultivo siguiente, por la incorporación de CC que consume parte de del agua acumulada previa a la siembra del cultivo de renta.

En un estudio realizado por Scianca et al. (2008), en el que se instalaron diferentes especies como cultivos de cobertura en un Argiudol típico del noreste bonaerense, se concluyó que, si bien el contenido hídrico del suelo al momento del secado de los CC fue menor que el tratamiento control, no provocó un impacto negativo sobre el rendimiento de soja y sus componentes.

Estos mismos autores determinaron que el centeno fue la especie de mayor precocidad en la producción de materia seca y por lo tanto tuvo mayores valores de EUA. En las condiciones de Uruguay, con un régimen hídrico aproximadamente isohigro y suelos con capacidad de almacenaje de agua restringido, las posibilidades de afectar el normal desarrollo de los cultivos de verano por el agua consumida por los cultivos de cobertura, es sustancialmente más baja que en las condiciones en que se desarrollaron estos experimentos.

2.2.4 Efectos de los CC sobre la dinámica de nutrientes

El cultivo de soja, a pesar de que una gran proporción de N es fijado mediante simbiosis desde la atmósfera (50-60%)(Salvagiotti et al., 2008), resulta insuficiente para compensar la extracción de N en el grano al momento de la cosecha, produciendo balances negativos de N (Austin et al., 2006). Por otro lado Alves et al., citados por Cisti

(2004), encontraron valores de hasta 80% de N derivado de la fijación biológica en condiciones de la región del sur de Brasil.

Estudios en Argentina demuestran que los altos rendimientos de los cultivos de grano, son sostenidos a expensas de descensos en el stock de MO del suelo, y a pesar del uso de la siembra directa, las prácticas agrícolas actuales estarían minando el capital de nutrientes de la región (Austin et al. 2006, Viglizzo et al. 2011).

Según Rosecrance et al. (2000), desafortunadamente ningún cultivo de cobertura puro ha logrado consistentemente ambos objetivos: proveer de N al cultivo siguiente y evitar la lixiviación y lavado de N durante el invierno.

Por un lado, las gramíneas son efectivas en reducir las pérdidas de N, generalmente proveen poco nitrógeno para el cultivo siguiente (Elbehar et al. 1984, Hargrove 1986). Por otra parte, las leguminosas pueden suministrar cantidades substanciales de N al cultivo subsiguiente, pero su habilidad para reducir las pérdidas de N por lavado y lixiviación en invierno y primavera son mínimas (Meisinger et al. 1990, Shipley et al. 1992, Ranells y Wagger 1997).

Sainju et al. (2005), sostienen que la inclusión de una mezcla cereal-leguminosa como cultivos de cobertura pueden aumentar los rendimientos en biomasa aérea y subterránea de la propia cobertura. El incremento en el suministro de C y N al suelo tiene el potencial de mejorar la calidad del suelo y la producción de grano en comparación con la inclusión de una sola especie como CC. A esas conclusiones llegaron luego de realizar un experimento en el cual evaluaron el efecto de la introducción de una leguminosa invernal (*Vicia villosa*) y una especie no leguminosa (*Secale cereale*) en mezcla y cada una por separada, como cultivos antecesores de algodón (*Gossypium hirsutum*) y sorgo (*Sorghum bicolor*). Los rendimientos en biomasa de la mezcla centeno y vicia superaron a los rendimientos de las siembras puras en todos los años (1999-2001), 5.6 a 8.2 Mg/ha, 6.1 a 2.4 Mg/ha y 2.4 a 5.2 Mg/ha para la mezcla centeno-vicia, centeno y vicia respectivamente.

Comparando con el tratamiento sin CC (barbecho de invierno), el contenido de C en centeno fue mayor debido a la mayor producción de biomasa, pero el contenido de nitrógeno en vicia fue significativamente mayor al de centeno. Como resultado, los contenidos de C (2260 a 3512 kg/ha) y el N (84 a 310 kg/ha) fueron mayores para la mezcla vicia-centeno que para centeno y vicia sembradas por separado. Lo mismo sucedió para la biomasa de raíces.

En concordancia con estos trabajos, en otros lugares del mundo, mezclas de leguminosa y gramínea (vicia y centeno, relación densidad de siembra 2:1) utilizadas como cultivos de cobertura son capaces de producir mayor cantidad de biomasa foliar y mayor contenido de N que los cultivos puros, centeno y vicia (Ranells y Wagger 1996, Clark et al. 1997).

Wilhelm et al. (1986) encontraron una respuesta lineal positiva de los rendimientos de maíz y soja en función de la cantidad de residuos incorporados en un sistema de siembra directa.

Restovich et al. (2011) realizaron un experimento de larga duración (2005-2011) en EEA INTA Pergamino-Buenos Aires en el que evaluaron los efectos de la incorporación de 7 especies (*Bromus*, *L. multiflorum*, avena, cebada, vicia, colza, rábano y mezcla de vicia-avena) como cultivos de cobertura, en la dinámica del nitrógeno y del agua.

El trabajo se realizó sobre un Argiudol típico con un horizonte A limo arcilloso, profundo, bien desarrollado, bien drenado, pendiente menor a 0.3%, que provenía de 7 años de secuencias que incluían trigo-soja- maíz y períodos de barbecho. La rotación utilizada fue la típica utilizada en la región de la Pampa Húmeda Argentina maíz-soja y se evaluó la incorporación de un cultivo de cobertura durante el invierno que fue suprimido con herbicida a fines de agosto principios de setiembre (baja relación C/N 12-38), cuando el cultivo siguiente era maíz y a mediados de octubre cuando el cultivo siguiente era soja (alta relación C/N 13-85).

La biomasa aérea producida y el nitrógeno consumido por los cultivos de cobertura varió entre 1.1 y 11.9 Mg ha⁻¹ y de 17 a 223 Kg ha⁻¹ de nitrógeno respectivamente dependiendo de las fechas de siembra y momento de aplicación del herbicida y del cultivo de grano antecesor.

Al momento de la aplicación del herbicida, el contenido de nitratos en los tratamientos con CC fue entre 50 y 90% menor que en los tratamientos control (sin CC), lo que demuestra la efectividad de los CC para evitar las pérdidas de nitrógeno mineralizado durante el período de barbecho.

El rendimiento de maíz estuvo relacionado fuertemente con el contenido de N del suelo a la siembra control y leguminosas > crucíferas > gramíneas, el cual fue inversamente proporcional a la relación C/N del CC antecesor al momento de la aplicación de herbicida.

Cuando las precipitaciones fueron normales o mayores al promedio, los CC no afectaron el rendimiento de grano de soja. El agua utilizada por los CC no afectó la producción de grano excepto un año extraordinariamente seco. Una mejor sincronización entre el N liberado por los residuos de los CC y las demandas de los cultivos de grano fue lograda con la mezcla de avena y vicia como antecesor del maíz y con las gramíneas como antecesoras de la soja.

En el trabajo antes citado de Scianca et al. (2008), se observó que los contenidos de nitratos en estadios avanzados del ciclo de producción de los CC (encañazón y madurez fisiológica), mostraron diferencias entre el testigo respecto de los tratamientos

con CC, esto nos indica que estos cultivos invernales incorporan los nitratos que hay en el ambiente edáfico y lo transforman en un nutriente orgánico.

2.3 CONTRIBUCIÓN RELATIVA DE LAS RAÍCES AL APORTE DE C ORGÁNICO DEL SUELO

Históricamente, la temática del mantenimiento de los niveles de carbono del suelo, ha sido analizada en términos de la cantidad y calidad de los residuos de biomasa aérea de los cultivos que retornan al suelo (Larson y Ramusen, citados por Rasse et al., 2005).

Si bien la producción de biomasa aérea de las plantas está relativamente bien documentada a partir de experimentos de campo y observaciones satelitales, la cantidad de carbono que las plantas transfieren por debajo del suelo no es aún bien conocida.

Gale y Cambardella (2000) sostienen que poco se sabe de la contribución relativa de la parte aérea y raíces de las plantas a la acumulación de carbono orgánico al suelo.

Sin embargo, estudios recientes sugieren que la contribución relativa de las raíces a la incorporación de C orgánico del suelo es mayor que la de la biomasa aérea (Broadment y Nakashima 1974, Gale y Cambardella 2000, Rasse 2005, Katterer et al. 2011).

Según Rasse (2005), la contribución relativa de las raíces al COS, es un aspecto que ha sido generalmente pasado por alto, a pesar de que parecería ser un factor clave que determina el destino de los tejidos carbonados de las plantas que se mineralizan o estabilizan como materia orgánica del suelo (MOS).

Estudios disponibles citados por este mismo autor, indican que el C de las raíces tiene mayor permanencia en el tiempo en el suelo que el C de las partes aéreas. De los pocos estudios con datos completos se estima que la permanencia promedio del C derivado de las raíces es 2.4 veces mayor que el derivado de las partes aéreas.

Comparaciones de experimentos de incubación e in situ, sugieren que la mayor resistencia química de las raíces comparada con la de las partes aéreas, es responsable sólo de una pequeña proporción (1/4) de la diferencia en la permanencia promedio en el suelo del C derivado de las raíces, en comparación con los de partes aéreas. Esto sugiere que otros mecanismos de protección de la MOS además de la resistencia química también son aumentados por la actividad de las raíces:

- 1) La protección físico-química, especialmente en horizontes profundos

- 2) Protección física a escala-micrómetro a través de micorriza y actividad de los pelos radiculares
- 3) Interacciones químicas con iones metálicos

El impacto de las condiciones ambientales de las capas profundas del suelo en la estabilización del C de las raíces sería difícil de evaluar, pero es probable que incremente aún más la relación de permanencia promedio de C raíces vs C partes aéreas en el suelo

Se esperan futuros avances de estudios isotópicos conducidos a nivel molecular que ayudarían a desentrañar el ratio de las fracciones de partes aéreas y compuestos radiculares como cutinas y suberinas a través de los perfiles del suelo (Rasse, 2005). Probablemente la fase del ciclo de carbono terrestre más desafiante para la ciencia ocurre debajo del suelo. Experimentos innovadores llevados a cabo en Suecia, demuestran la enorme influencia de las raíces y los hongos asociados en el ciclo del carbono (Chapin et al., 2001).

2.3.1 Raíces y micorrizas simbióticas

Cámaras de microvideo permiten observar el crecimiento, la longevidad y la descomposición de las raíces finas. Sin embargo, otros importantes componentes de la producción subterránea de las plantas, como los exudados de compuestos orgánicos de las raíces y la transferencia de carbohidratos con las micorrizas fúngicas asociadas, son difíciles de estudiar por medios no-destructivos y no han sido correctamente estimados (Hendrick et al., citados por Chapin et al., 2001).

Experimentos realizados por Holdberg et al., citados por Chapin (2001), mediante anillado de pinos en el Norte de Suecia, brindan una nueva aproximación que presenta una estimación integrada de la proporción de la respiración del suelo derivada de las raíces y sus micorrizas simbióticas.

Estos experimentos concluyen que al menos el 50% de la respiración de un suelo forestal proviene de las raíces y las micorrizas.

Estos resultados revelan una alta proporción de carbono localizado por debajo del suelo y su estrecha relación con todos los procesos vitales de las plantas, y sugieren que el ciclo de carbono en ecosistemas terrestres es mucho mayor y más complejo que lo que hasta ahora se creía. La producción por encima del suelo es sólo la punta del iceberg.

La proporción de la respiración derivada de las raíces en comparación con la que proviene de las micorrizas simbióticas continúa siendo un misterio. Observaciones directas de raíces finas demuestran acelerados procesos de crecimiento y

descomposición en comparación con los tejidos aéreos. Hay pocos datos de la proporción de la producción de las plantas que es alocada en las micorrizas. En consecuencia, las medidas de la producción global de C puede estar seriamente subestimada (Chapin et al., 2001).

2.3.2 Aproximaciones a la contribución relativa de las raíces al COS

Un estudio de simulación, sugiere que las raíces del maíz contribuyen 1.8 veces más al aporte de C orgánico del suelo que la biomasa aérea correspondiente (Molina et al., citados por Rasse, 2005).

Six et al. (2002), reportan que la contribución absoluta de las raíces a la MO particulada varió, en suelos con distinto grado de agregación, entre 1.2 y 6.1 veces más que las partes aérea.

Estimaciones de la contribución de la respiración de las raíces al total de flujo de carbono desde el suelo van desde 10 a 90%, con errores metodológicos que explican la mayoría de esta variación (Hanson et al., citados por Chapin, 2001).

En un experimento realizado por Gale y Cambardella en un Hapludol Típico (fino-limoso con 5% de arena y 27% de arcilla) en Treynor-Iowa, simulando condiciones de siembra directa y utilizando ^{14}C marcado de los residuos en superficie y de las raíces, después de 360 días, el 66% del ^{14}C contenido en los residuos de la superficie en el día 0 había sido respirado como $^{14}\text{CO}_2$, el 11 % permaneció en los residuos de la superficie del suelo y el 16% se encontraba en el suelo. Por otro lado, el 56% del ^{14}C derivado de las raíces fue respirado como $^{14}\text{CO}_2$ y el 42% permaneció en el suelo. Las fracciones grandes (500 a 2000 μm y chicas (53 a 500 μm) de la MO (POM) contenían 11 a 16% del ^{14}C derivado de las raíces, mientras que sólo 1 A 3% la POM era derivado de los residuos en superficie ^{14}C . Estos resultados muestran claras diferencias en el destino del C de los residuos de la superficie, y el C derivado de las raíces durante la descomposición, y determinan que los principales beneficios de la siembra directa en el balance de COS, se deben al incremento de la retención de C derivado de las raíces en el suelo.

Katterer et al. (2011), concluyeron a partir de un experimento de larga duración (1956-2009) en Suecia, que las raíces contribuyen más en el aporte de C al suelo que los restos de parte aérea de las plantas. El coeficiente recuperación de C derivado de las raíces fue 2.3 veces mayor que el C derivado de los restos de partes aéreas. Estos mismos autores encontraron una correlación fuerte y negativa ($R^2 = 0.71$) entre la concentración de C% en los primeros 20cm de profundidad y la densidad aparente del suelo. Esto reafirma la importancia que tiene un balance positivo de C orgánico en la estructuración del suelo y en la mejora de las propiedades físicas además de los aportes de nutrientes para las plantas, aunque en este caso los valores de densidad aparente

pueden haber estado subestimados debido a que –por su pequeño tamaño- los laboreos de las parcelas fueron realizados manualmente.

En el tratamiento con barbechos con suelo desnudo, sin fertilización ni agregado de enmiendas orgánicas, la concentración de C orgánico del suelo decreció más de 1/3 entre 1956 y 2009 partiendo de un valor inicial de 1.5%, mientras que en los tratamientos que utilizaron paja de cereales como enmienda orgánica y fertilización nitrogenada, mantuvieron o incrementaron levemente el contenido de C del suelo.

Balesdent y Balbane (1996), encontraron que la contribución de C derivado de las raíces fue 1.6 veces mayor que el C derivado de la parte aérea.

En un trabajo realizado por Wiltz (2004), los niveles de COS y del isótopo ^{13}C fueron medidos durante un experimento de larga duración de cultivo continuo de maíz bajo laboreo convencional y se determinó que estos estuvieron influenciados por el manejo de los rastrojos y el manejo del nitrógeno. El COS disminuyó durante 29 años y las pérdidas difirieron significativamente entre los tratamientos de un factorial 2x2 de manejo de rastrojos y manejo de la fertilización. El incremento total de ^{13}C de 0.77xmil en los 0-30cm y de 25% o más cuando los rastrojos fueron incorporados en vez de cosechados, o cuando niveles mayores de fertilizantes fueron aplicados fueron lo suficientemente precisos como para estimar el COS derivado del maíz independientemente del cambio total de COS. El retorno del C derivado de las raíces y sus exudados fue 1.8 veces mayor que los residuos de la parte aérea con aplicaciones de N y 1.7 cuando no se aplicó N. El total de carbono orgánico derivado del maíz (COSDM) y la relación con el COS fueron mayores con retorno de los residuos que con rastrojo cosechado o sin aplicación de N. El COSDM representó sólo el 5.3% del COS debido al laboreo. En este trabajo, los índices de cosecha fueron 20% menores y la relación Raíz/Parte Aérea (R/PA) fueron 200% mayores que la mayoría de los valores encontrados en la literatura. La relación R/PA de los tratamientos con aplicación de N fueron aproximadamente 10% menores que los tratamientos sin N. Las estimaciones de C derivado de las raíces del modelo en este experimento fueron 2 veces mayores que la mayoría de las estimaciones a partir de IC y relaciones R/PA. Gran parte de esta diferencia se podría explicar por la rizodeposición susceptible a la mineralización durante el período de crecimiento.

Las técnicas que utilizan abundancia relativa de ^{13}C han mejorado significativamente el conocimiento sobre el secuestro de C en los últimos tiempos. Los valores de ^{13}C del COS representan la contribución relativa de las especies C_3 y C_4 a la PPN (Collins et al., Boutton et al., citados por Wiltz, 2004.) Los valores de ^{13}C de plantas C_3 se ubican en el entorno de 23 a 40%mil mientras que los de las plantas C_4 oscilan entre 9 y 19%mil.

Para maíz y soja, en el sur de Minnesota, Huggins et al., citados por Wiltz (2004), reportan valores entre 12 y 26%mil

Cuando la composición de la vegetación se estabiliza por un período largo de tiempo, los niveles de C^{13} del COS en los 0-20cm se aproximan a los de la comunidad de plantas (Nadelhoffer y Fry, citados por Wiltz, 2004), porque ocurre muy poco fraccionamiento isotópico durante los primeros estadios de descomposición de la MOS en suelos minerales bien drenados (Boutton, citado por Wiltz, 2004).

Debido a que estos valores de ^{13}C persisten durante la formación y descomposición de la MOS, el coeficiente turnover de la MOS, puede ser determinado por el ratio de cambio de valores de ^{13}C con respecto al COS, para aproximarse al de la nueva comunidad de plantas (Balesdent et al., Boutton et al., citados por Wiltz, 2004).

Gregorich et al., citados por Wiltz (2004) reportaron que se acumuló más C derivado del maíz que suelos no fertilizados. Por otro lado Clapp et al. (2000) no encontraron efectos de la fertilización con N ni del manejo de residuos sobre el COS derivado del maíz en suelos bajo laboreo.

Balesdent y Balabane (1996), Allmaras et al. (2004) determinaron una medida directa del C derivado de la biomasa radical del maíz y sus exudados. Hay numerosos estudios que estiman la producción de biomasa radical en base al total de biomasa aérea y al índice de cosecha al final de la estación de crecimiento:

$$\text{Biomasa radical} = k (\text{producción de grano/IC})$$

Siendo k una constante que refleja la relación R/PA en estado de madurez e IC el índice de cosecha.

Crookston et al. (1991) determinaron un IC para maíz de 0.48 y Allmaras et al. (2004) 0.56. Estimaciones de biomasa radicular de maíz son más sensibles al k que al índice de cosecha. Se han sugerido valores de k del entorno de 0.2 a 0.4 (Buyanovsky y Wagner, 1997)

Por otro lado, medidas de laboratorio sugieren que el k debería incluir un componente por los exudados sumado a la biomasa radical intacta (Buyanovsky y Wagner 1997, Bolinder et al. 1999).

2.3.3 Evidencias de la preservación específica del Craíces (CDR) en el suelo

Algunos estudios como los de Campbell y Soon, citados por Wiltz et al. (2006), encontraron sorpresivamente baja respuesta del COS a las diferencias en los niveles de C inputs, lo que estaría sugiriendo que existen otras variables que limitan el secuestro de C además de los inputs de C.

Estudios realizados por Brye et al. (2002), sostienen que las pérdidas de C de los sistemas de producción de maíz ocurren principalmente desde la superficie del suelo (Flujo de CO_2 desde 4.6 a 13Mg de C ha año).

Experimentos de larga duración, sugieren que los residuos de las partes aéreas de los cultivos tienen un impacto limitado en los niveles de MOS comparado con los residuos de las raíces (Rasse, 2005). Campbell et al. (1991), reportaron que 30 años de restitución de la paja de trigo a los suelos no modificaron el COS de esos suelos. Clapp et al. (2000), observaron que 13 años de restitución de residuos aéreos de maíz en un sistema de laboreo convencional no fertilizado, disminuyó la contribución del maíz al stock de COS de 9.1Mg ha para raíces solas a 8.7 Mg ha para raíces y partes aéreas.

Si bien otros experimentos han demostrado una contribución significativa de los residuos aéreos de los cultivos al contenido de COS (Barber, citado por Rasse, 2005), esta contribución es menor si la comparamos con la contribución de las raíces.

Poco impacto de los residuos aéreos en el COS fueron observadas en experimentos de larga duración de quema de residuos (Moss y Cotterill, Nuttal et al., Pikul y Allmaras, Rasmussen et al., citados por Rasse, 2005). Estos resultados llevan a preguntarse cuánto más resistente es el C derivado de raíces en comparación con el C aéreo y cuáles son los mecanismos que protegen específicamente al C raíces de ser mineralizados. Evidencias cuantitativas de la preservación específica del C raíces en el suelo (ver tabla en anexos).

Los estudios de incubación promediaron una contribución relativa raíces/parte aérea de 1.3. Este valor aparece consistentemente en los distintos trabajos. Estos estudios no consideran todos los mecanismos de estabilización que favorecen la preservación selectiva del C-raíces en los suelos, como la protección físico-química. Esto podría explicar por qué este factor 1.3 es menor que el factor 2.4, derivado de los experimentos in situ.

Todos estos estudios citados dejan pocas dudas de que el C-raíces tiene una más larga residencia en el suelo que el C-aéreo, por lo que surge la pregunta de cuáles son los mecanismos que protegen al C-raíces de la mineralización en los suelos.

2.3.4 Mecanismos de preservación específica de las raíces en el suelo

2.3.4.1 Flujo de C derivado de raíces al suelo (CDR)

Rasse (2005), afirma que subestimaciones del flujo del CDR al suelo pueden potencialmente distorsionar las estimaciones de la contribución total de CDR. Según este autor, esto puede ser generado por la gran incertidumbre sobre la contribución de los exudados de las raíces y sobre la muerte y regeneración de las células radiculares. Por un lado, Barber (1979), propone que la biomasa de las raíces por un lado y los exudados y la regeneración celular por otro lado, contribuyen equitativamente al stock de COS. Si bien algunos estudios sugieren que esta contribución puede ser aún mayor

(Smucker, citado por Rasse, 2005) estudios más recientes sugieren que la estimación de Barber es un valor sobreestimado (Hutsch, Xu y Juma, citados por Rasse, 2005). Estos elementos indican que las contribuciones relativas al COS de las raíces vs partes aéreas computadas en la tabla estarían más subestimadas que sobreestimadas.

Un estudio realizado por Pujet y Drinkwater (2001), determinó que la contribución directa de la biomasa raíces fue sólo el 60% de la contribución total de C raíces al suelo.

2.3.4.2 Efecto acelerador de la descomposición (priming) debido a la rizodeposición y a la incorporación de residuos aéreos de cultivos

El efecto inductor de los residuos de las plantas a la descomposición del COS ha sido reportado en numerosos estudios, tal como lo sugieren las revisiones de Kuzyakov et al., Fontaine et al., citados por Rasse (2005).

Según Kuzyakov et al. (2001), la rizodeposición de los exudados de las raíces pueden derivar en acumulación o en consumo de C. De acuerdo con Stahr et al. (2001), los exudados solubles de raíces son compuestos lábiles que son preferentemente descompuestos y representan una fuente de C para la biomasa microbiana del suelo. La liberación de estas sustancias a la rizósfera puede acelerar la tasa de descomposición de la MOS y se denomina “Efecto inductor” o “priming” (Kuzyakov et al., 2002). También numerosos estudios reportaron contenidos de COS incambiados o decrecientes por la adición de residuos aéreos de cultivos al suelo, en comparación con la contribución de las raíces solas (Campbell et al., Clapp et al., Reicosky et al., Soon, citados por Rasse, 2005).

Para que el efecto inductor sea un mecanismo que explique la preservación preferencial del CDR, la mineralización del COS debe ser aumentada en mayor medida por el C aéreo que por los compuestos de las raíces.

Si bien algunos estudios citados por Rasse (2005), sugieren que la presencia de raíces activas en los suelos puede reducir la tasa de mineralización de MO, trabajos más recientes apuntan a un efecto inductor de las raíces vivas (Cheng et al., Fu y Cheng, Helal, Sauerbeck y Liljeroth et al., citados por Rasse, 2005).

Los estudios basados en técnicas isotópicas rastrearon el destino del C adicionado, independientemente de la mineralización del COS viejo (Balesdent y Balbane 1996, Clapp et al. 2000, Puget y Drinkwater 2001), lo que descarta la posibilidad de que los resultados estuvieran influenciados por diferencias en el efecto inductor sobre el COS viejo. Lo mismo es cierto para los métodos de incubación. En suma, ni la subestimación del flujo de C al suelo ni un mayor efecto inductor del C aéreo sobre la mineralización de la MO, explican la mayor contribución relativa de las raíces

vs las partes aéreas mostradas en la tabla. Esto lleva a cuestionar sobre otros mecanismos que preservan preferencialmente al CDR en el suelo (Rasse, 2005).

2.3.4.3 Recalcitrancia química

La recalcitrancia química de los residuos vegetales generalmente se atribuye a los compuestos aromáticos lignificados (Tegelaar et al., 1989).

La lignina es una molécula polifenólica que contiene ésteres y enlaces c-c y la descomposición microbiana de estas estructuras requiere fuertes agentes oxidativos que tienen sólo unos pocos microorganismos del suelo: “white-rot fungi”, los cuales son capaces de mineralizar por completo la lignina (Hamell, 1997). La fracción lignina obtenida por el método de Van Soest que incluye sustancias recalcitrantes como taninos, cutinas y suberinas, es en promedio más del doble en raíces que en las partes aéreas de las plantas.

La estructura molecular de la lignina de las raíces y de las partes aéreas es similar, por lo que la cantidad de la misma estaría explicando la diferencia en el potencial de degradación entre las raíces y residuos aéreos. La relación lignina/nitrógeno (L/N) ha sido propuesta como un mejor indicador de recalcitrancia química que el contenido de lignina de por sí solo (Moore et al., Parton et al., Pausitan et al., Tietema y Wessel., citados por Rasse, 2005).

Según Waid (1974), la relación L/N es en promedio 3 veces mayor en raíces que en tallos y hojas. Los mayores contenidos de taninos en las raíces de los cereales pueden contribuir a su menor tasa de descomposición. Las cutinas y suberinas son las estructuras moleculares más recalcitrantes de los suelos (Tegelaar et al., 1989). La cutina es un poliéster constituyente de la capa protectora de los tejidos aéreos de las plantas vasculares, mientras que la suberina es un poliéster análogo mayormente encontrado en los tejidos radicales (Bernards, 2002). De acuerdo con Rasse (2005), ambos compuestos tienen un alto potencial de preservación contra la mineralización y al tener algunas diferencias en su composición química, pueden ser utilizadas como biomarcadores para el estudio de la contribución relativa de las raíces y parte aérea a la MOS.

2.3.4.4 Protección fisicoquímica mediante interacción con minerales

Balesdent y Balbane (1996), sugieren una estrecha interacción de los tejidos radicales con minerales del suelo, que podría ser el principal mecanismo de protección específico para el C raíces.

Sin embargo, si este contacto directo promueve la estabilización de la MO, la lógica indicaría que el laboreo podría incrementar la estabilización de los residuos

aéreos de los cultivos por incrementar el contacto con las partículas del suelo, lo cual no es el caso, ya que la mayoría de los trabajos reportan que la tasa de descomposición de la MO aumenta mediante la incorporación de la capa superficial del suelo (Hamadi et al., citados por Rasse, 2005).

Esto implica que las raíces poseen actividades específicas, más allá de su simple ubicación en contacto con minerales del suelo, que estimulan la interacción entre los compuestos de las raíces y los minerales del suelo. Farrar et al. (2003) mostraron que las raíces interactúan con los minerales del suelo de diversas maneras. La cofia de la raíz es importante por la liberación de compuestos a la interface raíz-suelo; el crecimiento radicular es el principal factor que determina el flujo de carbono a la rizósfera. Hay dos tipos de materiales depositados por las raíces:

- 1) Exudados solubles como azúcares, aminoácidos y ácidos orgánicos
- 2) Exudados insolubles como paredes celulares, descamaciones y otros restos de raíces y mucílago

Los exudados representan 7 a 8% del total de carbono fotosintético (Farrar et al., 2003). Las raíces producen ácidos orgánicos que generalmente se consideran como compuestos lábiles, que son mineralizados en pocas horas luego de su liberación desde las raíces (Chabbi et al., Grayson et al., citados por Rasse, 2005). Sin embargo, frecuentemente se ignora que por su carga negativa, estas sustancias pueden ser rápidamente adsorbidas a la fase mineral mediante adhesión a cationes. Diversos autores han demostrado que los óxidos de Fe constituyen un efectivo adsorbente de ácidos orgánicos y podrían estar gobernando la estabilización de compuestos orgánicos en el suelo (Jones y Edwards, van Hees et al., Kaiser y Zech, Saggar, Torn et al., citados por Rasse, 2005)

De acuerdo con Oades (1978), los polisacáridos extracelulares de los mucílago radicales son compuestos lábiles que juegan un papel importante en la agregación del suelo. Debido a su alto contenido de grupos hidroxilos, son muy reactivos y pueden formar fuertes complejos con minerales y otras moléculas orgánicas. Este mismo autor demostró que el mucílago de las raíces es adsorbido por las partículas de arcilla y estabiliza los microagregados.

Según Chiu et al. (2002), éstas entradas de MO proveniente de los exudados de las raíces contribuyen a una mayor concentración de MOS en la rizósfera que en el resto del suelo.

2.3.4.5 Protección física contra microorganismos descomponedores mediante agregación

Los compuestos orgánicos liberados por las raíces juegan un papel preponderante en la interacción raíces-microorganismos-suelo: Las raíces mejoran la agregación del

suelo mediante el enmarañamiento de las partículas del suelo y mediante el incremento de la biomasa microbiana que produce polímeros que actúan como agentes vinculantes (Oades, 1979).

La disponibilidad del C orgánico para la descomposición microbiana es limitada cuando se encuentra dentro de los agregados del suelo (Golchin et al., citados por Rasse, 2005). Se ha demostrado que las raíces de *Arachis grabiata* y de malezas perennes mejoran la agregación del suelo en horizontes subsuperficiales (Sainju et al., 2003), más que incrementar los pool de C y N dentro de los agregados. Estudios sugieren que el CDR contribuye más que el C aéreo a la formación de agregados estables (Gale et al. 2000, Puget y Drinkwater 2001). La existencia de macroagregados estables en el suelo es muy importante para la estabilización de la MOS porque la formación de microagregados estables se ve fomentada dentro de los macroagregados.

El aumento en la estabilidad de los agregados puede atribuirse a la producción de polisacáridos de las raíces en la rizósfera (Reid y Goss, citados por Rasse, 2005) y por las hifas fúngicas asociadas a las raíces de las plantas (Oades, 1979). Además de la composición química del mucílago, el régimen hídrico del suelo demostró ser determinante en la formación y estabilidad de la adhesión a la superficie radical (Watt et al., citados por Rasse, 2005)

2.3.4.6 Protección por iones metálicos

La mayor protección del CDR frente a la descomposición en comparación con el C aéreo puede explicarse por la incorporación de iones metálicos como Al y Fe a los residuos de las raíces. Este mecanismo de preservación selectivo se da principalmente en suelos forestales donde el Fe y el Al son los iones metálicos más abundantes de la solución de estos suelos (Kinraide y Sweeney, citados por Rasse, 2005).

2.3.4.7 Descomposición reducida en capas profundas del suelo

Las condiciones ambientales que prevalecen en las profundidades del suelo pueden explicar la menor tasa de descomposición de los tejidos de las plantas (Gill y Burke, 2002). De acuerdo con Taylor et al. (2002), en los horizontes subsuperficiales la actividad de los microorganismos es mínima y no se encuentran hongos.

Pregitzer et al. (1998) sugieren que las menores tasas de descomposición en las capas profundas del suelo se deben a mayores cantidades de raíces leñosas con bajas concentraciones de nutrientes. Aun asumiendo que existe menores tasas de descomposición en la profundidad del suelo, esta menor descomposición no puede explicar la mayor acumulación de C en la profundidad del suelo que la esperada (Gill y Burke et al., citados por Rasse, 2005).

Jobbagy y Jackson, citados por Rasse (2005), encontraron una correlación positiva entre la distribución vertical del CO y el contenido de arcilla por lo que en la profundidad del suelo la MO parecería estar fuertemente asociada a la fracción arcilla. Análisis químicos sugieren que los compuestos alifáticos y los ácidos orgánicos de bajo peso se encuentran estrechamente asociados a la fase mineral y ambos compuestos podrían ser derivados de las raíces (Rasse, 2005).

2.3.5 Implicancias del almacenaje de C en el perfil del suelo

La contribución dominante del material derivado de las raíces a la estabilización de la MO requiere no sólo que la residencia en el suelo del CDR sea más larga que el C aéreo sino que las cantidades de CDR incorporadas en el perfil del suelo represente una proporción sustancial del total de entradas de C al suelo. Esta mayor contribución de las raíces no sólo se da en los sistemas de producción de grano (Ej. maíz) sino que también se da en los suelos forestales. Utilizando TRAP mechanistic model (Rasse et al., 2001) se demostró que durante 66 años de crecimiento de *Pinus silvestris* en Bélgica, más CDR retornó al suelo que la combinación de residuos de hojas, ramas y tallos.

En ecosistemas pastoriles, Gil et al. (2002) reportan que la productividad aérea y subterránea son similares y con tendencia a mayores contribuciones de C por parte de las raíces y también un mayor tiempo de residencia en el suelo de este. La preponderancia del CDR tiene a incrementarse a medida que aumenta la profundidad del suelo.

2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPECIES A EVALUAR

2.4.1 *Brassica napus*

Las Brassica pertenecen a la familia de las Crucíferas. Su origen es desconocido pero está presente en el este y sur de Europa, como también en el oeste de Asia. Debido a sus bondades alimenticias y su plasticidad estacional, se ha distribuido en todo el mundo (Ohio State University, s.f.).

Posee un hábito de vida anual o bienal, invernal aunque es utilizada también como forraje en el período estival. Posee hojas liradas con varios segmentos laterales, generalmente glabras aunque hay especies con pelos simples y gruesos, raíz axonomorfa y muy engrosada en la mayoría de las variedades. Las flores se agrupan en racimos, coloración amarillenta y los frutos en silicuas (Aizpuru et al. 1999, Canals 2002).

Se utilizan principalmente como forraje debido a su elevada producción de materia seca, disponible tanto en período estival como en otoño-invierno. Hojas y tallos alcanzan valores de 17 a 25% de PC y hasta 80% de digestibilidad. Tolerante a las bajas

temperaturas mientras que tiene elevada sensibilidad a la sequía y al exceso hídrico, quedando propensa a enfermedades de raíz (USDA. NRCS, s.f.).

2.4.2 *Raphanus sativus var. longipinnatus* (CCS 779)

Esta variedad, obtenida por Cover Crop Solutions de EE.UU, desarrollada especialmente para contribuir a la descompactación de suelos, posee un hábito de vida anual, invernal, raíz axonomorfa, generalmente pivotante y engrosada, tallos erectos, ramificados. Hojas basales lirado-pinnatisectas; las superiores menos divididas. Flores en racimos bracteados. Sépalos erectos, los laterales ligeramente gibosos en la base. Frutos en silicua indehisciente, con dos artejos; el inferior rudimentario, generalmente aspermo; el superior cilíndrico. Semillas de ovoideas a subesféricas, pardas; cotiledones conduplicados (Cestroviejo et al., 1993).

Dentro de los atributos más importantes se destacan: aliviar la compactación del suelo debido al importante desarrollo radicular, permitiendo un ahorro en labranza profunda. Efecto represor de malezas, lo que implica un ahorro herbicidas y a su vez un buen rastrojo para el cultivo posterior. Se han observado experiencias que este cultivo suprime o retrasa la emergencia de malezas de difícil control como conyza. Rápida descomposición lo que permite liberaciones tempranas de nutrientes muy demandados como el nitrógeno. El efecto depresor de malezas y las perforaciones realizadas por las raíces, junto con la capa de residuo en descomposición, permite que el suelo aumente su temperatura y se seque mejor temprano en la primavera (Weil et al., s.f.).

2.4.3 *Trifolium resupinatum*

También conocido como trébol persa se originó en Asia central y se cultiva tradicionalmente en el Medio Oriente y Asia Central (Irán, Afganistán y Pakistán), como también en la cuenca mediterránea (Suttie, 1999). Se desarrolla en una amplia gama de suelos, pero crece mejor en condiciones de alta fertilidad, tolera mejor suelos neutros a alcalinos. Tolerante a las heladas donde disminuye marcadamente su tasa de desarrollo.

Posee un hábito de vida anual invernal, con hábito de crecimiento semi-erecto a postrado, los tallos son fruncidos y huecos, crecimiento ramificado desde la base del tallo. Hojas trifoliadas de 1 a 3 cm de longitud, ovadas a oblongas, flores con la corola retorcida, de color rosado, con brácteas en la base; cáliz hinchado en la fructificación, pubescente (Suttie, 1999).

Como aspectos positivos a destacar: tolera condiciones de anegamiento, elevada producción de forraje de alta calidad, buena producción de forraje. Por otro lado como desventajas no posee una buena resiembra natural y posee un muy lento crecimiento invernal (Bhatti y Sartaj Khan, 1996).

2.4.4 *Trifolium vesiculoso*

Originaria del centro-sur de Europa donde se cultivaba como forraje para el período invernal, anual. Se extendió a los Estados Unidos, principalmente en el sureste, donde actualmente es el trébol más importante del país.

Posee un hábito de vida anual, invernal con hábito de crecimiento semi-erecto a partir de la corona, forma arrosada con tallos huecos, de hasta 1,5cm. Hojas con forma de flecha en la etapa de elongación del tallo y floración, mientras que en etapas tempranas de desarrollo poseen forma obovada (Frame,2007).

Requiere de suelos fértiles bien drenados, muy pobre desarrollo en suelos ácidos, mal drenados, salinos u alcalinos. Muy sensible a las heladas y moderada sensibilidad a la sequía y no tolera el exceso hídrico (Miller y Wells, 1995).

Posee una elevada capacidad de fijación de nitrógeno, una producción de MS de 6 a 8 tt/ha y una elevada producción de semilla dura lo que le permite tener una aceptable resiembra natural.

Como aspectos positivos más importantes se destacan, su alta producción de materia seca, con elevado valor nutritivo y elevado número de semilla dura. Por otra parte, como característica negativa se destaca la sensibilidad a heladas, la susceptibilidad a virus (Hoveland y Evers, 1985).

2.4.5 *Lolium multiflorum*

Especie anual, invernal, de raíz fibrosa poco profunda. Dentro de las principales características morfológicas se destacan hojas largas y anchas, de color verde claro, con los nervios de la hoja muy marcados y el envés muy brillante. Presenta vainas que abrazan el tallo, posee dos aurículas largas y una lígula claramente visible. Las hojas aparecen enrolladas en el interior de la vaina. El tallo tiene forma circular y la base es de color rojizo, alternando un color verde brillante hacia sus puntas. Finalmente la inflorescencia y las espiguillas, dispuestas alternativamente a lo largo del tallo, son también sésiles (Eusse, 1986).

Requiere de suelos fértiles para expresar todo su potencial, pero se adapta bien a suelos de menor calidad, e incluso con condiciones limitantes. Su ciclo es Otoño-Invierno-Primaveral (O-I-P), destacándose su mayor producción en las últimas dos estaciones. Con siembras tempranas se logra la mayor acumulación de forraje, se adapta a siembra directa lo que mejora la condición física del suelo (Carámbula, 1977).

El biotipo utilizado es 80% westerwoldicum, su principal característica es que florecen en respuesta a temperaturas y fotoperiodos crecientes. Se logran altas

acumulaciones de forraje en siembras tempranas. En siembras tardías es muy corto el aprovechamiento y decae rápidamente la producción y la calidad. Su nivel de ploidía es diploide $2n$, caracterizándose por poseer un mayor número de macollos por planta y hojas más finas. Son más versátiles en cuanto a clima, suelo y manejo. En general son mejores productores de semillas y más tolerantes al pisoteo y el pastoreo intenso (Muslera Pardo, 1991).

Las características del cultivar evaluado (INIA CAMARO), se destacan: ciclo largo (con floraciones tardías), hábito intermedio, macollador y muy buena producción invernal. Según los resultados de análisis de producción total de forraje del INIA de diferentes *L. multiflorum* anual para los años 2007-08, se determinaron 11040 kgMS/ha.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MARCO CONCEPTUAL Y CRITERIOS PARA LA COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES

Considerando la información incluida en la revisión bibliográfica, se pueden diferenciar claramente objetivos de mejora en las propiedades físico químicas del suelo que implican la elección de diferentes especies según sea el servicio ecosistémico que se pretende obtener. En base a estas diferencias, se decidió analizar las especies realizando comparaciones entre aquellas que busquen obtener similares objetivos. Si bien cada especie tiene atributos característicos y son capaces de aportar varios servicios se agrupará las especies según cuál sea el servicio ecosistémico principal que aportan, agrupando las especies incluidas en el estudio en tres objetivos principales:

3.1.1 Incorporación de C al suelo

Si el objetivo principal es incorporar carbono al suelo, *L. multiflorum* y *B. napus* figuran como las especies más promisorias, tanto por sus antecedentes de producción de biomasa aérea (BA) como biomasa radicular (BR). Sin embargo, es importante resaltar la gran diferencia en la morfología de las raíces de estas especies lo cual podría implicar diferencias en cuanto al proceso de estabilización del C de las raíces en el suelo. Mientras el *L. multiflorum* produce una gran cantidad de raíces finas y densas que generan un entramado en el suelo, *B. napus* produce una raíz principal de gran desarrollo donde se acumularía una buena parte de la MS y menor cantidad de raíces finas secundarias. Buscando explorar un rango diverso de morfo-fisiología de raíz y parte aérea se resolvió incorporar ambas especies al estudio.

3.1.2 Fijación de nitrógeno

Cuando el servicio ecosistémico que se busca es incorporar N atmosférico al suelo, la familia más eficiente y estudiada es la de las leguminosas. En este caso, el nicho ambiental explorado, obliga a seleccionar entre especies de ciclo invernal. Para esto se seleccionaron dos especies leguminosas anuales invernales producto del programa de mejoramiento de INIA, que cuentan con desarrollo adaptativo a nuestras condiciones. Para este trabajo se decidió no incluir mezclas de gramíneas y leguminosas, a pesar que la bibliografía sugiere son necesarias para maximizar tanto el aporte de C como de N al sistema.

3.1.3 Generación de macroporos y descompactación

La preocupación que surge de la constatación de los aumentos en densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración generados en sistemas en siembra directa, hacen que cada año exista mayor interés por alternativas que mitiguen esta problemática mediante “laboreo biológico”. Por el tamaño y la profundidad que puede alcanzar su raíz principal, *R. sativus* podría aportar en la descompactación del suelo y en la generación de macroporos que mejoren la infiltración y el almacenaje de agua para el cultivo siguiente. Por esta razón, se decidió incluir una variedad de *R. sativus* especialmente seleccionada con estos objetivos dentro de conjunto de especies estudiadas en el trabajo.

3.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EXPERIMENTO

3.2.1 Ubicación espacial y temporal

El experimento se realizó en un predio ubicado en la localidad de “Punta Espinillo”, zona rural del departamento de Montevideo, Uruguay. Latitud 34° 48' 58.97" S, Long 56° 21' 54.01" O.

Uruguay se encuentra en una región que presenta un clima templado a subtropical, con un promedio anual de 1170mm, estando distribuidos 30% en verano, 28% en otoño, 18% en invierno y 24% en primavera, con un mínimo de 1000mm para la costa sur del Río de la Plata y un máximo de 1400mm para la zona Noreste en la frontera con Brasil.

Las temperaturas medias anuales van de 16°C en el sureste a 19°C en el norte. Durante enero, el mes más cálido, las temperaturas varían entre 22°C y 27°C, mientras que en el mes de julio, el más frío la variación es de 11°C a 14°C respectivamente en cada región (MDN. DNM, 2011).

El trabajo de campo se realizó entre los meses de abril y noviembre del 2013.

3.2.2 Descripción general del experimento

El experimento se realizó en macetas para mejorar la precisión de la determinación de materia seca de las raíces.

El ensayo se ubicó sobre un terreno de 16 x 10m al cual se le construyó un cerco con maderas y nylon para proteger las macetas contra el ingreso de liebres y otros animales. Se extendió nylon de silo en el suelo para apoyar las macetas evitando la interferencia de las malezas del terreno en el desarrollo de las plantas.

Se confeccionaron las macetas de 37cm de altura x 26cm de diámetro, a partir de una bobina de polietileno negro de 100 micrones, cortadas y selladas con una selladora Impulse Sealer.

El sustrato utilizado fue una mezcla equilibrada de arena y tierra proveniente de un suelo del mismo campo, clasificado como Brunosol Éútrico Típico según la Carta de reconocimiento de suelos (MAP. DSF, 1979) de coloración pardo oscura y textura franco-arcillosa. Las macetas fueron agujereadas en el fondo para permitir el drenaje del exceso de agua.

3.2.3. Factores experimentales

a. Fecha de siembra:

La siembra de la fecha temprana se realizó el 20 de abril y el 15 de junio la tardía.

b. Especies sembradas

Se sembraron 5 especies:

- T -*Raphanus sativus* (CCS 779) – Variedad de Cover Crop Solutions® (EE.UU.) seleccionada por su precocidad, desarrollo radicular con raíz principal pivotante de gran profundidad.
- G - *Brassica napus* (Goliath)– Variedad de “nabo forrajero”, representada por Wrightson PAS S.A. Seleccionada por su capacidad de rebrote y producción de BA.
- Rg- *Lolium. multiflorum* (LE 19-45 a (INIA CAMARO)– Raigrás anual diploide obtenido por INIA.
- V- *Trifolium vesiculoso* (Glencoe EC-1 – INIA SAGIT) – Trébol vesiculoso seleccionado por INIA –Uruguay por su ciclo, sanidad y productividad.
- R- *Trifolium resupinatum* (LE 90-33 INIA) – Trébol resupinatum seleccionado por INIA – Uruguay por su ciclo, sanidad y productividad.

c. Densidad de siembra

La densidad de siembra fue evaluada sembrando una “densidad comercial” y otra “densidad alta” (comercial x 3) cuyos valores se muestran el siguiente cuadro:

Cuadro No. 1. Cálculo de las densidades de siembra por maceta en base a la densidad comercial de cada especie.

Especie	DC (kg/ha)	PMG	S/m ²	Sup.M (m ²)	S/M	DB(S /M)	DA (S/M)
<i>R. sativus</i>	4	5	100	0,051	5,0	3,5	10,1
<i>B. napus</i>	4	3,5	114	0,051	5,8	4,0	11,6
<i>L. multiflorum</i>	6	1,2	500	0,051	25,4	17,8	50,9
<i>T. vesiculosus</i>	7	1,4	571	0,051	29,1	20,3	58,2
<i>T. resupinatum</i>	5	1	600	0,051	30,5	21,3	61,1

Referencias: DC-densidad comercial; PMG- peso de mil granos; S/m²- semillas por metro cuadrado, Sup.M- superficie macetas; S/M- n° de semillas por maceta; DB- densidad B comercial; DA- densidad A alta.

Después de cada siembra se realizó un riego para asegurar la implantación y, una vez emergidas las plántulas, se hizo un raleo manual para lograr la población objetivo en cada maceta para cada especie y densidad

3.3 DETERMINACIONES REALIZADAS

Se realizaron cosechas de la BA y BR sumando 4 cortes destructivos correspondientes a la fecha de siembra 1 (Temprana) y 3 cortes correspondientes a la fecha de siembra 2 (Tardía).

Cuadro No. 2. Fechas de cortes de BA y BR

Fecha de siembra	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
1- (20-abr.)	03-jul.	02-ago.	03-set.	24-set.
2- (15-jun.)	09-set.	13-oct.	18-nov.	

Para poder comparar las fechas de siembra temprana y tardía se corrigió la producción de MS a las fechas de los cortes de la siembra temprana. La corrección se hizo a partir de la tasa de crecimiento promedio diaria durante cada período entre corte y corte mediante el siguiente cálculo:

MS corregida = ((kg de MS final – kg de MS inicial)/No. de días entre cortes)) x (N° de días de crecimiento hasta fecha de corte de siembra temprana.

Para el análisis de los resultados y discusión se determinó como fecha de supresión de los CC el 24/09, fecha considerada límite de inicio de barbecho para un posterior cultivo de verano. Si bien se contaba con cortes posteriores a esa fecha para la fecha tardía se decidió no incorporarlos a la discusión por considerar que se son fechas subóptimas para la supresión de un CC.

3.3.1 Biomasa Aérea (BA)

Se realizaron cortes al ras del suelo a los 60-90-120-150 días (aprox.) del total de BA producida sobre las macetas. Las muestras fueron secadas a estufa a 60° durante 48 horas y pesadas con balanza electrónica en el Laboratorio de Forrajeras de INIA- La Estanzuela (Dpto. de Colonia).

3.3.2 Biomasa Radicular (BR)

En cada corte de BA también se realizó determinación de BR. Para el muestreo de raíces se procedió a colocar el contenido de las macetas (previa remoción de la BA) en recipientes de 20-25 litros de agua, dejándose en remojo por 24 horas para facilitar el desagregado del suelo. Posteriormente, las macetas fueron volcadas en un tamiz dentro de un tanque de 80L de agua y las raíces fueron separadas a mano hacia tanques de lavado. Una vez lavadas las raíces fueron colocadas en bolsas de nylon y etiquetadas para permitir su conservación en freezer (-15° a -18° C) hasta el momento del procesamiento en el Laboratorio de INIA – La Estanzuela. Las muestras de raíces fueron secadas a estufa 60° por 72 horas debido a la gran cantidad de agua contenida en las mismas al momento de embolsado y pesadas con balanza electrónica en el Laboratorio de INIA – La Estanzuela.

A continuación se presentan imágenes representativas del ensayo:

Foto No. 1. Siembra e instalación del experimento



Fotos No. 2 y 3. Tamiz y recipientes de remojo utilizados en el proceso de lavado de raíces.



3.3.3 Algunas consideraciones sobre la determinación de la BR

El alto contenido de arcilla y limo del sustrato utilizado dificultó el manipuleo para separar las raíces, lo que implicó mayor tiempo de lavado. Durante el lavado se detectaron un alto número de agregados de arcilla que hacían más lenta y laboriosa la correcta separación de las raíces. El objetivo que se buscaba con el sustrato era utilizar una mezcla de similares características a la textura de los suelos del Uruguay. Este aspecto se podría solucionar en futuros experimentos utilizando un sustrato más friable, con mayor contenido de arena o materia orgánica, como así también incorporando algún agente dispersante a la hora de separar las raíces.

Por otra parte existen diferencias entre las especies atribuidas a las diferencias morfológicas de sus sistemas radiculares. Un ejemplo de esto es el sistema radicular fasciculado del *L. multiflorum*, que fue el que presentó mayores dificultades a la hora del muestreo, debido al mayor número de agregados de arcilla formados entre las raíces.



Fotos No. 4 y 5 Remojo de raíces en recipientes de remojo.



Foto No. 6. Desagregación del contenido de la maceta con pala de diente para mayor facilidad de manipuleo del sustrato.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utilizado fue un factorial de 5x2x2 (5 especies, 2 densidades, 2 fechas de siembra) - DCA (diseño completamente al azar), con 4 repeticiones por tratamiento. Como el muestreo fue destructivo se confeccionaron 320 macetas producto de los 20 tratamientos x las 4 repeticiones x 4 cortes.

A pesar de asumirse un DCA, para facilitar la operativa del ensayo y considerando que la variabilidad del sustrato, de las condiciones de radiación, temperatura, humedad y precipitaciones dentro del terreno del experimento son despreciables, las macetas fueron ordenadas como se muestra en el croquis:

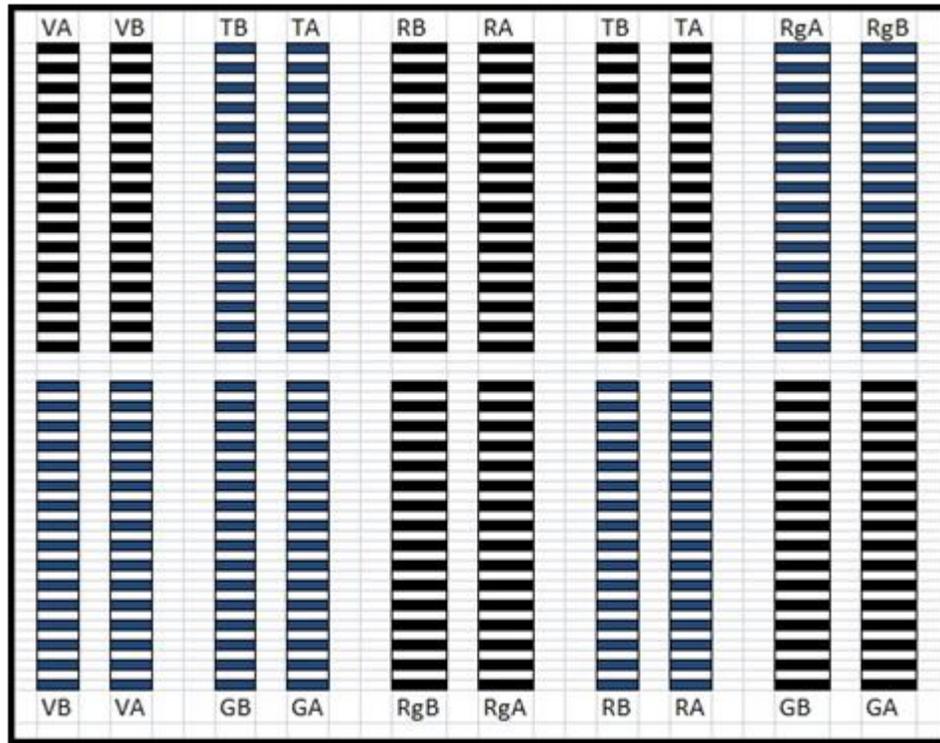


Figura No. 1. Croquis del experimento.

Las referencias para la correcta comprensión del croquis son las siguientes:

VA: *T. vesiculosus*; Densidad alta

VB: *T. vesiculosus*; Densidad baja

GA: *B. napus*; Densidad alta

GB: *B. napus*; Densidad baja

RA: *T. resupinatum*; Densidad alta

RB: *T. resupinatum*; Densidad baja

TA: *R. sativus*(CCS 779); Densidad alta

TB: *R. sativus*(CCS 779); Densidad baja

RgA: *L. multiflorum*; Densidad alta

RgB: *L. multiflorum*; Densidad baja

Los casilleros en coloración azul corresponden a las macetas relevadas correspondientes a la primera fecha de siembra, mientras que los de coloración negra corresponden a la segunda.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico, se utilizó el programa SAS®. Se utilizó un modelo completamente al azar, comúnmente utilizado en los ensayos en condiciones de macetas y se aplicó un procedimiento de análisis PROC ANOVA.

Modelo estadístico,

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Y_{ijkl} : variable estudiada

μ : media general del ensayo

α_i : efecto de la i ésima especie

β_j : efecto de la j ésima fecha de siembra

γ_k : efecto de la k ésima densidad de siembra

$\alpha\beta_{ij}$: efecto de la interacción doble, especie y fecha de siembra

$\alpha\gamma_{ik}$: efecto de la interacción doble, especie y densidad de siembra

$\beta\gamma_{jk}$: efecto de la interacción doble, fecha y densidad de siembra

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: efecto de la interacción triple

ε_{ijkl} : error experimental

3.6 HIPÓTESIS

3.6.1 Hipótesis biológicas

Las principales hipótesis formuladas son las siguientes:

1- Los cultivos de cobertura, o también denominados CPAS (cultivos para abonar el suelo), lograrán una mejor y más rápida implantación cuanto antes sean sembrados.

2- Cuanto más densos sean sembrados los mismos, mayor será la biomasa particionada en raíces para un período de tiempo fijo.

3.6.2 Hipótesis estadísticas

- $H_0: F_{s1} = F_{s2}$
- $H_a: A1 - 1 F_s \text{ es } \neq$

- $H_a: D_1 \neq D_2$
- $H_0: D_1 = D_2$

- $H_0: Sp_1 = Sp_2 = Sp_3 = Sp_4 = Sp_5$
- $H_a: A1 - 1 Sp \text{ es } \neq$

- H_0 : no existe interacción entre factores
- H_a : existe al - 1 interacción (FS x D; Fs x Sp; Sp x D; Fs x D x Sp)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO

4.1.1 Temperatura

En la figura No. 2 se presenta la temperatura media mensual (°C) durante el período experimental (abr.-nov. 2013) obtenidas de la estación agroclimática de INIA Las Brujas (ubicada a 16.5km del sitio experimental) comparadas con la temperatura media histórica (abr.-nov., desde 1972 a 2013) registradas en esa estación.

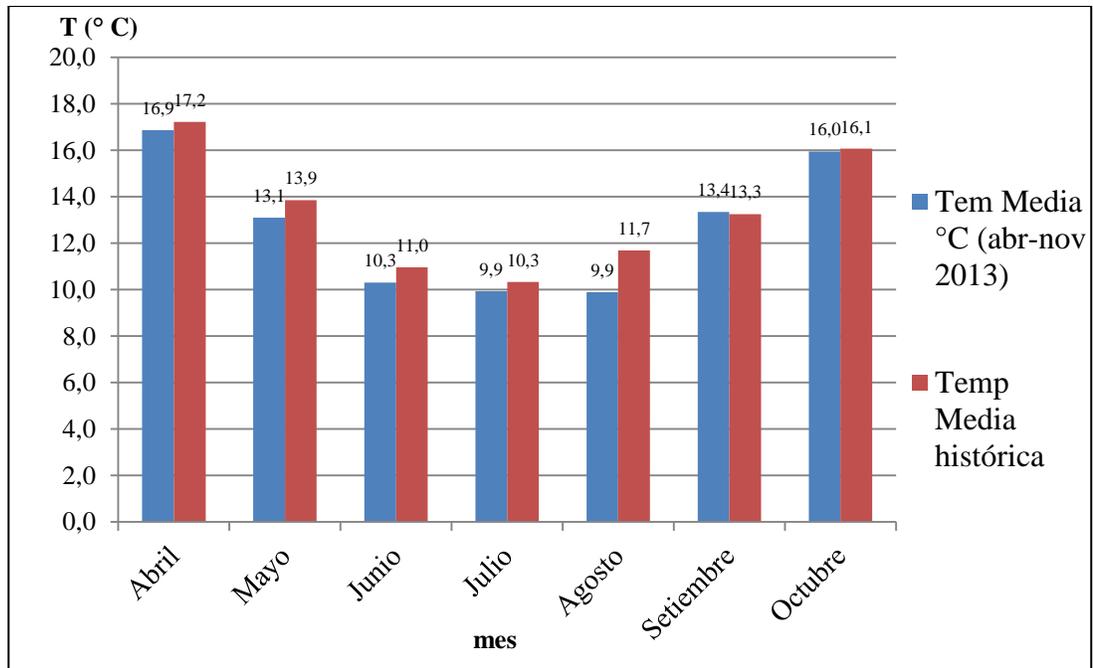


Figura No. 2. Temperatura media mensual (° C) del período experimental e histórica (1972-2013) para estación INIA Las Brujas. Fuente: Tiscornia et al. (2013)

Como puede observarse en la figura No. 2, se trató de un otoño-invierno algo más frío que lo normal, con temperaturas medias mensual entre 1 y 2°C menores que la media histórica. De todas formas, las implicancias de las diferencias en temperaturas medias observadas no deberían tener impactos agronómicamente significativos.

4.1.2 Precipitaciones y riegos

Las precipitaciones a lo largo del período experimental fueron levemente inferiores (-10%) a las precipitaciones promedio histórico de la localidad de referencia (490 mm vs. 509 mm para el período abril a setiembre inclusive). Si se comparan estos valores con la demanda atmosférica del período, vemos que las precipitaciones del período experimental 2013 fueron 55 mm mayores que la demanda atmosférica.

A pesar de este valor total, durante el invierno (meses de junio, julio y agosto) se registraron precipitaciones por debajo del promedio histórico. A pesar de esta diferencia respecto a la normal en los meses de invierno, el agua no significó una limitante para el crecimiento de los cultivos de cobertura hasta el inicio del mes de octubre, ya fuera del período definido como ventana de crecimiento óptima. Durante los primeros dos meses, las abundantes precipitaciones interfirieron en la implantación de los cultivos, generando compactación del sustrato de las macetas, que contenían un alto % de limo. El 14 de agosto, se consideró apropiado aplicar un riego de 15 mm para facilitar la incorporación del equivalente a 23 kg/ha de N en todos los tratamientos con especies no leguminosas. Posiblemente, la restricción a la exploración radicular provocada por el tamaño de las macetas impidió el aprovechamiento de los excesos de precipitaciones del mes de setiembre, donde se comenzaron a observar síntomas incipientes de marchitez en la primera semana de octubre. Considerando la situación, fue necesario realizar un riego de 30 mm el 8 de octubre. Si bien el objetivo fue siempre tratar de simular de mejor manera las condiciones comerciales de producción (a campo y en seco), el riego fue necesario para evitar la interferencia de efecto provocado por la menor cantidad del agua disponible que genera la maceta y que afecta en el estado hídrico de los CC del ensayo.

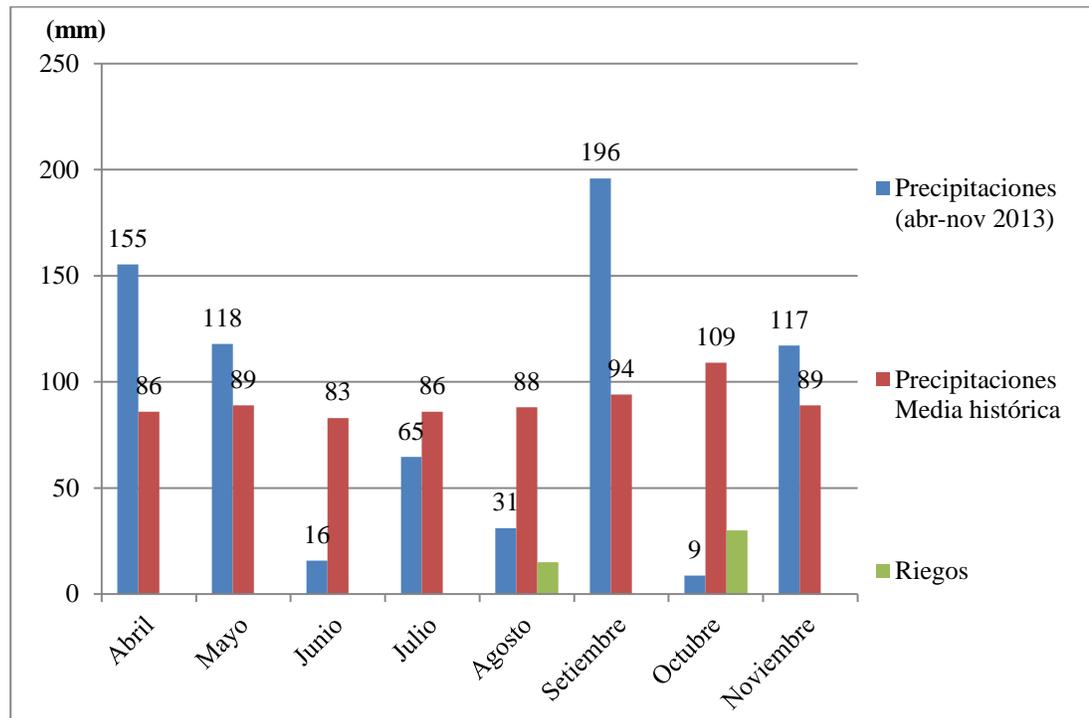


Figura No. 3. Precipitación media mensual (mm) durante el período experimental, obtenido de la estación agroclimática de INIA Las Brujas comparadas con la precipitación media histórica del período abr-nov, desde 1972-2013. Fuente: Tiscornia et al. (2013).

4.1.3 Heladas agrometeorológicas

Como se puede observar en el siguiente cuadro, el número de heladas del período experimental fue 63% superior al promedio histórico para el mismo período. Como reporta la bibliografía, y se pudo constatar a campo, las heladas impactaron negativamente sobre el crecimiento de los cultivos, sobre todo en las leguminosas anuales. En varios momentos del año fue posible observar daños en las hojas provocadas por las heladas que redujeron el área foliar de los cultivos, sobre todo en la FS tardía y sobre plantas de escaso desarrollo, afectando un porcentaje relevante de la BA total.

Cuadro No. 3. Número de heladas por mes para el período abarcado por el experimento en 2013 y media histórica

Mes	2013	1972-2013	Valor relativo de 2013 vs. Serie histórica
Abril	0	1	
Mayo	2	2	0%
Junio	10	7	143%
Julio	13	10	130%
Agosto	15	6	250%
Setiembre	6	3	200%
Octubre	3	1	300%

Fuente: Tiscornia et al. (2013).

4.2 PRODUCCIÓN DE BR, BA Y RELACIÓN R/PA

La primera observación que surge al comenzar a analizar los datos obtenidos es que la producción de BR resulta anormalmente alta respecto a la BA. Consecuentemente, la relación R/PA alcanza valores alejados de los antecedentes revisados. Este desbalance se observa consistentemente y para todas las especies, fechas de siembra y densidades.

Mientras que la bibliografía reporta valores de entre 0.15 y 0.35 para la relación R/PA (root to shoot ratio), a fin de ciclo de cultivos anuales, en este trabajo se obtuvieron valores sensiblemente más altos (Figura No. 4).

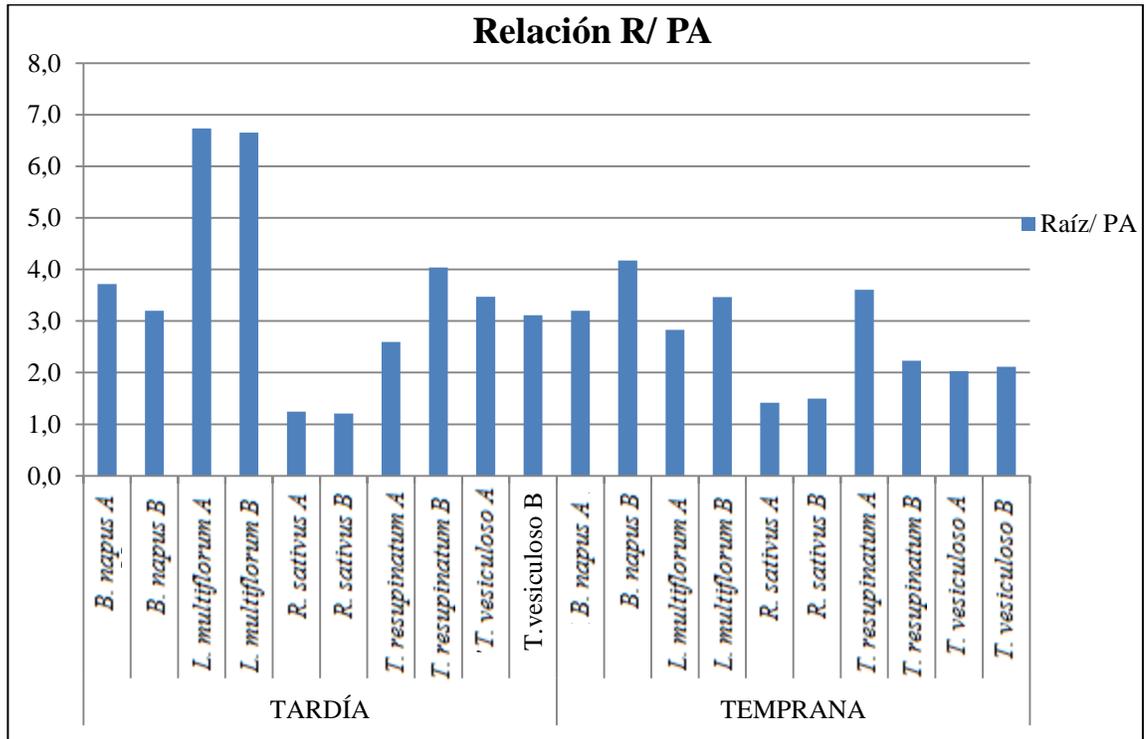


Figura No. 4. Relación R/ PA a la fecha de supresión (24/09) de todos los tratamientos.

Parece claro que, algún efecto provocado por las condiciones del experimento (macetas), y que no fue posible identificar, incidió en la excesiva producción radicular de todas las especies. Las posibles causas de lo ocurrido, no es posible explorarlas con la información con que se cuenta en este trabajo y habría que realizar una investigación complementaria para identificar las causas que expliquen la anormal producción radicular. Si bien esto escapa a los objetivos de esta tesis, de todas formas se realizó una revisión bibliográfica y se analizaron las posibles causas en forma teórica. A continuación se presenta una síntesis de la información recabada sobre los posibles factores que puedan afectar la relación R/PA de las plantas.

Por tratarse de un cociente, el valor de relación R/PA puede verse afectado por ambos componentes. En este caso, la evidencia muestra que R es el valor que presenta valores superiores a los esperados. En este sentido, es importante destacar que los valores de BA transformados de g/maceta a kg/ha se encuentran en rangos razonables para las condiciones experimentales. Por lo tanto, se descarta que el desbalance en la relación R/PA se haya debido a una menor producción aérea a la esperable y se centra el análisis en la producción radicular.

4.2.1 Factores que afectan la relación R/PA reportados por la bibliografía

Stulen y Hertog (1993) argumentan que la determinación de la relación R/PA está muy afectada por error experimental, incluyendo errores como: determinación de fronteras de desarrollo radicular, recuperación cuantitativa de raíces (especialmente raíces finas), raíces en descomposición y el control de nutrientes y agua en recipientes que contengan estas raíces. Estos efectos algunas veces pueden ser mitigados mediante el agregado de nutrientes específicos, que corrijan efectos adversos provocados por el tamaño de maceta, alterando la interpretación de los resultados experimentales finales (McConnaughay et al., 1993).

4.2.1.1. Metodología y determinaciones experimentales

Las principales fuentes de error que pudieron haber existido en el experimento fueron: 1) porcentaje de pérdida de raíces finas durante todo el proceso de lavado. En este caso, de haber existido, su efecto sería en el sentido contrario al observado, ya que subestimaría la producción de raíces 2) sobreestimación del peso provocada por la presencia de agregados de arcilla. Si bien no se realizó ninguna evaluación objetiva de la incidencia de los pequeños agregados de arcilla sobre el peso final de la muestra, ninguno de los involucrados en el proceso de lavado, secado y pesaje (además de los autores) detectaron ninguna anomalía. Entre las personas que participaron del secado, hay personal de INIA habituado al manejo de material radicular y consideraron las muestras como correctamente procesadas. Con respecto a la determinación de fronteras de desarrollo radicular, en este trabajo no pudo haber existido, ya que el contenido radicular estuvo limitado por la propia maceta.

4.2.1.2 Temperatura

En el experimento, la temperatura no fue un factor de control. De todas formas, las macetas de nylon negro sobre la superficie del suelo implican ciertas condiciones que pueden afectar la temperatura del sustrato de la maceta respecto del suelo en el mismo sitio:

- El nylon negro tiene alto albedo, por lo que la energía solar absorbida es mayor, pudiendo generar un aumento de la temperatura del sustrato de la maceta.
- La orientación de las macetas puede generar una mayor exposición a la radiación solar para aquellas que estén orientadas hacia el norte. Esto podría reflejarse en mayor temperatura para el sustrato de las macetas con esta orientación. Este efecto no estuvo correlacionado con diferencias en la relación R/PA observadas en el experimento.
- La mayor exposición del sustrato de las macetas al efecto del aire atmosférico, puede favorecer el intercambio térmico. Esto debería reflejarse en una menor inercia térmica y, por lo tanto, una mayor amplitud térmica del sustrato en las macetas respecto al suelo a campo. Esta condición tendría efectos contrapuestos,

umentando o disminuyendo la temperatura del sustrato respecto al suelo según sea la temperatura y el viento del aire que lo rodea. De todas formas, como pudo observarse en el punto 4.1.1, la temperatura del aire fue un factor que no presentó anomalías en su distribución respecto a la normal histórica.

Según DeLucía et al. (1992), la temperatura del suelo afecta la relación R/PA, determinando aumentos de la misma cuando la temperatura del suelo aumenta. Sin embargo, otros trabajos, también reportan un descenso en la relación R/PA cuando la temperatura del suelo disminuye.

Estudios en 12 especies de pasturas, cuando la temperatura del suelo aumenta de 5 a 25° C o más, la relación R/PA disminuye. Esto se podría explicar porque el crecimiento radicular depende de la fotosíntesis, una inhibición de la translocación de carbohidratos desde la parte aérea a la raíz, con descensos de la temperatura del suelo, puede también contribuir a una baja de la relación R/PA. Estudios realizados por Wilson (1988) demuestran que si se aumenta la temperatura radicular, dejando la temperatura aérea constante, como en el caso de este experimento, la relación R/PA aumenta. Además, existen resultados que marcan que la temperatura de la raíz afecta la tasa de absorción de ciertos nutrientes alterando el desarrollo radicular, aunque no hay información concluyente.

Por lo tanto, tomando en cuenta la información analizada, no habría evidencias para atribuir el excesivo desarrollo radicular a un efecto de la temperatura.

4.2.1.3 Agua y nutrientes

Shank (1945) expone que cuando un factor de suelo (nutrientes o agua) es limitante, una mayor proporción de la biomasa total es retenida en raíces, aumentando la relación R/PA. Brower (1962) explica que el crecimiento está controlado por los carbohidratos y el nitrógeno (N), ante deficiencias de N, la mayor parte del N absorbido o utilizado es usado por las raíces para su propio crecimiento, de esta manera aumenta la relación R/PA. El agregado de nutrientes podría revertir efectos negativos del desarrollo radicular cuando éstas se desarrollan en recipientes pequeños (macetas por ejemplo). En ambientes con baja disponibilidad de nutrientes, se muestra una mayor relación R/PA, normalmente debido a que las plantas optimizan su crecimiento particionando biomasa a raíces. El agua también juega un rol determinante, ante situaciones deficitarias se promueve el desarrollo radicular y por ende aumenta la relación R/PA (Wilson, 1988).

Sin embargo, las condiciones experimentales del trabajo incluyeron el control de agua y nutrientes, de manera que ninguno de estos factores limitara en forma importante el normal desarrollo de los cultivos. En base a esto y la bibliografía consultada, no parece que se pueda atribuir el desbalance entre el crecimiento aéreo y radicular a un efecto provocado por la falta o exceso tanto de agua como de nutrientes.

4.2.1.4 Control hormonal en la relación R/PA

Keeble (1931) propuso que la relación R/PA dependía de las hormonas producidas en cada parte, y que la magnitud de dicha relación está regulada por la concentración de dichas hormonas, tanto en raíz como en parte aérea. Luckwill (1960) desarrolló la teoría de que el crecimiento radicular estaba determinado por efectos sobre la parte aérea, incluyendo a la “rizocalina” determinante del crecimiento radicular, y su dependencia con la “caulocalina”, hormona o factor hormonal participante en el desarrollo de la parte aérea. Algunos autores relacionan a la “rizocalina” con las auxinas (Bonner y Galtson, 1952) y a la “caulocalina” con las citoquininas (Russell, 1977). Los autores consultados en la bibliografía coinciden en que las hormonas tienen un rol determinante en el desarrollo radicular, y por ende en la relación R/PA, aunque no está claro cómo es éste mecanismo y cuáles son las hormonas responsables. Con los elementos que surgen de la revisión de información sobre este tema, no es posible determinar con certeza que el desbalance en la relación R/PA obtenido en este experimento, haya sido consecuencia de un desbalance hormonal. En primer lugar, porque no estaba dentro de los objetivos de este trabajo determinar la presencia o no de un eventual control hormonal sobre esta relación, y, por lo tanto, no se realizó ninguna medición al respecto. En segundo lugar, la revisión bibliográfica realizada, hasta donde fue posible realizarla, tampoco se encontró información contundente sobre cuáles serían las hormonas que controlarían ésta relación, ni mucho menos bajo qué mecanismo, lo cual no permitiría formular una hipótesis fundamentada para explicar lo sucedido.

Sin embargo, un análisis conjunto de los factores anteriormente mencionados (metodología experimental, temperatura, agua y nutrientes), y, la observación de abundante masa radicular en las fronteras de las macetas, en todas las fechas, especies y densidades, podría estar indicando que el contacto de la cofia de la raíz con el nylon de la maceta, habría provocado una señal en la planta, probablemente mediada por hormonas, que desencadenara un aumento en la partición hacia la BR tal cual se observa en la siguiente fotografía:



Foto No. 7. Exceso de raíces en la frontera de la maceta (contacto del sustrato con nylon).

Para comprender lo sucedido en este trabajo serían necesarios trabajos de investigación complementarios. El efecto tan fuerte observado en la BR y las implicancias que tiene la BR en la dinámica de la materia orgánica de los suelos parecen justificar esfuerzos para dilucidar las causas que lo provocan.

4.3 ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN RADICULAR DE LAS ESPECIES EVALUADAS

4.3.1 Acumulación de MS radicular de las especies

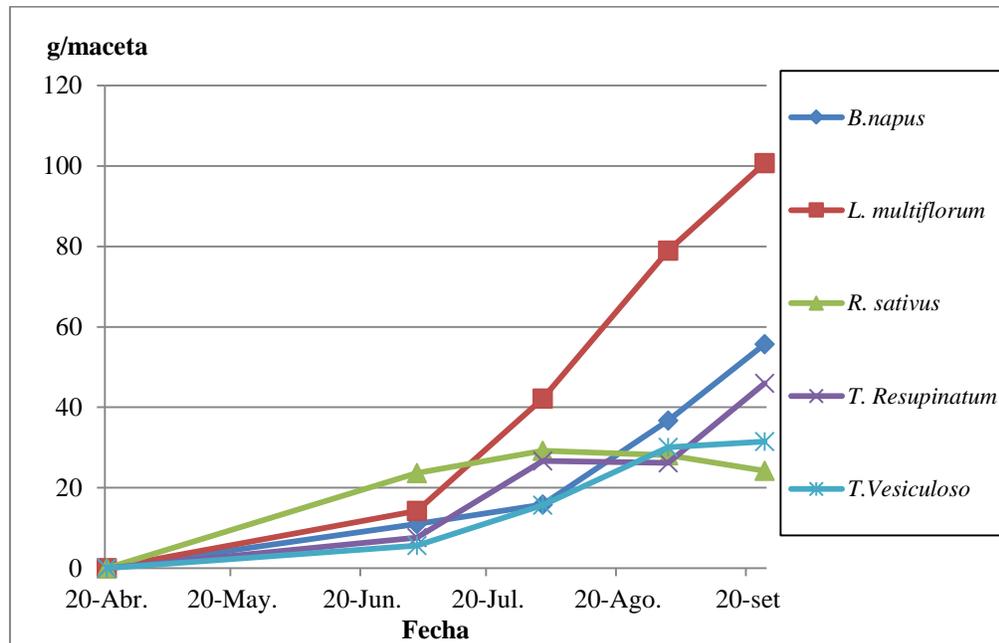


Figura No.5. Curva de acumulación de MS radicular de las especies (FS 20/04, promedio ambas densidades).

En la figura No.5 de acumulación de MS radicular para la primer fecha de siembra, donde figuran todas las especies, se observa el comportamiento diferencial de *R. sativus* del resto de las curvas de acumulación. Estas diferencias eran esperables debido a la morfo-fisiología de esta especie, caracterizada por la acumulación inicial de reservas en raíz, logrando un máximo de acumulación de BR hacia fines de julio y luego decrece levemente por translocación de reservas hacia los órganos reproductivos. A partir del segundo muestreo, en todas las determinaciones, se observa la clara superioridad del *L. multiflorum* respecto al resto de las especies. Las leguminosas tienen un crecimiento radicular muy lento al principio y, en el último mes, el *T. resupinatum* supera al *T. vesiculososo* (estas apreciaciones son coincidentes con ensayos realizados a campo con estas dos especies).¹ Al momento de supresión, *B. napus* tuvo una producción total de MS raíces de más del doble que *T. vesiculososo* y *R. sativus*, y un 60% de la producción total del *L. multiflorum*.

¹ Pinto, P. 2013. Com. personal.

4.3.2 Evolución de la relación R/ PA

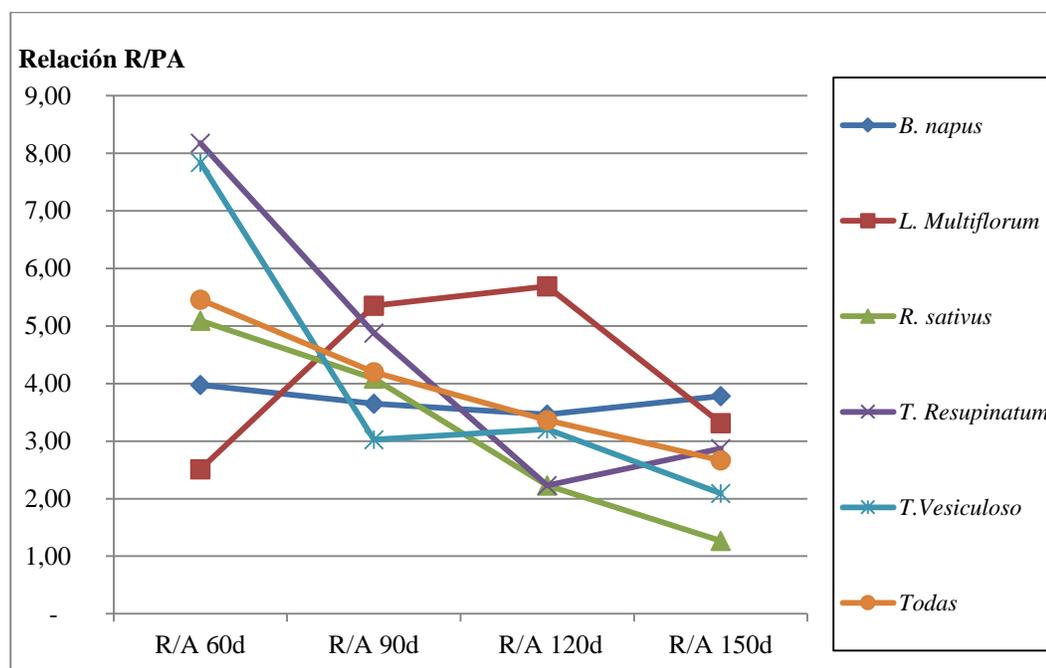


Figura No.6.Evolución de la relación R/ PA según especie (FS 20/04).

Mientras *R. sativus*, *T. resupinatum* y *T. vesiculosus* tuvieron una clara tendencia a disminuir el ratio a lo largo del ciclo, *L. multiflorum* tuvo un aumento hasta los 120 días y luego descendió (coincidiendo con el inicio del encañado) y *B. napus* se mantuvo relativamente constante.

La relación R/PA promedio de los cultivos de cobertura al 24/09 fue de 2.71 y 3.05 para las fechas temprana y tardía respectivamente, con una variabilidad importante según la especie. Estos valores son superiores a los reportados en la bibliografía consultada pero se debe considerar que la mayoría de los datos encontrados corresponden a especies a fin de ciclo, mientras que en este ensayo, en el último muestreo, la mayoría de las especies se encontraban en estados intermedios del ciclo fenológico. Nótese que en la medida que avanza el ciclo de crecimiento la relación R/PA va disminuyendo, por lo que es de esperar que en etapas finales del ciclo fenológico los valores de este ratio sean menores y parecidos a los reportados por la bibliografía.

Esto es de particular importancia, ya que, si se tiene en cuenta que las investigaciones recientes indican la mayor importancia relativa de las raíces en el aporte de COS en comparación con la parte aérea, una estrategia adecuada podría ser matar la cobertura aún en etapa vegetativa o inicio de etapa reproductiva, donde la acumulación de raíces es máxima, evitando la removilización de carbohidratos hacia las estructuras reproductivas. De esta manera el C aportado por el CC queda protegido en el suelo, donde la resiliencia es mayor y el porcentaje que es respirado por los microorganismos hacia la atmósfera como CO₂ es menor. Al mismo tiempo, se evita la dificultad para el accionar de los herbicidas en plantas con etapas reproductivas avanzadas, por lo que en especies de alta producción radicular podría evaluarse la posibilidad de suprimir la cobertura aún con menos BA. En estos casos, el rol de la rotación es clave para no depender de los CC en la generación de cobertura muerta de mayor duración en superficie “mulch”.

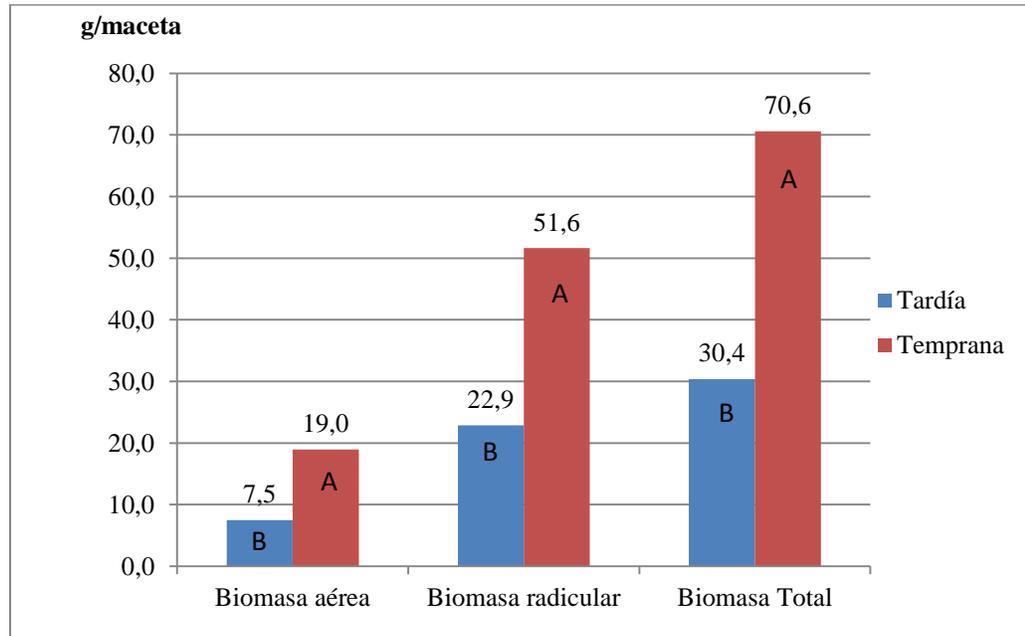


Figura No. 7. Efecto de la fecha de siembra en la producción de biomasa aérea, radicular y total para el promedio de todos los cultivos de cobertura expresados en gramos/maceta corregidos al 24/09.

Los cultivos de cobertura sembrados en la fecha temprana (20/04) produjeron, al 24/09 un 253% más de BA total y un 226% más de BR total que los de la fecha tardía (15/06). Estos resultados concuerdan con la hipótesis previa de este trabajo y son consistentes con la extensa bibliografía que reporta importantes aumentos en la producción de BA en invierno y principios de primavera de las especies forrajeras de siembras tempranas de otoño (Carámbula, 2002). Este mismo autor pone especial énfasis en la importancia de la fecha temprana en el desarrollo radicular de las especies capitalizando mejor las bajas temperaturas del invierno que favorecen el desarrollo de las raíces. Esto pudo observarse en este experimento con porcentajes de superioridad de producción de BA y radicular similares (253 y 226%) para la fecha temprana en comparación con la fecha tardía. Este efecto es particularmente importante en el caso de leguminosas, por lo que, en caso de querer proveer servicios ecosistémicos que incluyan aporte de N vía fijación biológica de nitrógeno, deberá cuidarse especialmente la fecha de siembra de los cultivos de cobertura.

4.3.3 Efecto de la fecha de siembra y de la densidad

Al 24/09 para ambas fechas de siembra, la densidad alta logró una mayor producción de BA que la densidad baja, aunque al analizarse todas las especies como un conjunto, estas diferencias no son agrónomicamente significativas debido a que se confunden los efectos diferentes que tuvo la densidad según la especie. Se observó una leve superioridad de la producción de BA de la densidad alta en la fecha tardía a la fecha de supresión.

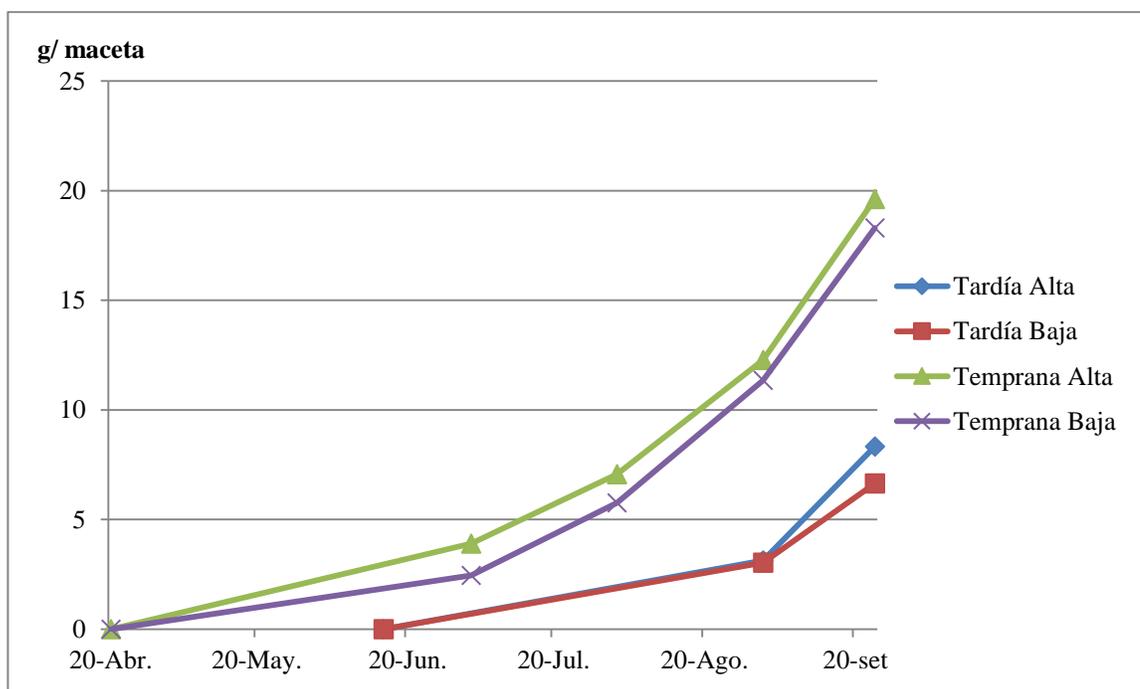


Figura No. 8. Efecto fecha de siembra y densidad sobre la curva de producción de BA total de los CC (promedio de todas las especies).

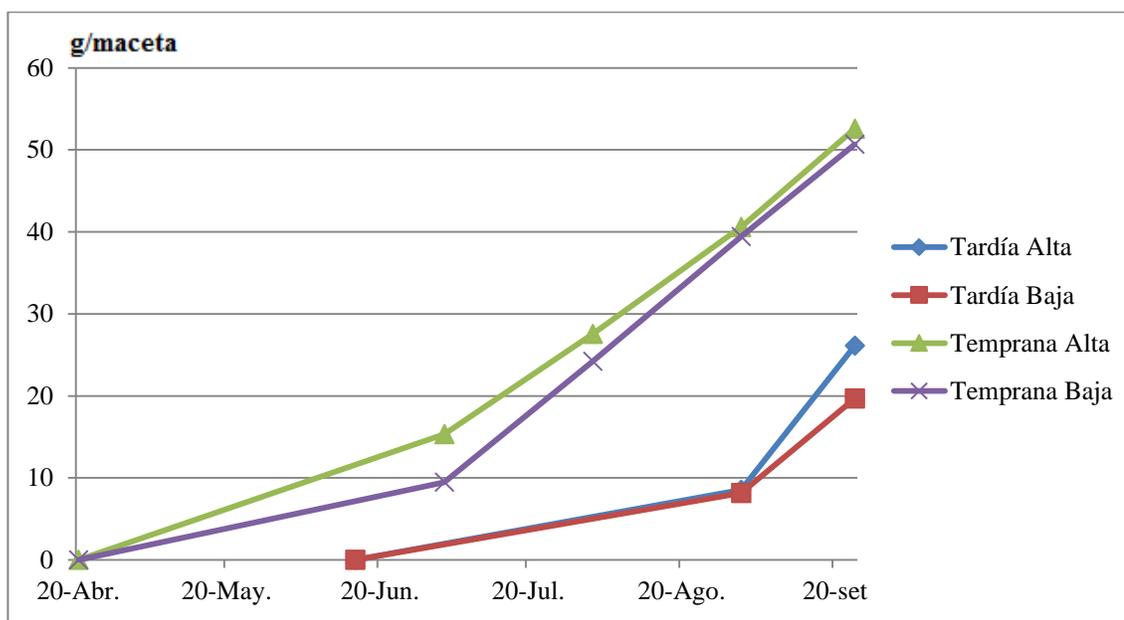


Figura No. 9. Efecto de la fecha de siembra y densidad sobre la curva de producción de BR total de los CC.

Para la fecha temprana, existe una superioridad en la producción de BR en los primeros 60-90 días de la densidad de siembra alta, diferencia que disminuye durante los últimos meses. Esto concuerda con la segunda hipótesis biológica de este trabajo de que, cuanto más densos sean sembrados los CC, mayor será la biomasa particionada a las raíces para un período de tiempo corto. Uno de los objetivos de este trabajo era determinar si existía ésta diferencia en producción de BR por aumento de la densidad y, en el caso de que efectivamente existiera, determinar el tiempo que demoran en igualarse las dos densidades por competencia por los recursos entre los individuos de una misma maceta. Si el tiempo en que demoran en igualarse es superior al período de ventana de producción de los CC, una estrategia posible sería aumentar la densidad de siembra del CC para acumular una mayor cantidad de C en las raíces durante el período de crecimiento.

En el caso de la fecha de siembra tardía, para el promedio de las especies estudiadas, se observa mayor producción de BR provocada por el aumento de la densidad de siembra a la fecha de supresión del CC. Como se analizará más adelante en esta discusión, el efecto fue diferente según la especie, y los datos sugieren que sería posible, en el caso de algunas especies, compensar transitoriamente el efecto negativo de la fecha de siembra sobre la producción radicular aumentando la densidad de siembra.

4.3.4 Efecto global de la especie sobre la producción radicular

En las condiciones de este ensayo, al 24/09, el *L. multiflorum* tuvo una clara superioridad en producción de BA y, sobre todo, radicular sobre el resto de las especies, independientemente de la fecha de siembra y/o la densidad de siembra. El *L. multiflorum* produjo en promedio un 170% más BA y un 266% más BR que el promedio de las restantes especies evaluadas. En producción de BR lo sigue el *B. napus* y el *T. resupinatum*, mientras que en BA *R. sativus* fue la segunda especie de mayor producción. Cabe consignar que, como se verá más adelante, existe una gran diferencia fenológica en el estado en que estaban las distintas especies al momento de la supresión, y esto hace variar las relaciones R/PA a una fecha fija.

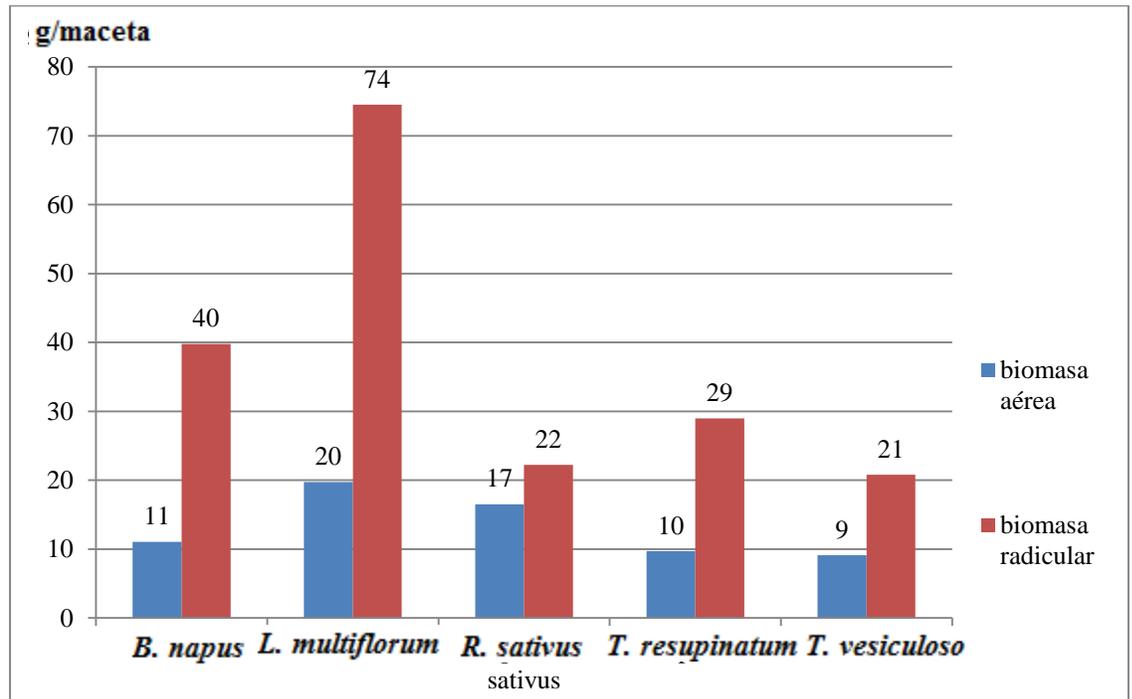
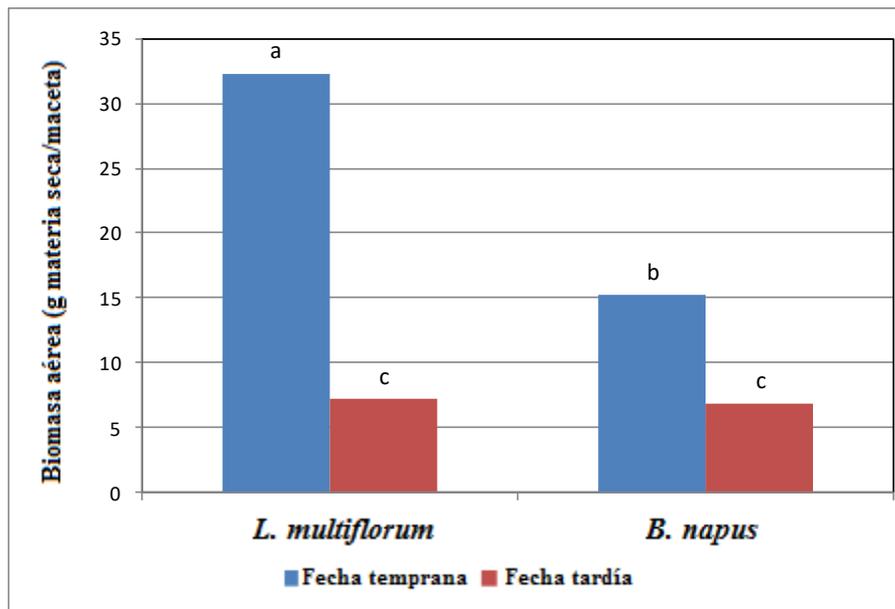


Figura No. 10. Producción de MS aérea y radicular al 24/09 de las especies evaluadas (promedio de todas las fechas y densidades).

4.4 COMPARACIÓN DE LAS ESPECIES SEGÚN SERVICIO ECOSISTÉMICO OBJETIVO PRINCIPAL

4.4.1 Incorporación de C al suelo (*L. multiflorum* y *B. napus*)

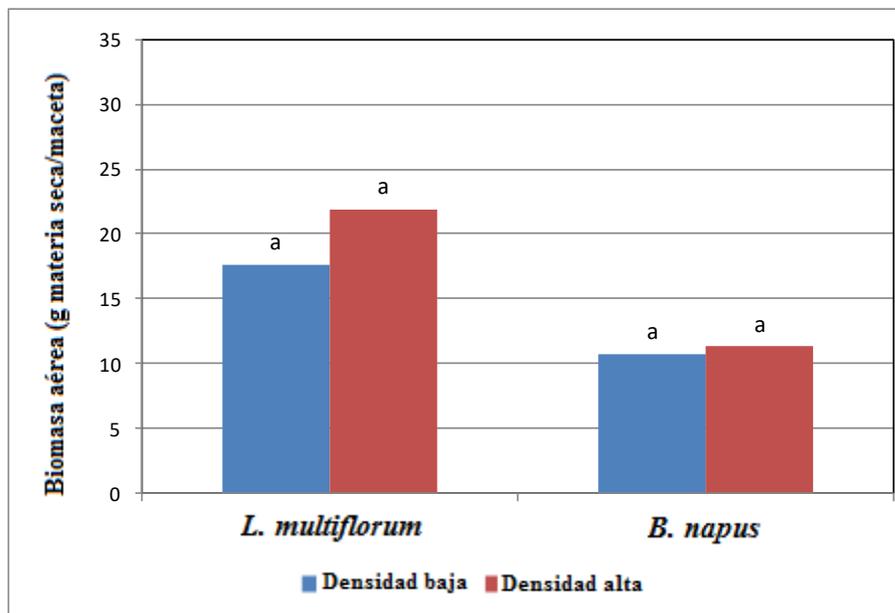
La biomasa aérea (BA) al momento de la supresión fue significativamente superior para *L. multiflorum* sembrado temprano respecto a su siembra tardía, y respecto a *B. napus* en ambas fechas de siembra (Figura No. 11). En la siembra temprana la BA de *B. napus* representó el 50 % de la biomasa producida por *L. multiflorum*, mostrando que ésta última fue mucho más eficiente en convertir los recursos disponibles a materia seca aérea. Al atrasar la fecha de siembra, la producción de BA se vio muy resentida en ambas especies, alcanzando valores muy similares entre sí. *Lolium multiflorum* fue la especie proporcionalmente más afectada por el atraso en la fecha de siembra, produciendo un 78 % menos respecto a la fecha temprana. Sin embargo, la BA de *B. napus* en la fecha tardía representó un 45 % de la correspondiente a la fecha temprana. Una ventaja de usar esta especie en el caso de siembras tardías es que posee hojas planófilas, que le permitirían lograr una buena cobertura del suelo antes que *L. multiflorum*, el cual posee hojas de tipo erectófilo. Este es un aspecto que puede resultar importante en situaciones donde el objetivo principal del cultivo de cobertura es proteger el suelo del impacto de las gotas de lluvia.



Columnas con distintas letras son significativamente diferentes para $P \leq 0.05$

Figura No. 11. Efecto de la fecha de siembra en la BA de *L. multiflorum* y *B. napus* a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.

Analizando el efecto de la densidad de siembra, el aumento de la misma tendió a incrementar la BA de *L. multiflorum* pero no la de *B. napus* ($p \leq 0.06$), para el promedio de fechas de siembra (Figura No.12). De todos modos, este incremento no parece agrónomicamente relevante. Este resultado podría explicarse por el tipo de hoja de cada especie y su disposición en la planta. *Lolium multiflorum* posee hojas angostas y erectófilas por lo que al aumentar la densidad de siembra se alcanza antes el IAF crítico, lo que anticipa el momento de mayor producción de BA. Por el contrario, *B. napus* posee hojas lanceoladas con disposición planófila que le permite lograr el IAF crítico a menores densidades de siembra.



Columnas con distintas letras son significativamente diferentes para $P \leq 0.05$

Figura No.12. Efecto de la densidad de siembra en la BA de *L. multiflorum* y *B. napus* a la terminación del experimento, para el promedio de ambas fechas de siembra.

Los resultados presentados anteriormente corresponden a la BA acumulada a la fecha de supresión fijada. De todas formas, sin hacer una comparación estadística,

observamos que no existe un efecto claro de la densidad de siembra en la BA para las cortes intermedios (Figura No. 13).

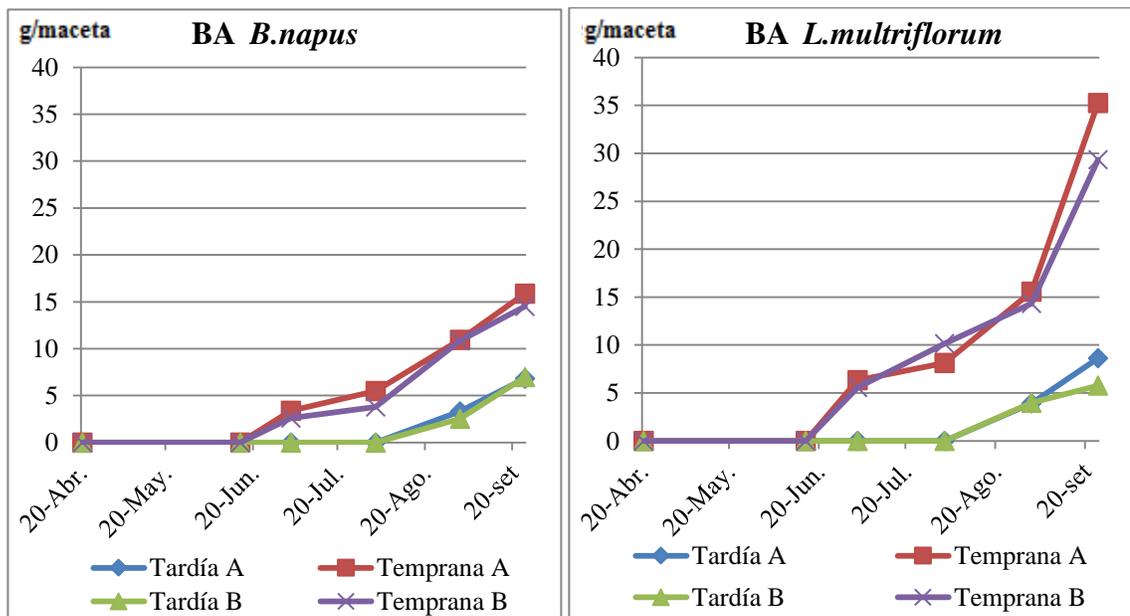


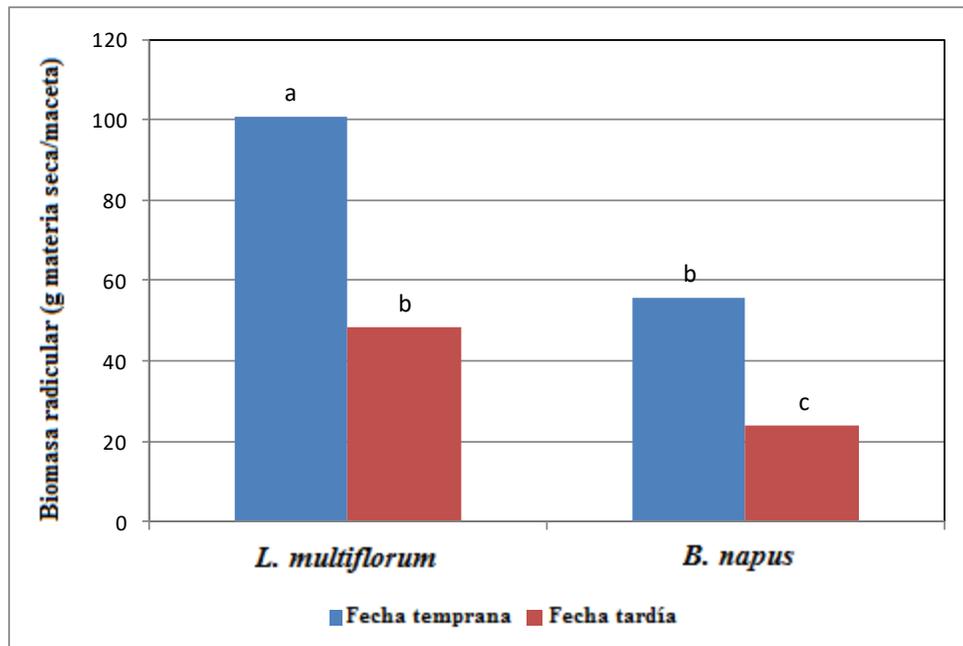
Figura No. 13. Curvas de crecimiento de BA de *L. multiflorum* y *B. napus* (A: densidad alta; B: densidad baja).

Aproximadamente la mitad de la BA total de *L. multiflorum* sembrado temprano fue acumulada en las últimas 3 semanas previas a la fecha de supresión del experimento, debido al cambio en la fenología (inicio de encañado) de esta especie en el mes de

setiembre. Esta rápida acumulación de biomasa previo a la terminación fue la responsable de generar la mayor parte de la diferencia a favor de *L. multiflorum* respecto *B. napus*.

Los resultados de biomasa radicular (BR) muestran una clara superioridad de *L. multiflorum* respecto a *B. napus*, superándolo en 81 % y 103 % para la FS temprana y FS tardía, respectivamente (Figura No.14). Además, el atraso en la FS disminuyó significativamente la producción radicular de ambas especies. En *L. multiflorum* el atraso en la FS generó una reducción en la BR del 52 %. En *B. napus* esta disminución fue del 57 %. Este resultado indica que aún en siembras tardías *L. multiflorum* puede realizar un aporte interesante de C al suelo vía raíces, siendo este un aspecto que generalmente no se considera dado que la BR no es visible y rara vez es medida.

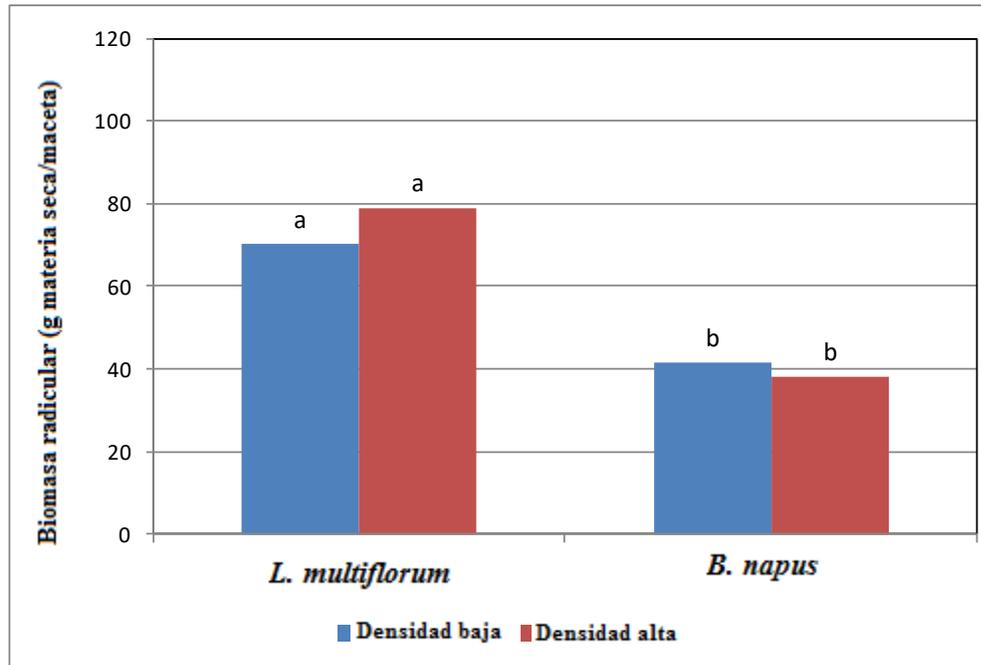
Otro aspecto a tener en cuenta es la respuesta diferencial de la BA y radicular de *L. multiflorum* y *B. napus* al atraso en la fecha de siembra. La producción de raíces de *L. multiflorum* fue notoriamente menos afectada que la BA, indicando que, en el caso de este experimento, cuando las condiciones de temperatura y radiación son menos favorables, el órgano menos afectado por los efectos ambientales es la raíz.



Columnas con distintas letras son significativamente diferentes para $P \leq 0.05$

Figura No.14. Efecto de la fecha de siembra en la BR de *L. multiflorum* y *B. napus* a la terminación del experimento, para el promedio de ambas densidades de siembra.

La densidad de siembra no determinó diferencias estadísticamente significativas en la BR de cada especie a la fecha de supresión (Figura No.15).



Columnas con distintas letras son significativamente diferentes para $P \leq 0.05$

Figura No.15. Efecto de la densidad de siembra en la BR de *L. multiflorum* y *B. napus* a la terminación del experimento, para el promedio de ambas fechas de siembra.

Los resultados de BR según densidad de siembra para los muestreos intermedios no muestran ventaja de las densidades altas aún en los primeros muestreos (Figura No.16).

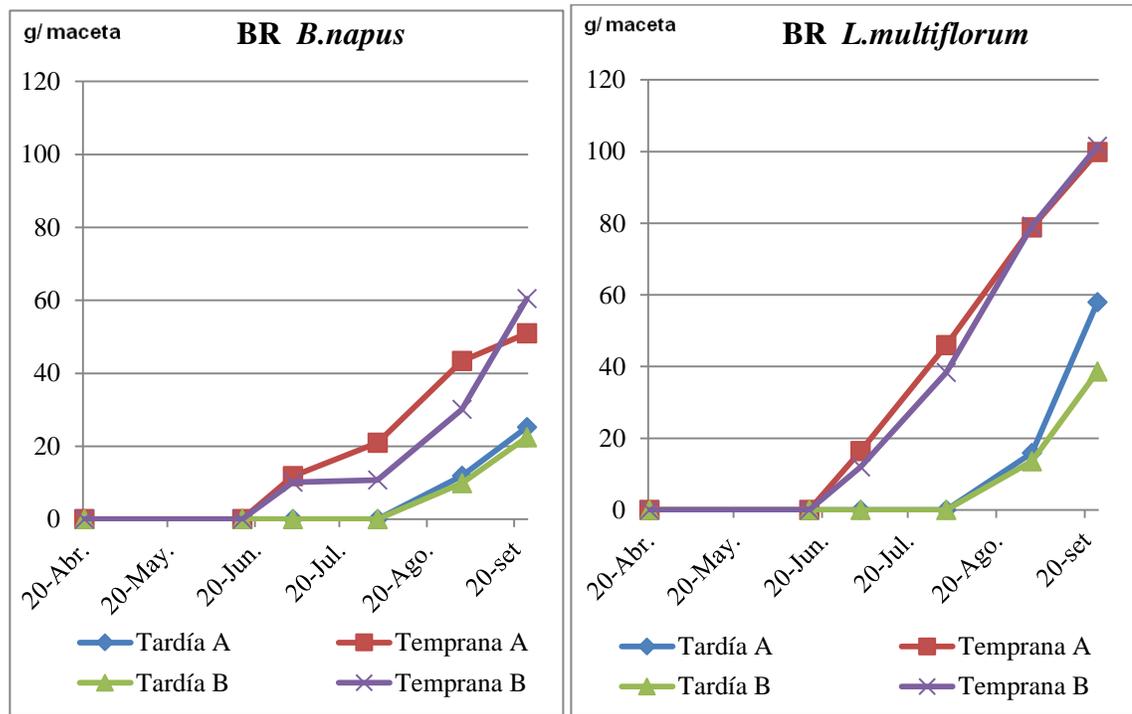


Figura No. 16. Curvas de crecimiento de BR de *L. multiflorum* y *B. napus*. (A: densidad alta; B: densidad baja).

La Figura No.16 muestra que las curvas de crecimiento radicular para la fecha temprana fueron distintas para *L. multiflorum* y *B. napus*.

Lolium multiflorum comenzó a mostrar una clara superioridad en BR a partir de segundo muestreo. La tasa de acumulación de BR en *L. multiflorum* fue aproximadamente constante a lo largo del período experimental, sin observarse la respuesta exponencial al cambio fenológico reportada para BA. Estos resultados muestran que, aun suprimiendo *L. multiflorum* a principios de setiembre, lo que determina una importante reducción en la BA producida, ésta especie igualmente puede realizar un aporte significativo de C al sistema suelo por la vía de raíces.

Por otra parte, adelantar la fecha de supresión de cultivos de cobertura puede ser una alternativa interesante dadas las dificultades que se observan a campo para controlar coberturas de *L. multiflorum* en estado reproductivo con herbicidas sistémicos.

4.4.2 Fijación de nitrógeno

Ambas especies leguminosas tuvieron una BA muy similar para cada fecha de siembra, y la misma representó aproximadamente la mitad de la BA lograda por *L. multiflorum* en cada caso (Figura No.17). El atraso en la fecha de siembra determinó una muy pobre performance productiva de ambas leguminosas, con la BA en la fecha tardía representando aproximadamente el 22 % de la producida en la fecha temprana. Estas dos especies son muy susceptibles al frío en etapas tempranas de su crecimiento, lo cual hace que tengan una muy lenta implantación y prácticamente nulas tasas de crecimiento durante el invierno en situaciones de siembras tardías.

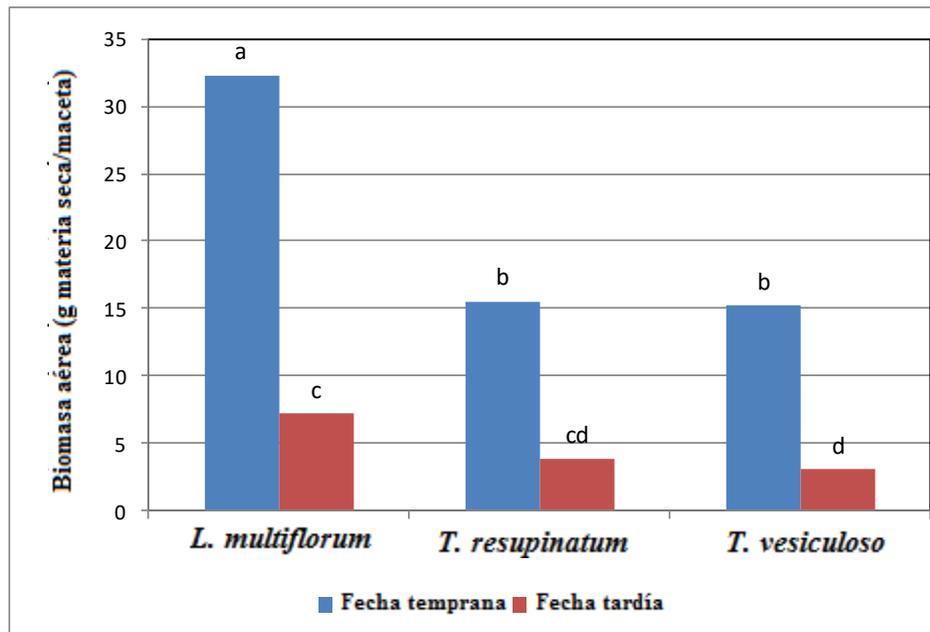


Figura No.17. Efecto de la fecha de siembra en la BA de *L. multiflorum*, *T. resupinatum* y *T. vesiculoso* a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.

A diferencia de lo ocurrido con *L. multiflorum*, el aumento en la densidad de siembra (promediado a través de fechas de siembra) no determinó cambios significativos en la BA final producida por ambas especies leguminosa (Figura No.18). Esto es un indicador que la menor densidad usada de las mismas no fue un factor limitante de la BA.

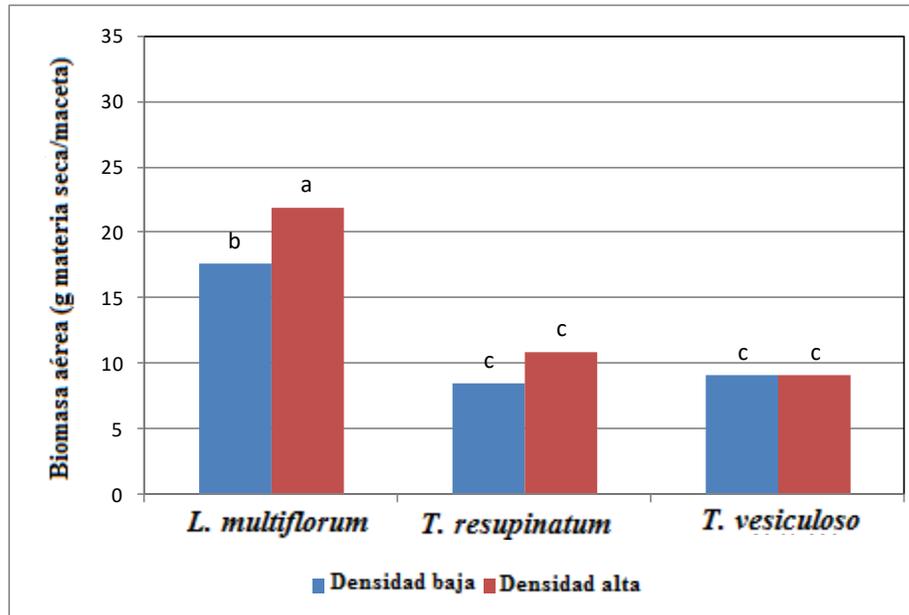


Figura No.18. Efecto de la densidad de siembra en la BA de *L. multiflorum*, *T. resupinatum* y *T. vesiculosus* a la terminación del experimento, para el promedio de las fechas de siembra.

La BR de *T. resupinatum* fue significativamente superior a la de *T. vesiculosus* en la FS temprana (Figura No.19). No obstante, la producción de ambas fue notoriamente inferior respecto a la de *L. multiflorum*. El atraso en la fecha de siembra también tuvo un impacto negativo en la BR de las leguminosas evaluadas, reduciéndose la misma 74 % y 68 % para *T. resupinatum* y *T. vesiculosus*, respectivamente.

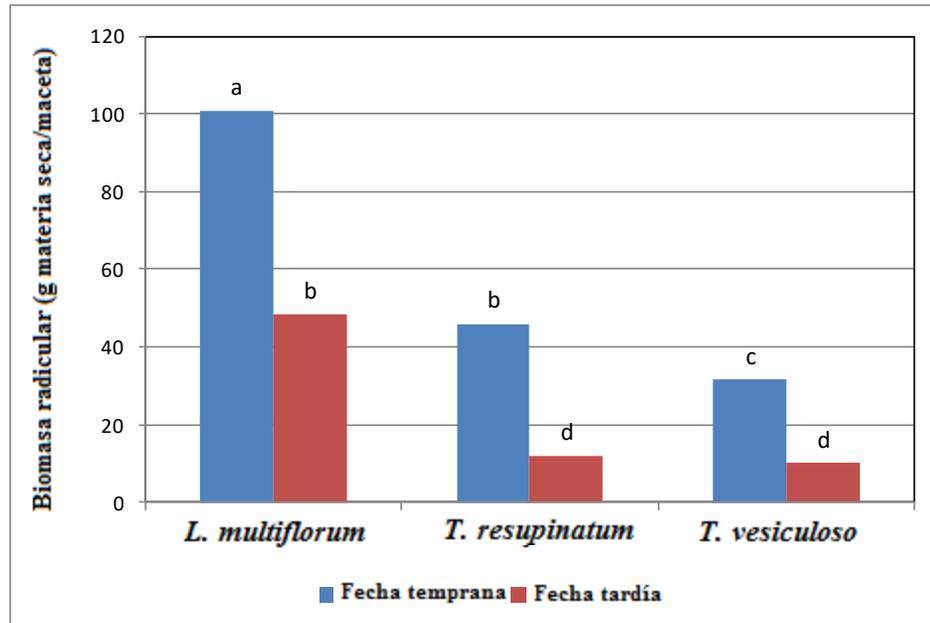


Figura No.19. Efecto de la fecha de siembra en la BR de *L. multiflorum*, *T. resupinatum* y *T. vesiculosus* a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.

El aumento en la densidad de siembra determinó una significativa mayor producción de BR solo en el caso de *T. resupinatum*, con un aumento del 73 % respecto a la densidad baja (Figura No.20). Este comportamiento parece consistente con observaciones realizadas por Pinto y Gutiérrez² en experimentos realizados en INIA La Estanzuela, quienes destacaron la muy buena producción radicular del *T. resupinatum*. Este dato resulta promisorio ya que plantea la oportunidad de manejar la densidad de siembra como una estrategia para obtener mayor BR en cortos períodos de tiempo.

²Pinto, P.; Gutiérrez, F. 2013. Com. personal.

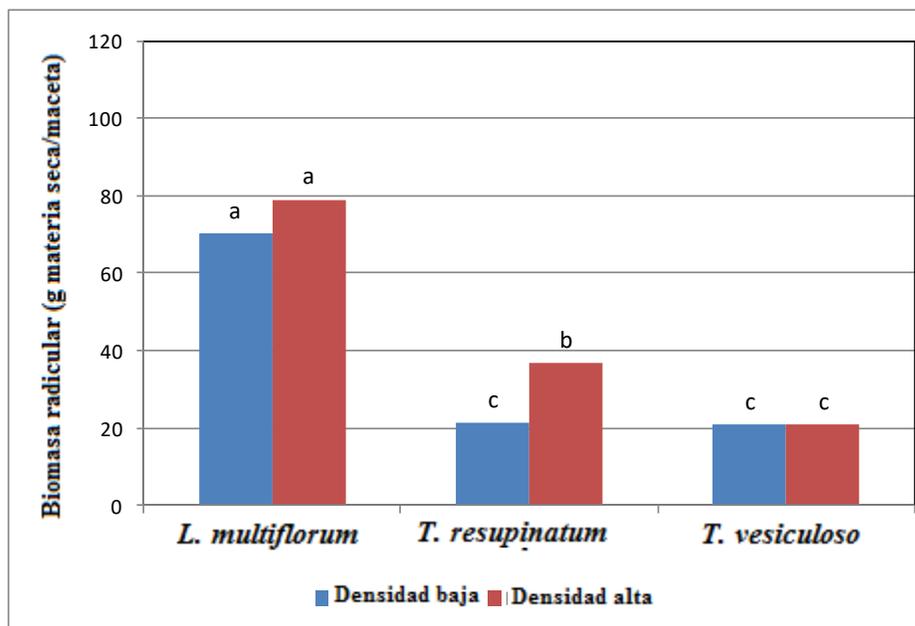


Figura No.20. Efecto de la densidad de siembra en la BR de *L. multiflorum*, *T. resupinatum* y *T. vesiculosus* a la terminación del experimento, para el promedio de las fechas de siembra.

Si bien la producción de BA y BR de ambas especies leguminosas no son comparables con los valores de *L. multiflorum*, el objetivo de servicio ecosistémico es distinto. Por lo tanto, debe tenerse en cuenta la baja relación C/N de los residuos aportados al suelo. Además, gran parte del N de estas especies es proveniente de la FBN, constituyendo un ingreso neto de N al sistema.

Comparando ambas especies leguminosas estudiadas, la biomasa total (BA + BR) de *T. resupinatum* superó en un 30 % a la de *T. vesiculosus*, mostrando una superioridad de esta especie en el aporte de C y N realizado al suelo en las condiciones de este experimento.

Teniendo en cuenta los numerosos reportes bibliográficos que refieren a la estrecha vinculación entre la fijación biológica de nitrógeno y la producción de biomasa

de especies leguminosas, es muy importante para éstas lograr una fecha de siembra temprana, de forma tal de maximizar su producción de materia seca.

4.4.3 Generación de macroporos y descompactación

Para este servicio ecosistémico, sólo se incluyó una especie, *R. sativus*. Con el objetivo de analizar los resultados se resolvió incluir *L. multiflorum* como testigo en la comparación.

R. sativus tuvo una BA final significativamente menor que *L. multiflorum* en la fecha temprana, representando aproximadamente un 50 % de la producción de éste último (Figura No.21). Sin embargo, en la fecha tardía, la BA final de *R. sativus* superó en un 128 % la de *L. multiflorum*. Un aspecto a destacar es que la BA de *R. sativus* no difirió entre ambas fechas de siembra. Esta interacción significativa tiene gran potencial de ser explotada en sistemas productivos. Si la siembra del cultivo de cobertura se atrasa o debe realizarse tardíamente (p. ej. coberturas luego de maíz tardío) el *R. sativus* presenta ventajas importantes debido a su vigor inicial y a la velocidad con que cubre el suelo por su arquitectura de canopeo planófila.

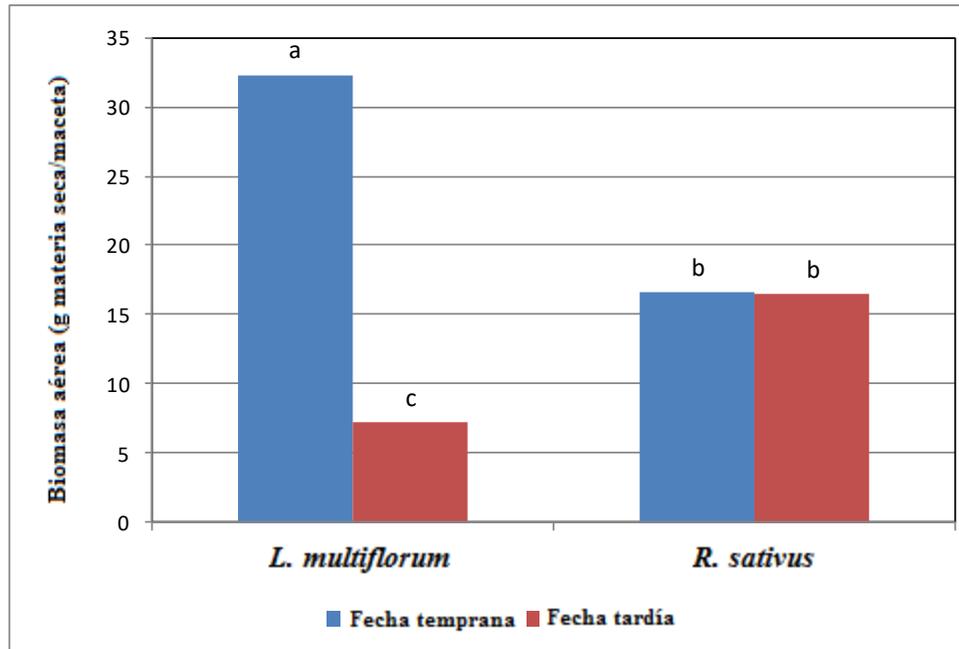


Figura No.21. Efecto de la fecha de siembra en la BA de *L. multiflorum* y *R. sativus* a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.

En la Figura No.22 se observa que hasta el tercer corte la curva de producción de BA de *R. sativus* en la fecha temprana fue muy similar a la de *L. multiflorum*. A partir de ese momento, *R. sativus* está culminando el ciclo de vida con el llenado de silicuas y disminuye mucho la fotosíntesis neta. En la fecha tardía, fue *R. sativus* quien acumuló la mitad de su BA en las semanas previas a la finalización del experimento, coincidiendo con el período de translocación de reservas de la raíz a las estructuras reproductivas.

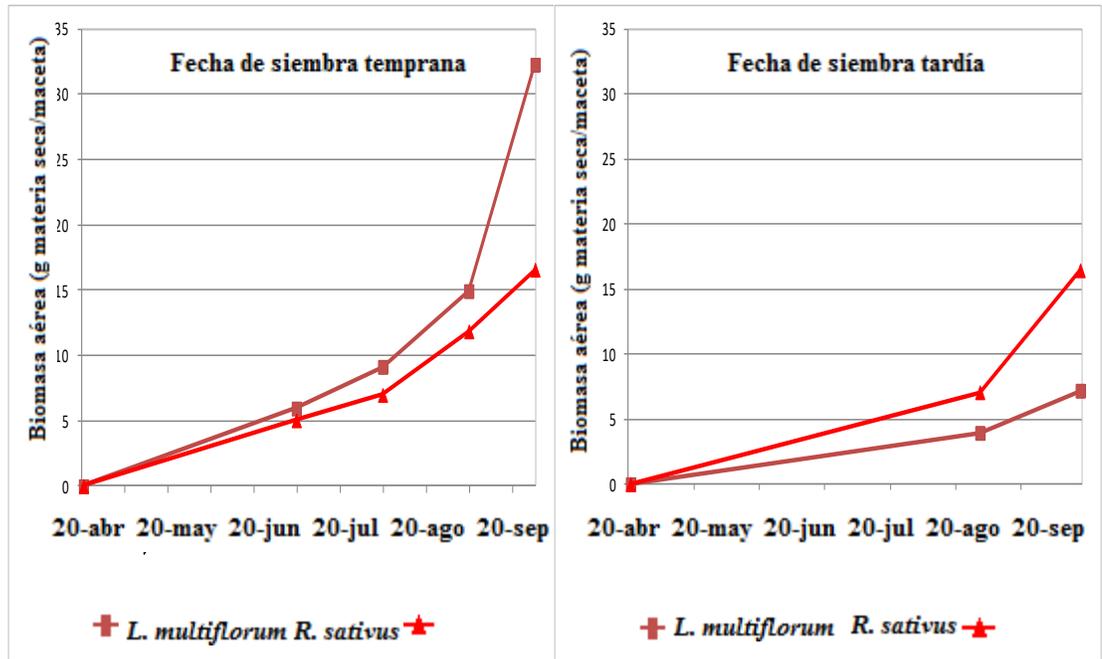


Figura No.22. Curvas de crecimiento de parte aérea para *L. multiflorum* y *R. sativus* en ambas fechas de siembra, promediado a través de densidades de siembra.

El aumento en densidad de siembra de *R. sativus* no se tradujo en una mayor BA (Figura No.23), indicando que la menor densidad de siembra usada fue suficiente para lograr el IAF crítico que permitió maximizar la producción de biomasa de esta especie en las condiciones del experimento. Al igual que en *B. napus*, esto puede deberse al tipo de hojas oblongo-lanceoladas con disposición planófila que la misma posee, lo cual la hace menos dependiente de la densidad de siembra para lograr rápidamente una alta intercepción de luz y transformar la misma en materia seca.

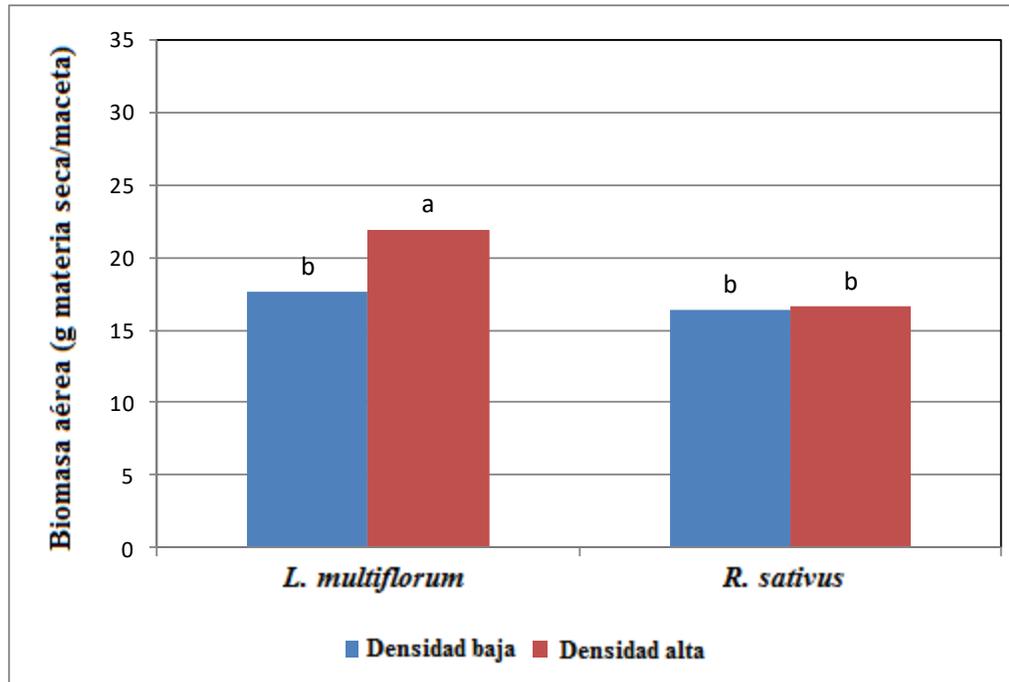


Figura No.23. Efecto de la densidad de siembra sobre la BA de *L. multiflorum* y *R. sativus* a la terminación del experimento, promediado a través de fechas de siembra.

A pesar que inicialmente se planteaba la ventaja de aumentar la densidad de siembra para lograr mayor producción de BA y BR en cortos períodos de tiempo, los resultados observados en la Figura No.23 no parecen confirmar esta hipótesis. En efecto los cortes intermedios no muestran ventajas significativas que justifiquen el manejo agronómico en condiciones de campo de esta variable.

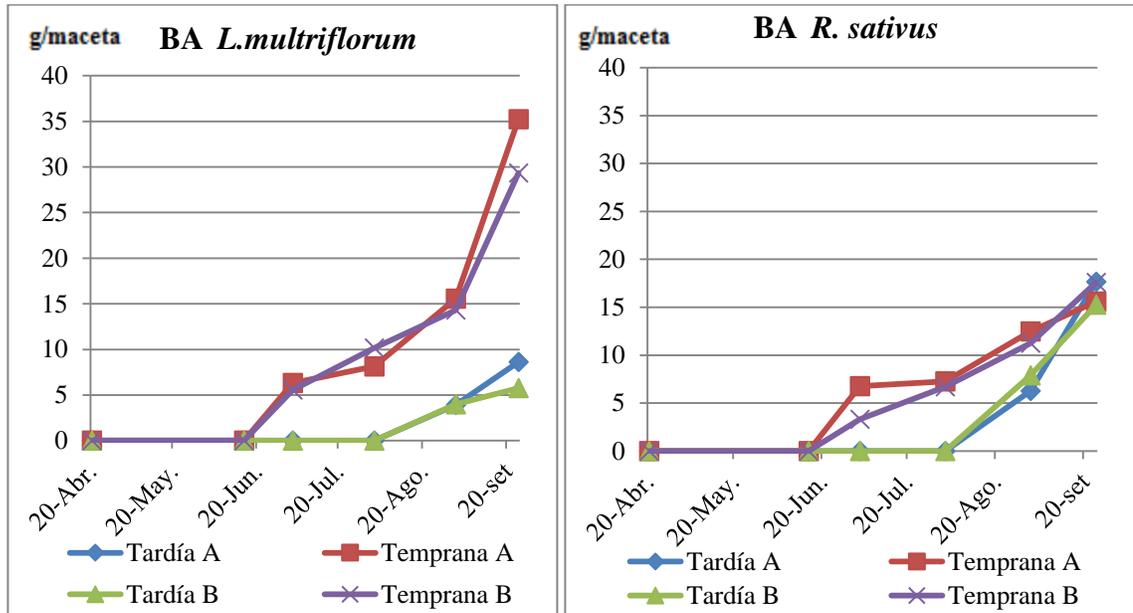


Figura No.24. Curvas de crecimiento de BA de *L. multiflorum* y *R. sativus* (A: densidad alta; B: densidad baja).

La BR final de *R. sativus* tuvo bajos valores en relación al testigo *L. multiflorum* (Figura No.25). En la fecha temprana la misma representó solamente el 25 % de la producida por *L. multiflorum*, en tanto para la fecha tardía dicho valor estuvo en el entorno del 40 %. Esto se puede explicar por la morfo-fisiología de la especie *R. sativus*, que transloca los fotosintatos almacenados en la raíz hacia las estructuras reproductivas al final del ciclo.

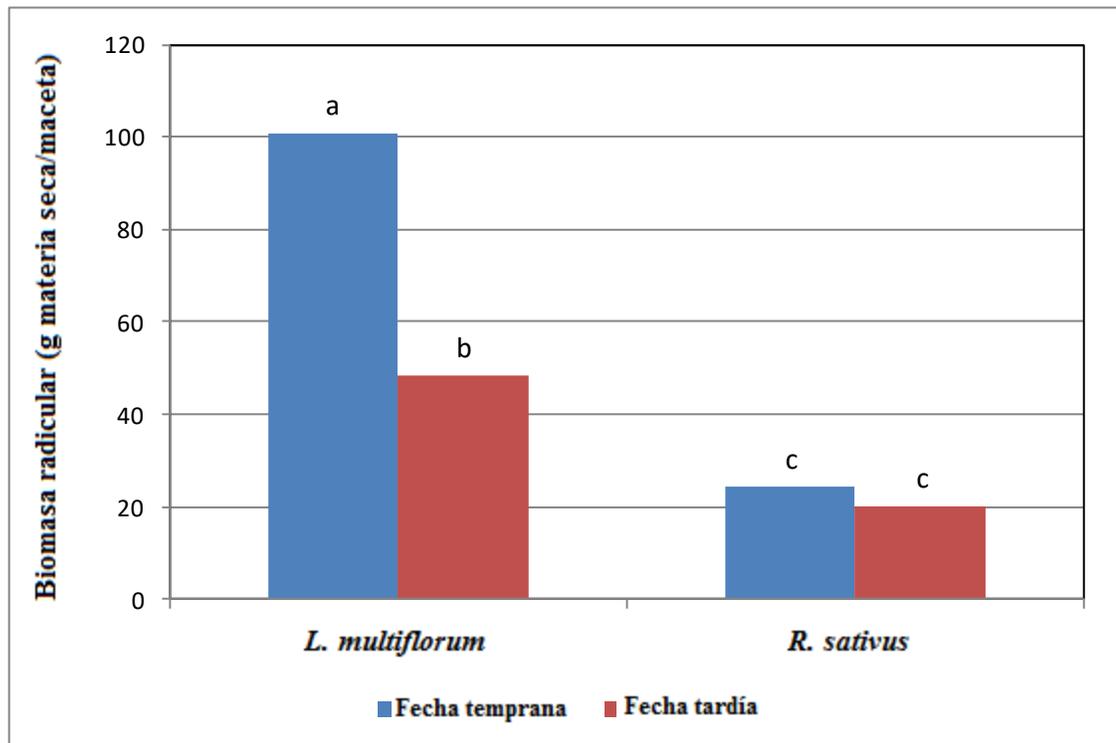


Figura No.25. Efecto de la fecha de siembra en la BR de *L. multiflorum* y *R. sativus* a la terminación del experimento, para el promedio de las densidades de siembra.

Las curvas de acumulación de BR de *R. sativus* presentan un comportamiento diferente al del resto de las especies estudiadas. En la fecha temprana, la tasa de acumulación de BR inicial (al primer corte) es la mayor de todas las especies, alcanzando un “plateau” luego de ese crecimiento inicial. Esta característica morfo-fisiológica de la especie (acumula biomasa en raíces para luego traslocar en elongación de tallo reproductivo), unido a la fenología propia del cultivar (rápida inducción reproductiva), hacen esta especie especialmente apta para siembras en mezclas. De esta forma, se podría aprovechar el rápido crecimiento inicial de la especie, generando poros de gran tamaño en el suelo, para luego eliminarla de la mezcla con un herbicida selectivo y dejar a la especie acompañante (gramínea o leguminosa) continuar su ciclo a lo largo de la ventana de crecimiento del CC.

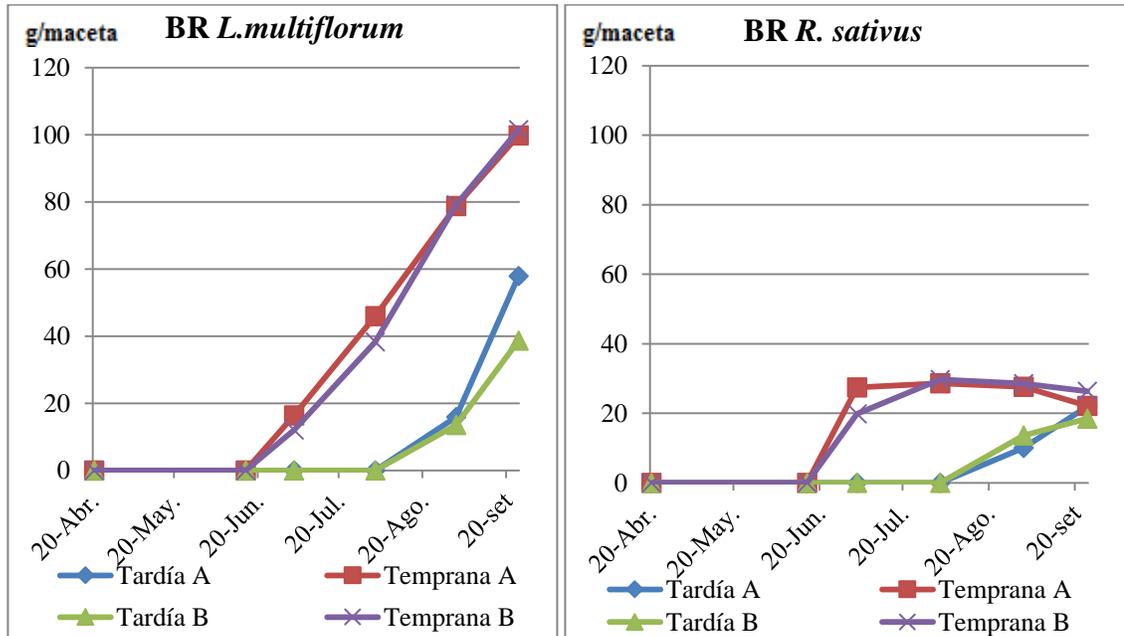


Figura No.26. Curvas de crecimiento de raíces para de *L. multiflorum* y *R. sativus* para ambas fechas de siembra y densidades en los distintos muestreos.

Por lo tanto, a la hora de decidir la fecha de supresión de *R. sativus*, el ideal es que coincida con la máxima acumulación de MS en la raíz, para lograr formar macroporos de mayor volumen e intentar acumular C radicular protegido por el suelo antes de que los carbohidratos de reserva de la raíz se movilizan hacia las estructuras reproductivas.

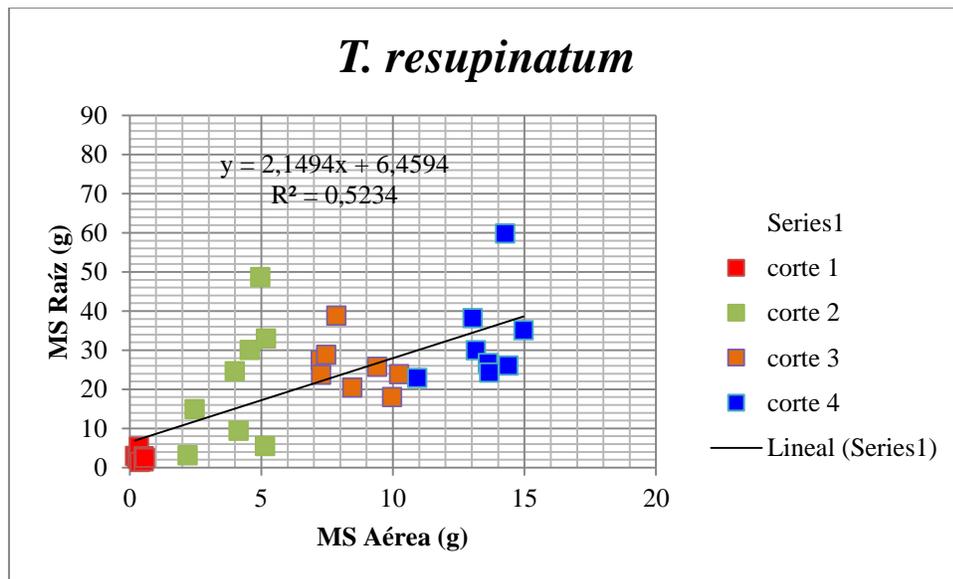
Los resultados de este ensayo muestran que, si bien esta especie produjo una raíz de gran tamaño, el porcentaje de MS de éstas fue bajo por lo cual no sería tan efectiva en el aporte de grandes cantidades de C al suelo, como en el caso de *L. multiflorum*. Sin embargo, debe considerarse que las macetas, por su pequeño tamaño pueden haber detenido el crecimiento de las raíces, y que en condiciones de campo éstas podrían haber tenido un mejor desarrollo. Además, la mayor profundidad que alcanza la raíz pivotante de *R. sativus* puede ser útil para permitir el movimiento vertical de nutrientes no móviles como el P, traslocándolo desde el horizonte superficial donde tiende a estratificarse con SD, hacia horizontes más profundos.

Futuras investigaciones de largo plazo son necesarias para evaluar el impacto de cada especie en particular sobre las propiedades del suelo y sobre los rendimientos de los cultivos.

4.5 CORRELACIÓN ENTRE BIOMASA AÉREA Y BIOMASA RADICULAR

A partir de los datos obtenidos tanto de BA como radicular, en ésta sección se intenta determinar cómo están correlacionadas ambas variables.

Dadas las dificultades que existen en el proceso de determinación de BR, las cuales explican en parte la escasez de información tanto a nivel nacional como internacional sobre la producción de raíces de los cultivos, una estrategia podría ser generar algoritmos que correlacionen ambas variables y permitan estimar, para las distintas especies en estado vegetativo, la producción de BR a partir de la BA.



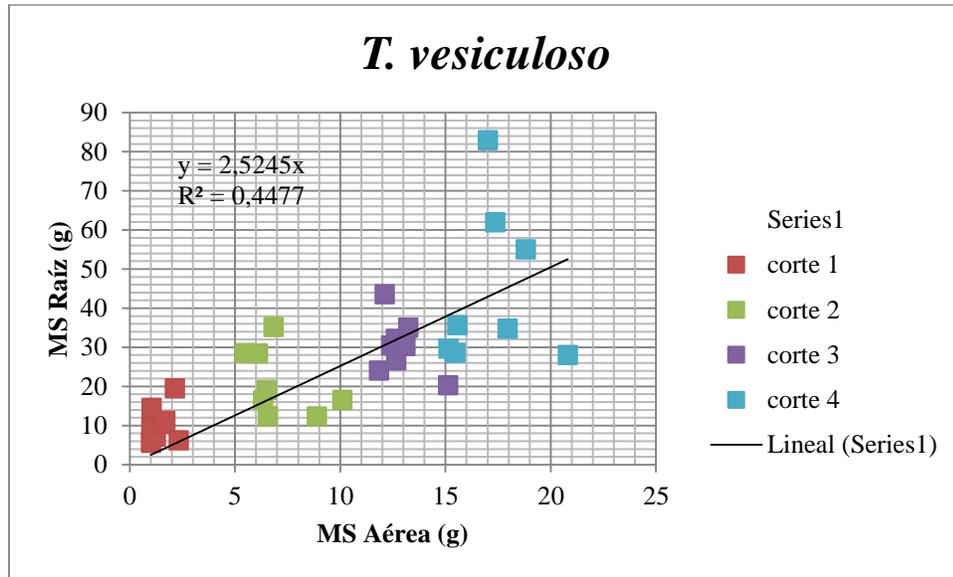


Figura No.27. Correlación para *T. resupinatum* y *T. vesiculosus*.

La correlación entre las determinaciones de producción de BA y su par de BR para las leguminosas fue media ($R^2 = 0.44$ a 0.52) y positiva, y se ajustó una ecuación lineal. Analizando el conjunto de todas las determinaciones se observa que en promedio la producción de BR fue aproximadamente dos veces y media la BA, este hecho aparentemente anormal fue analizado al comienzo de esta sección. Hasta el momento en que se decide darle fin estas coberturas se mantuvo una cierta tendencia que indicaba que, a medida que aumentaba la BA, aumentaba la BR en esa proporción.

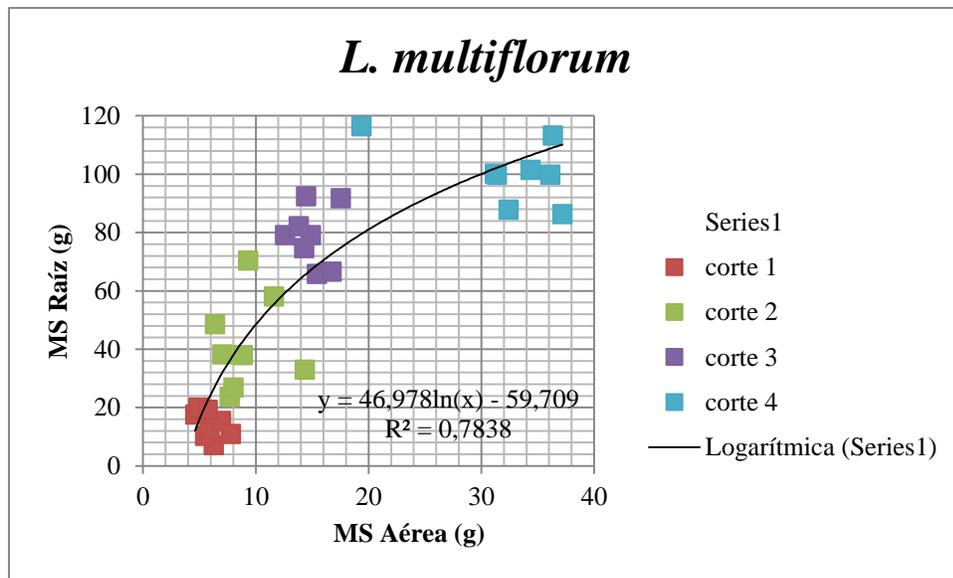
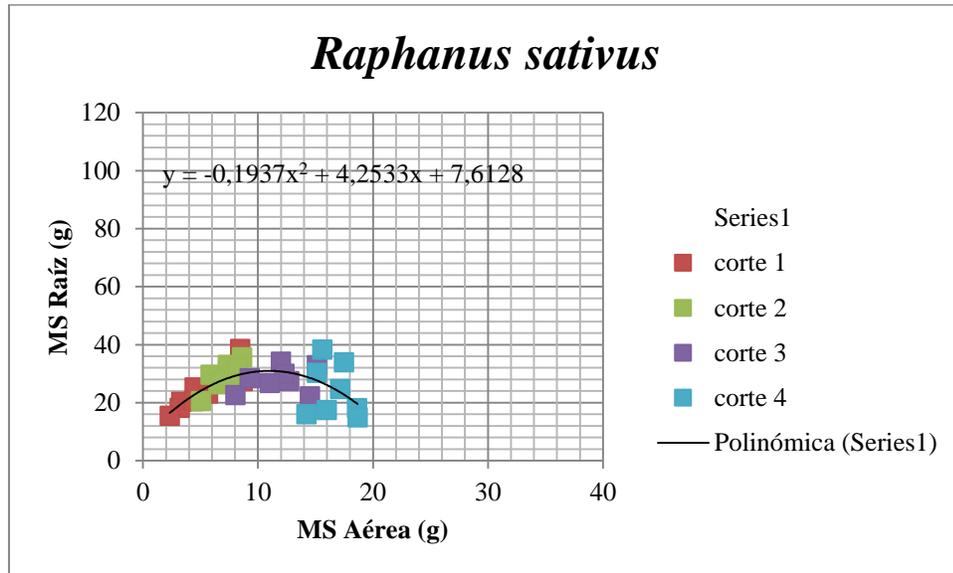


Figura No.28. Correlación para *R. sativus* y *L. multiflorum*.

A partir de ambos gráficos se puede apreciar comportamientos diferentes. El *R. sativus* que tiene un ciclo mucho más corto en comparación con *L. multiflorum*, logra un máximo de acumulación de BR a los 8-10g/maceta y luego desciende cuando se comienzan a traslocar los carbohidratos hacia las estructuras reproductivas. El *L. multiflorum* por otro lado, siguió acumulando raíces durante todo el período de

crecimiento y se observó una correlación alta ($R^2 = 0.7838$) y positiva entre la producción de BA y radicular, a la cual se le ajustó una ecuación logarítmica.

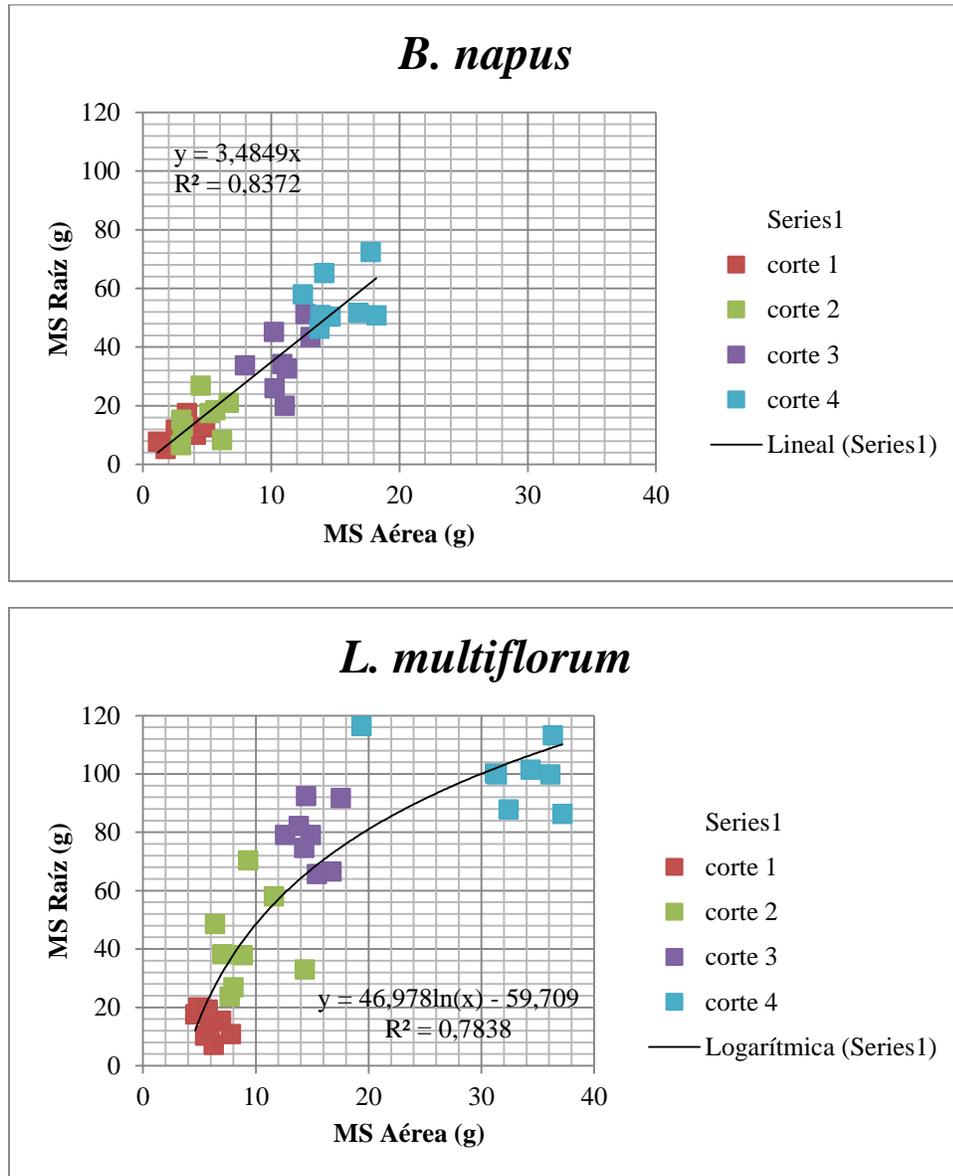


Figura No.29. Correlación para *B. napus* y *L. multiflorum*.

La correlación entre la BA y radicular del *B. napus* fue alta ($R^2 = 0.8372$) y positiva y se le ajustó una ecuación lineal $Y=3.4849x$. Para cada par de determinaciones la BR fue 3.4849 veces la BA.

Serán necesarias futuras investigaciones mejorando la precisión de las determinaciones para lograr generar ecuaciones que permitan estimar la producción de BR a partir de la BA, preferentemente expresadas en kg de MS por ha para que puedan ser aplicables a nivel de producción.

5. CONCLUSIONES

Los cultivos de cobertura tienen la capacidad de aportar numerosos servicios ecosistémicos a los sistemas agrícolas y el control de la erosión no debería ser la única razón ni objetivo previo para incorporarlos a una rotación.

Los resultados obtenidos en este trabajo abren una interrogante sobre las causas que generaron el desbalance en la relación R/PA de las especies evaluadas.

La elección de la especie y la adecuada fecha de siembra son variables de manejo agronómico que tienen un alto impacto en la capacidad de mejorar las distintas propiedades del suelo que hacen a su calidad. Bajo las condiciones de este ensayo, los cultivos de cobertura sembrados en la fecha temprana (20/04) produjeron, al 24/09, un 253% más de BA total y un 226% más de BR total que los de la fecha tardía (15/06).

El *L. multiflorum* representa una excelente opción como herramienta para aportar CO al suelo ya que produjo 2.66 veces más BR que el promedio de las restantes especies.

En fechas tardías sería recomendable incorporar especies de mayor precocidad en la producción de biomasa como el *R. sativus*, la cual mostró gran vigorosidad en la implantación y una acumulación de materia seca temprana aún en siembras de junio. Por otro lado, las leguminosas no lograron una buena performance en siembra de junio, por lo que en el caso de necesitar incorporar N a la rotación, se deberá respetar la fecha óptima de siembra de las mismas (abril, mayo).

Las diferencias observadas en las curvas de acumulación de BR entre las especies demuestran que la elección de una adecuada fecha de supresión del cultivo de cobertura, es una importante medida de manejo que incide directamente en la cantidad de C derivado de las raíces que puede ser incorporado al suelo. Por ejemplo, *R. sativus* en siembra temprana logró el máximo de producción de raíces a mediados de julio. A partir de esto se podría considerar la siembra de esta especie en mezcla con una gramínea y mediante el uso de herbicidas selectivos suprimirla temprano aprovechando el control de malezas de hoja ancha complicadas como *Conyza sp.*

En base a los resultados de este trabajo y a la revisión bibliográfica se puede concluir que las especies evaluadas, se pueden agrupar según sus características morfo-fisiológicas y fenológicas que determinan su capacidad de aporte a:

- El incremento de los niveles de COS (*L. multiflorum* y *B. napus*), determinado a partir de la elevada producción subterránea del sistema radicular fasciculado del *L. multiflorum*, mientras que *B. napus* generó una considerable producción de raíces secundarias.
- Fijar nitrógeno atmosférico (*T. vesiculosus* y *T. resupinatum*), condición a evaluar en el desarrollo de cultivos posteriores.

- Descompactación y generación de macroporos (*R. sativus* y *L. multiflorum*). A destacar el canalículo generado por la raíz principal de *R. sativus*, tanto en lo que respecta a descompactación y aireación de suelo, como para vía de acceso de agua al suelo.

La bibliografía consultada, reporta consistentemente una mayor importancia relativa de la producción de BR sobre la BA en el mantenimiento del COS, y existen notables diferencias en la producción radicular de las especies evaluadas, por lo que las prácticas de manejo de los CC deben buscar maximizar la producción de las raíces a la fecha de supresión, cuando este sea el objetivo principal.

Las leguminosas anuales evaluadas, especialmente el *T. resupinatum* tuvieron una producción subterránea intermedia por lo que son una excelente opción para cumplir con ambos objetivos de fijar N y aumentar el COS.

R. sativus, por su alto vigor inicial, altas tasas de crecimiento invernales, gran tamaño y longitud de su raíz principal podría aportar significativamente en la mejora de la capacidad de almacenaje de agua del suelo mediante descompactación y generación de macroporos.

Estudios de evaluación de mezclas de especies multipropósito deberán realizarse en futuras investigaciones para complementar los beneficios de cada especie por separado.

6. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento de 5 especies de cultivos de cobertura anuales invernales, cuantificando los efectos de la fecha y densidad de siembra sobre la curva de acumulación de materia seca aérea y radicular. A partir de información objetiva, se buscó determinar la adaptabilidad de las especies estudiadas a las distintas condiciones de los sistemas de producción agrícolas del país, y evaluar la capacidad de contemplar los principales requisitos que deben cumplir los cultivos de cobertura reportados por la bibliografía: controlar la erosión y aportar C y N al suelo, mejorar infiltración, controlar malezas, disminuir lavado de N, entre otras. El experimento se realizó en la Chacra “Santa Lucía” ubicada en la localidad de “Punta Espinillo”, zona rural del departamento de Montevideo, Uruguay. Camino Gral. Esc. Basilio Muñoz esq. Camino del Esquilador. Latitud 34° 48' 58.97" S, Long 56° 21' 54.01" O. Los cultivos de cobertura evaluados tuvieron una mejor implantación y mayor producción de BA y subterránea en la fecha de siembra temprana. El efecto más negativo del atraso en la fecha de siembra se dio en las leguminosas anuales, notablemente afectadas durante la etapa de emergencia, por los numerosos eventos de heladas. La densidad de siembra alta en la fecha temprana, logró una mayor producción de BR durante el período inicial de crecimiento de todas las especies, lo cual se revirtió durante los últimos meses. En base a los resultados de este ensayo, la opción de aumentar la densidad no logró efectos agrónomicamente significativos sobre la acumulación de BR. La especie que respondió mejor a la densidad alta, en la fecha temprana fue *Brassica napus*, logrando hasta los primeros días de agosto, duplicar la producción de BR con respecto a la densidad baja. El *L. multiflorum* produjo, a la fecha de supresión (24/09), un 170% y 266% más de BA y radicular respectivamente que el promedio de las restantes especies, por lo que en las condiciones de este ensayo, resultó la mejor opción para acumular la máxima cantidad de C a partir de raíces. *B. napus*, logró una alta acumulación de raíces también por lo que se concluye que estas especies serían las más adecuadas cuando el objetivo principal que se apunta al incorporar los CC sea la incorporación de C orgánico al suelo. Las leguminosas anuales evaluadas, si bien no lograron altas producciones de BA como el *L. multiflorum*, tuvieron una aceptable producción de BR (sobre todo *T. resupinatum*), por lo que estas especies, sembradas temprano, son una excelente opción para lograr incorporar tanto C, como N al sistema. Deberá descartarse la siembra tardía de estas especies por los efectos negativos anteriormente mencionados. *R. sativus* podría jugar un rol clave en la descompactación y generación de macroporos del suelo al incorporarse en la rotación, debido al gran tamaño de su raíz principal. Se destaca la gran vigorosidad de esta especie y sus muy altas tasas de crecimiento iniciales, probablemente explicadas por tratarse de una especie seleccionada durante años por su aptitud para utilización en la producción hortícola. Su ciclo fenológico muy corto hace que la máxima acumulación de raíces se dé en los primeros 60 días, por lo que deberá trabajarse para adecuar el largo de ciclo al período de ventana de los CC o bien, evaluar su utilización en mezclas con gramíneas y

controlarla con herbicidas selectivos lo cual colaboraría enormemente en el control de malezas problemáticas como *Conyza sp.*

Palabras clave: Cultivos de cobertura; BA y BR; C orgánico; Descompactación y generación de macroporos.

7. SUMMARY

The aim of this study was to assess the performance of 5 species of winter annual cover crops, quantifying the effects of planting date and density on the accumulation curve of shoot and root dry matter. From objective information was sought to determine the suitability of the species studied at different conditions of agricultural production systems in the country, and assess the ability to see the main requirements for cover crops reported in the literature: control providing erosion and soil C and N, enhance infiltration, control weeds, lower N leaching, among others. The experiment took place at the farm “Santa Lucía” in the location of “Punta Espinillo”, rural zone of Montevideo, Uruguay. Road Gral. Esc. Basilio Muñoz, road “Del Esquilador”. Latitude 34°48′58.97″ S, Long 56°21′54.01″ O. The cover crops evaluated had better implantation and greater production of biomass (AB) and root biomass (RB) in the early planting date. The negative effect of delayed planting date was given in the annual legume significantly affected during the emergency phase, the numerous frost events. High density planting in early date, achieved greater production of RB during the initial period of growth of all species, which was reversed in the last months. Based on results from this experiment, the option of increasing the density didn't achieve agronomical significant effects on the accumulation of RB. The species that best responded to the high density in the early date was *Brassica napus*, making until early August, double the production of RB relative to the low density. *L. multiflorum* produced, on the date of withdrawal (24/09), 170% and 266% more of AB and RB respectively over the average of the remaining species, so that under the conditions of this experiment, was the best option to accumulate the maximum amount of C from roots. *B. napus* also achieved a high accumulation of roots, so it is concluded that these species would be the most appropriate when the main objective that aims is the incorporation of organic C to the soil. The annual legumes evaluated, although they did not achieve high yields of biomass as *L. multiflorum*, had an acceptable RB production (especially *T. resupinatum*), so these species, planted early, are an excellent option for achieving incorporate both C and N to the system. It should be discarded late planting of these species by the above negative effects. *R. sativus* could play a key role in the decompression and the generation of soil macrospores to be incorporated into the rotation due to the large size of its taproot. The great vigor of these species and its very high initial growth rates probably is explained by a selection over the years for their ability to use in horticultural production. Its very short phenological cycle, makes the maximum accumulation of roots given in the first 60 days. This means that you must adapt the cycle length to the window period of the CC. It should also be evaluated the use in mixtures with grasses and the control with selective herbicides, this would therefore assist greatly in the control of troublesome weeds as *Conyza sp.*

Key words: Cover crops; AB and RB; Organic C; Decompression and the generation of soil macrospores.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Aizpuru, I.; Aseginolaza Iparragirre, K.; Uribe-Echebarría Díaz, P. M.; Urrutia Uriarte, P.; Zorrakin Altube, Iñ. 1999. Claves ilustradas de la flora del país vasco y territorios limítrofes. s.l., Gobierno Vasco. Servicio Central de Publicaciones. 831 p.
2. Alberts, E. E.; Neibling, W. H. 1994. Influence of crop residue on water erosion. In: Unger, P. W. ed. Managing agricultural residues. Boca Raton, FL, Lewis. pp. 19-44.
3. Allmaras, R. R.; Linden, D. R.; Clapp, C. E. 2004. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, placement, tillage, and stover management. *Soil Science Society America Journal*. 68: 1366-1375.
4. Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the argentine pampas using the century model. *Soil Use and Management*. 17: 62-66.
5. _____. 2005. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*. 21: 38-52.
6. _____.; Steinbach, H. S. 2006. Manejo agronómico y disponibilidad de nitrógeno en el suelo. In: Álvarez, R. ed. *Materia orgánica; valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Buenos Aires, UBA. Facultad de Agronomía. pp. 137-164.
7. Balesdent, J.; Balabane, M. 1992. Maize-root derived soil organic carbon estimated by natural ¹³C abundances. *Soil Biology Biochemistry*. 24: 97-101.
8. _____. 1996. Major contribution of Roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils *Soil Biology Biochemistry*. 28: 1261-1263.
9. Barber, S. A. 1979. Corn residue management and soil organic matter. *Agronomy Journal*. 71: 625-627.
10. Barrows, H. L.; Kilmer, V. J. 1963. Plant nutrient losses from soils by water erosion. *Advances in Agronomy*. 15: 303-316.
11. Bernal Eusse, J. 1986. Confederación andina de ganaderos. s.n.t. pp. 170 - 180.

12. Bernards, M. A. 2002. Demystifying suberin. *Canadian Journal of Botany*. 80: 227-240.
13. Bhatti, M. B.; Sartaj, K. 1996. Fodder production in Pakistan. Islamabad, Pakistan, Agricultural Research. s.p.
14. Bolinder, M. A.; Angers, D. A.; Dubuc, J. P. 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 63: 61-66.
15. _____.; _____.; Giroux, M.; Laverdiere, M. R. 1999. MB tillage. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). *Plant Soil*. 215: 85-91.
16. Bonner, J.; Galston, A. W. 1952. Principles of plant physiology. San Francisco, Freeman. 499 p.
17. Bremer, E.; Janzen, H. H.; Johnson, A. M. 1994. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in lethbridge soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 74: 131-138.
18. Brower, R. 1962. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Journal of Agricultural Science*. 10: 342-399.
19. Bruce, J. P.; Frome, M.; Haites, E.; Janzen, H.; Lal, R. 1999. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*. 54: 382-389.
20. Brye, K. R.; Gower, S. T.; Norman, J. M.; Bundy, L. G. 2002. Carbon budgets for a prairie and agroecosystems; effects of land use and interannual variability. *Applied Ecology Journal*. 12: 962-979.
21. Burke, I. C.; Yonker, C. M.; Parton, W. J.; Cole, C. V.; Flatch, K.; Yimel, D. S. 1989. Texture, climate and cultivation effects on soil organic matter content in US. *Soil Science Society America Journal*. 53: 800-805.
22. Buyanovsky, G. A.; Aslam, M.; Wagner, G. H. 1994. Carbon turnover in soil physical fractions. *Soil Science Society America Journal*. 58: 1167-1173.

23. _____.; Wagner, G. H. 1997. Crop residue input to soil organic matter in the sanborn field. In: Paul, E. A. ed. Soil organic matter in temperate agroecosystems. Boca Raton, FL, CRC. pp. 73–83.
24. Campbell, C. A.; LaFond, G. P.; Zentner, R. P.; Biederbeck, V. O. 1991. Influence of fertilizer and straw baling on soil organic matter in a thin, black chernozem in western Canada. *Soil Biology Biochemistry*. 23: 443-446.
25. Carámbula, M. 1977. Producción y manejo de pasturas sembradas. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 200-240.
26. Cestroviejo, S. 1993. Flora ibérica: plantas vasculares de la península ibérica e islas baleares. Madrid, Real Jardín Botánico. pp. 435-440.
27. Chapin, F.; Ruess, S.; Roger, W. 2001. Carbon cycle; the roots of the matter. *Nature Journal*. 411: 749-752.
28. Chiu, C. Y.; Wang, M. K.; Hwong, J. L.; King, H. B. 2002. Physical and chemical properties in rhizosphere and bulk soils of *Tsuga* and *Yushania* in a temperate rain forest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33: 1723-1735.
29. Clapp, C. E.; Allmaras, R. R.; Layese, M. F.; Linden, D. R.; Dowdy, R. H. 2000. Soil organic carbon and ¹³C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilization under continuous corn management in Minnesota. *Soil and Tillage Research*. 55: 127-142.
30. Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (22º., 2010, Rosario, Argentina). 2010. El suelo, pilar de la agroindustria en la pampa argentina. Rosario, Argentina, s.e. pp. 11-13.
31. Crookston, R. K.; Kurle, J. E.; Copeland, P. J.; Ford, J. H.; Lueschen, W. E. 1991. Rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. *Agronomy Journal*. 83: 108–113.
32. Delgado, J. A. 1998. Sequential NLEAP simulations to examine effect of early and late planted winter cover crops on nitrogen dynamics. *Journal of Soil and Water Conservation*. 53: 241-244.
33. DeLucía, E. H.; Day, T. A.; Heckathorn, S. A. 1992. Effects of soil temperature on growth, biomass allocation and resource acquisition of *Andropogon gerardii* vitman. *New Phytologist*. 120: 543-549.

34. Díaz Roselló, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Informaciones Agronómicas*. 8 (1): 103-110.
35. Dickey, E. C.; Shelton, D. P.; Jasa, P. J.; Peterson, T. R. 1985. Soil erosion from tillage systems used in soybean and corn residues. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 28: 1124-1129.
36. Dos Santos, J. B. 2007. Compartimentos de la materia orgánica y balance de carbono en experimentos sobre sistemas de manejo de suelos de larga duración. In: Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (17^o., 2007, Guanajuato, México). Trabajos presentados. *Revista Informaciones Agronómicas*. 37: 9 -11.
37. Ernst, O. 2004. Leguminosas como cultivos de cobertura. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 21: 16-21.
38. _____. 2009. Hacia una agricultura inteligente y sostenible. *Zona Agropecuaria*. 19: 27-29.
39. Evers, G. W. 1980. Germination of cool season annual clovers. *Agronomy Journal*. 72: 537-540.
40. _____. 1999. Seedling growth comparison of arrowleaf, crimson, rose and subterranean clovers. *Crop Science*. 39: 433-440.
41. Fabrizzi, K. P.; Morón, A.; García, F. O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded mollisols in Argentina. *Soil Science Society America Journal*. 67: 1831-1841.
41. FAO. 1978. Indigenous arid and semi-arid forage plants of north Africa, the near and middle east. Rome. 689 p.
42. _____. 1999. Persian clover (*Trifolium resupinatum L.*). *Grassland index; a searchable catalogue of grass and forage legumes*. s.n.t. s.p.
43. _____. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management. Rome. 58 p. (World Soil Reports no. 96).
45. Farrar, J.; Hawes, M.; Jones, D.; Lindow, S. 2003. How roots control the flux of carbon to the rhizosphere. *Ecology*. 84: 827-837.
46. Follett, R. F.; Stewart, B. A. 1985. Soil erosion and crop productivity. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. 533 p.

47. Frame, J. 2007. *Trifolium vesiculosum* Savi. (en línea). Roma, Italia, s.e. s.p. Consultado set. 2013. Disponible en <http://www.fao.org/AG/agp/agpc/doc/gbase/data/pf000504.htm>.
48. Galantini, J. A. 2002. Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región pampeana semiárida. (en línea). INTA. RIA 30: 125-146. Consultado nov. 2013. Disponible en http://inta.gob.ar/documentos/dinamica-de-las-fracciones-organicas-de-suelo-bajo-diferentes-rotaciones-en-la-region-semiarida-pampeana/at_multi_download/file/10.%20dinamica_del_suelo.pdf
49. Gale, W. J.; Cambardella, C. A. 2000. Carbon dynamics of surface residue and root-derived organic matter under simulated no-till. *Soil Science Society America Journal*. 64: 190-195.
50. García Préchac, F. 2004. Cultivo continuo en siembra directa o rotaciones de cultivos y pasturas en suelos pesados del Uruguay. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 8 (1): 23-29.
51. Gedroc, J. J.; Coleman, J. S.; McConnaughay, K. D. M. 1996. Plasticity in root/shoot partitioning: optimal, ontogenetic, or both?. *Functional Ecology*. 10: 44-50.
52. Gill, R. A.; Burke, I. C. 2002. Influence of soil depth on the decomposition of *Bouteloua gracilis* roots in the shortgrass step. *Plant and Soil*. 241: 233-242.
53. Gómez-Campo, C. 1996. Brassica. In: Cestroviejo, S. coord. *Flora Ibérica*. Madrid, Real Jardín Botánico. CSIC. cap. 5, pp. 362-384.
54. Hammel, K. E. 1997. Fungal degradation of lignin. In: Cadisch, G.; Giller, K. E. eds. *Driven by nature; plant litter quality and decomposition*. Wallingford, UK, CAB International. pp. 33-45.
55. Hargrove, W. L. 1986. Winter legumes as a nitrogen source for no-till matter and tomato yield following tillage, cover cropping, and grain sorghum. *Agronomy Journal*. 78:70-74.

56. Hayes, M. H. B.; Clapp, C. E. 2001. Humic substances; considerations of compositions, aspects of structure, and environmental influences. *Soil Science*. 166: 723-737.
57. Hoveland, C. S.; Evers, G. W. 1985. Arrowleaf, crimson and other annual clovers. *In: Taylor, N. L. ed. Clover science and technology*. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 503-514.
58. Katterer, T.; Bolinder, M.; Olof, A.; Kirchman, H.; Menichetti, L. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 41:184-192.
59. Keeble, F. 1931. The integration of plant behavior. *Proceedings of the Royal Society of London. Serie B*. 108. 537-545.
60. Kuo, S.; Sainju, U. M.; Jellum, E. J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate. *Soil Science Society America Journal*. 61 (1): 145-152.
61. Kuzyakov, Y; Ehrensberger, H.; Stahr, K. 2001. Carbon partitioning and below-ground translocation by *Lolium perenne*. *Soil Biology Biochemistry*. 33: 61-74.
62. _____. 2002. Review; factors affecting rhizosphere priming effects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 165: 382-396.
63. Lal, R.; Eckert, D. J.; Fausey, N. R.; Edwards, W. M. 1990. Conservation tillage in sustainable agriculture. *In: Edwards, C.A.; Lai, R.; Madden, P.; Miller, R. H.; House, G. eds. Sustainable agriculture systems*. Iowa, USA, Soil and Water Conservation Society. pp. 203-225.
64. _____.; Regnier, E.; Eckert, D. J.; Edwards, W. M.; Hammond, R. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. *In: Hargrove, W. L. ed. Cover crops for clean water*. Ankeny, IA, SWCS. pp. 15-21.
65. _____.; Logan, T. J.; Shipitalo, M. J.; Eckert, D. J.; Dick, W. A. 1994. Conservation tillage in the corn belt for United States. *In: Carter, M. R. ed. Conservation tillage in temperate agroecosystems*. Boca Raton, FL, Lewis. pp. 73-114.
66. _____.; Kimble, J.; Levine, E. Whitman, C. 1995. World soils and greenhouse effect: An overview. *In: Lal, R. ed. Soils and global change*. Boca Raton, FL, Lewis. pp. 1-8.

67. Larson, W. E.; Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: Dumanski, J.; Eswaran, H.; Pushparajah, E.; Smyth, A. eds. Evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok, Thailand, International Board for Soil Research and Management. pp. 175-203.
68. MAP. DSF (Ministerio de Agricultura y Pesca. Dirección de Suelos y Fertilizantes, UY). 1979. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay; descripción de las unidades de suelos. t.3, 452 p.
69. Martínez Haedo, H. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo. 8: 68-96.
70. Martino, D. 1997. Siembra directa en los sistemas agrícola-ganaderos del litoral. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82)
71. McVay, K. A.; Radcliffe, D. E.; Hargrove, W. L. 1989. Winter legume effects on soil properties and nitrogen fertilizer requirements. Soil Science Society America Journal. 53: 1856-1862.
72. Meisinger, J. J.; Hargrove, W. L.; Mikkelsen, R. B.; Williams, J. R.; Bensen, V.W. 1991. Effects of cover crops on groundwater quality. In: Hargrove, W. L. ed. Cover crops for clean water. s.n.t. s.p.
73. Miller J. D.; Wells, H. D. 1995. Arrowleaf, crimson and other annual clovers. In: Barnes, R. F.; Miller, D. A.; Nelson, C. J. eds. An introduction to grassland agriculture. Ames, Iowa, Iowa State University. pp. 249-260.
74. Morón, A. 1994. El ciclo del nitrógeno en el sistema suelo – planta – animal. In: Risso, D. F.; Berretta, E. J.; Morón, A. eds. Producción y manejo de pasturas. Montevideo, INIA. pp. 21-33 (Serie Técnica no. 80)
75. _____. 2003. Efecto de las rotaciones cultivos-pasturas sobre la fertilidad de los suelos en ensayos de larga duración (1963-2003). Informaciones Agronómicas. no. 20: 1-7.
76. Norby, R. J. 1994. Issues and perspectives for investigating root responses to elevated atmospheric carbon dioxide. Plant and Soil. 165: 9-20.
77. Oades, J. M. 1978. Mucilages at the root surface. Journal of Soil Science. 29: 1-16.

78. Ohio State University (USA). s.f. Brassicas for forage. Columbus, OH, Ohio State University Extension Department of Horticulture and Crop Science. 1 p. (Agronomy facts 20).
79. Olson, K. R.; Stephen, A. E.; Lang, J. M. 2010. Cover crop effects on crop yields and soil organic carbon content. *Journal Soil Science*. 175: 89 - 98.
80. Omonode, R. A.; Gal, A.; Stott, D. E.; Abney, T. S.; Vyn, T. J. 2006. Short term versus continuous chisel and no-till effects on soil carbon and nitrogen. *Soil Science Society America Journal*. 70: 419-425.
81. Paustian, K.; Parton, W. J.; Persson, J. 1992. Modeling soil organic matter in organic-amended and N-fertilized long-term plots. *Soil Science Society America Journal*. 56: 476-488.
82. _____; Collins, H. P.; Paul, E. A. 1997. Management controls on soil carbon. *In*: Paul, E. A.; Paustian, K.; Elliott, E. T.; Cole, S. V. eds. *Soil organic matter in temperate agroecosystems*. Boca Raton, FL, CRC. pp. 15-49.
83. Pedersen, J. F.; Ball, D. M. 1991. Seasonal performance of several clovers grown as annuals in southern Alabama. *Journal of Production Agriculture*. 4: 105-110.
84. Pennsylvania State University, USA. 2000. Use of brassica crops to extend the grazing season. *Pensilvania, Ag Communications and Marketing*. 4 p.
85. Power, J. F.; Doran, J.; Wand Koerner, P. T.; 1991. Hairy vetch as a winter cover crop for dryland corn production. *Journal of Production Agriculture*. 4: 62-67.
86. Pregitzer, K. S.; Laskowski, M. J.; Burton, A. J.; Lessard, V. C.; Zak, D. R. 1998. Variation in sugar maple root respiration with root diameter and soil depth. *Tree Physiology*. 18: 665-670.
87. Puget, P.; Drinkwater, L. E. 2001. Short-term dynamics of root- and shoot-derived carbon from a leguminous green manure. *Soil Science Society America Journal*. 65: 771-779.

88. Rasse, D. P.; Longdoz, B.; Ceulemans, R. 2001. A modeling approach to below-ground carbon allocation in temperate forests. *Plant and Soil*. 229: 281-293.
89. _____.; Rumpel, C.; Diñac, M.; 2005. Is soil carbon mostly root carbon? mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil*. 269: 341-356.
90. Ratera García, C.; Muslera Pardo, E. 1991. Praderas y forrajes; producción y aprovechamiento. Madrid, Mundi-Prensa. 674 p.
91. Reeves, D. W. 1994. Cover crops and rotations. In: Hatfield, J. L.; Stewart, B. A. eds. *Crops residue management; advances in soil science*. Boca Raton, FL, Lewis. pp. 125-172.
92. Reicosky, D. C. 2002. Long - term effect of moldboard plowing on tillage - induced CO₂ loss. In: *Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil Symposium (1999, Columbus, OH)*. Soil organic carbon and soil properties. Boca Raton, FL, Lewis. pp. 87-96.
93. Ríos, A.; Oliva, M. A.; Da Silva, J. F. 1992. Aspectos ecofisiológicos de la evaluación de sistemas de rotaciones agrícolas. *Investigaciones Agronómicas*. 3: 10.
94. Robertson, G. P.; Swinton, S. M. 2005. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity; a grand challenge for agriculture. *Frontiers in Ecology and Environment*. 3 (1): 38-46.
95. Rethon, F. E. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. *Soil Science Society America Journal*. 64: 700-709.
96. Rufo, M. L. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura. In: Congreso de AAPRESID (11°, 2003, Rosario, Argentina). Otra tierra. Rosario, Argentina, s.e. pp. 171-176.
97. Russell, R. S. 1977. *Plant root systems; their function and interaction with the soil*. London, McGraw-Hill. 298 p.
98. Sainju, U. M.; B. P. Singh; Whitehead, W. F. 2000. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen and tomato yield. *Canadian Journal of Soil Science*. 80: 523-532.

99. _____.; Terrill, T. H.; Gelaye, S.; Singh, B. P. 2003. Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizome peanut and perennial weeds. *Soil Science Society America Journal*. 67 (1): 146-155.
100. Sawchik, J. 2000. 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, IICA. PROCISUR. pp. 323-346.
101. Scianca, C.; Álvarez, C.; Barraco, M.; Quiroga, A.; Zalba, P. 2008. Cultivos de cobertura en un Argiudol típico del noreste bonaerense. In: Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (21º, 2008, San Luis, Argentina). *Semiárido; un desafío para la ciencia del suelo*. s.n.t. s.p.
102. Shank, D. B. 1945. Effect on phosphorus, nitrogen and soil moisture on top root ratios of inbred hibryd maize. *Journal Agricultural Research*. 70: 365-367.
103. Shipley, P. R.; Meisinger, J. J. Decler, A. M.; 1992. Conserving residual corn fertilizer nitrogen with winter cover crops. *Agronomy Journal*. 84: 869-876.
104. Simposio 40 años de Rotaciones Agrícolas Ganaderas (2003, Colonia, Uruguay). 2003. Trabajos presentados. Montevideo, INIA. 85 p. (Serie Técnica no. 134).
105. Siri Prieto, G.; Ernst, O. 2010. Manejo del suelo y rotación con pasturas: efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Revista de Informaciones Agronómicas*. 45: 22-25.
106. Six, J.; Elliott, E. T.; Paustian, K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-till systems. *Soil Science Society America Journal*. 63: 1350-1358.
107. Sowden, F. J.; Atkinson, H. J. 1968. Effect of long-term annual additions of various organic amendments on organic matter of a clay and sand. *Canadian Journal of Soil Science*. 48: 323-330.
108. Stulen, I.; Hertog, J. 1993. Root growth and functioning under atmospheric CO₂. *Vegetatio*. 104 (5): 99-115.
109. Swift, R. S. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*. 166: 858-871.

110. Taylor, J. P.; Wilson, B.; Mills, M. S.; Burns, R. G. 2002. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biology Biochemistry*. 34: 387–401.
111. Tegelaar, E. W.; de Leeuw, J. W.; Holloway, P. J. 1989. Some mechanisms of flash pyrolysis in naturally occurring polyesters. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 15: 289–295.
112. Tiscornia, G.; Giménez, A.; Castaño, J.; Furest, J.; Cal, A.; Schiavi, C. 2013. Informe agroclimático. *Boletín Agroclimático INIA*. 81-92: 1-4.
113. Undersander, D. 1996. Use of brassica crops in grazing systems. Madison, WI, University of Wisconsin. 1 p.
114. USDA. NRCS (United States Department of Agriculture. National Resources Conservation Service, US). 2011. Arrowleaf clover. Coffeeville, Mississippi. 2 p.
115. _____. _____. 2012. Brassica napus. Corvallis, Oregon. 5 p.
116. Vilaró, D.; Pereyra, S. 2008. Resultados evaluación *L. multiflorum* anual. (en línea). Montevideo, INIA. s.p. Consultado nov. 2013. Disponible en http://www.inia.org.uy/convenio_inase_inia/resultados/raigan08.htm.
117. Weil, R.; White C.; Lawley, Y. s.f. Forage radish; new multi-purpose cover crop for the mid-atlantic. University of Maryland. Fact Sheet. 824: 1-7.
118. West, T. O.; Post, W. M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation; a global data analysis. *Soil Science Society America Journal*. 66: 1930-1946.
119. Wiley, T. J.; Snowball, R.; Crai, A. D. 1993. Arrowleaf clover (*Trifolium vesiculosum*). In: Michalk, D. L.; Craig, A. D.; Collins, W. J. eds. Alternative pasture legumes. West Wyalong, AUS, Primary Industries South Australia. pp. 139-142 (Technical report no.219).
120. Wilson, J. B. 1988. A review of evidence on the control of shoot/root ratio, in relation to models. *Annals of Botany*. 61: 433-449.

121. Wiltz, A. R.; Reicosky, R. R; Allmaras, R. R; Clapp, C. E. 2004. Long-term corn residue effects; harvest alternatives, soil carbon turnover and root-derive carbon. *Soil Science Society America Journal*. 68: 1342-1351.
122. Wrightson Pas. s.f. Catálogo *L. multiflorum* INIA Camaro. (en línea). s.n.t. s.p. Consultado nov. 2013. Disponible en <http://www.prolesa.com.uy/backoffice/productos/catalogos/76/RAIGRAS%20INIA%20CAMARO.pdf>
123. Zohary, M.; Heller, D. 1984. The genus trifolium. (en línea). Jerusalem, The Israel Academy of Sciences and Humanities. s.p. Consultado feb. 2014. Disponible en <http://www.iberlibro.com/Genus-Trifolium-Zohary-M-Heller-D/1336171737/bd>

9. ANEXOS

Factor de contribución relativa raíces vs biomasa aérea al COS				
Método experimental	Especie	Duración (meses)	Contribución relativa	Referencias
Insitu	maíz	132	1,5	Barber (1979)
	maíz	48	1,75	Balesdent y Balbane (1996)
	maíz	180	1,7	Bolinder et al. (1999)
	maíz	152	3,3	Clapp et al. (2000)
	<i>Vicia villosa</i>	5	3,7	Puget y Drinkwater (2001)
	Alfalfa	24	2,7	Rasse (s.f.)
	Promedio	90	2,4	
Incubación	Cebada	60	1,33	Broadbent y Nakashima (1974)
	<i>Medicago. sp.</i>	1	1,22	Amato et al. (1984)
	<i>Medicago. sp.</i>	24	1,45	Amato et al. (1984)
	<i>Miscanthus giganteus</i>	20	1,26	Beuch et al (2000)
	<i>Trifolium repens</i>	3	1,3	de Neegard et al. (2002)
	Raigrás	3	1,24	de Neegard et al. (2002)
	Promedio	18,5	1,3	

Información referente a las variables climáticas

Información del clima: INIA Las Brujas; meses: abril-octubre; 2013						
Variable: helada agrometeorológica						
Período:	Máximo:	Mínimo:	Promedio:	Acumulada:	Desvío Estándar:	Total de Registros:
Abril	0	0	0	0	0	30
Mayo	1	0	0.06	2	0.25	31
Junio	1	0	0.33	10	0.47	30
Julio	1	0	0.42	13	0.49	31
Agosto	1	0	0.48	15	0.5	31
Setiembre	1	0	0.2	6	0.4	30
Octubre	1	0	0.1	3	0.3	31

Información del clima: INIA Las Brujas; meses: abril-octubre; desde 1972 hasta 2013						
Variable: helada agrometeorológica						
Período:	Máximo:	Mínimo:	Promedio:	Acumulada:	Desvío Estándar:	Total de Registros:
Abril	1	0	0.04	32	0.2	750
Mayo	1	0	0.07	53	0.25	774
Junio	1	0	0.22	162	0.41	750
Julio	1	0	0.31	251	0.46	807
Agosto	1	0	0.19	152	0.39	806
Setiembre	1	0	0.1	77	0.3	780
Octubre	1	0	0.3	21	0.16	791

<i>B. napus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
AÉREA	Tardía A	0	3	7		
	Temprana A	0	3	5	11	16
	Tardía B	0	3	7		
	Temprana B	0	3	4	11	15
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.

		15-jun.	1-set.	24-set.		
RAÍZ	Tardía A	0	12	25		
	Temprana A	0	12	21	43	51
	Tardía B	0	10	22		
	Temprana B	0	10	11	30	60
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>L. multiflorum</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
AÉREA	Tardía A	0	4	9		
	Temprana A	0	6	8	16	35
	Tardía B	0	4	6		
	Temprana B	0	6	10	14	29
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>R. sativus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
RAÍZ	Tardía A	0	16	58		
	Temprana A	0	16	46	79	100
	Tardía B	0	14	39		
	Temprana B	0	12	38	79	12
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>R. sativus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
AÉREA	Tardía A	0	6	18		
	Temprana A	0	7	7	12	16
	Tardía B	0	8	15		
	Temprana B	0	3	7	11	18
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>R. sativus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
RAÍZ	Tardía A	0	10	22		
	Temprana A	0	27	29	28	22
	Tardía B	0	14	18		
	Temprana B	0	20	30	29	26

		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>T. resupinatum</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
AÉREA	Tardía A	0	1	5		
	Temprana A	0	1	8	10	17
	Tardía B	0	0	3		
	Temprana B	0	0	5	13	14
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>T. vesiculosus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
RAÍZ	Tardía A	0	3	13		
	Temprana A	0	13	19	23	60
	Tardía B	0	2	11		
	Temprana B	0	2	34	30	32
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>T. vesiculosus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
AÉREA	Tardía A	0	1	3		
	Temprana A	0	2	7	12	15
	Tardía B	0	0	3		
	Temprana B	0	3	7	16	
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.
<i>T. vesiculosus</i>						
		15-jun.	1-set.	24-set.		
RAÍZ	Tardía A	0	2	12		
	Temprana A	0	8	23	30	30
	Tardía B	0	2	8		
	Temprana B	0	3	8	30	33
		20-abr.	3-jul.	2-ago.	1-set.	24-set.