

APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



Capítulo 11

Cultivos de servicios para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas

Priscila Pinto, José María Paruelo, Jorge Sawchik y Gervasio Piñeiro

1. Los impactos ambientales de esquemas agrícolas simplificados

La agricultura continua y el monocultivo muestran, en el siglo XXI, un aumento muy importante en los sistemas agrícolas del sur de Sudamérica (Volante *et al.*, 2015). Los sistemas de producción agropecuaria dominantes en el siglo XX se basaban en rotaciones de cultivos anuales con pasturas perennes (Soriano *et al.*, 1991; Hall *et al.*, 1992). Sin embargo, una serie de factores sociales, económicos y tecnológicos condujo a una agricultura especializada y desacoplada de la ganadería, particularmente en los pastizales del Río de la Plata. Los esquemas de agricultura continua, más simplificados que las rotaciones agrícola-ganaderas, cuentan con menor diversidad de cultivos y dan lugar a periodos sin cultivos (barbechos) durante gran parte del año (Rubio, 2011; Pinto *et al.*, 2017). Los cambios en los sistemas agrícolas tuvieron consecuencias tanto a escala global como local. A escala global se puede mencionar la disminución de la regulación del ciclo del agua y de los nutrientes, y la emisión de gases de efecto invernadero. A escala local, las principales consecuencias fueron pérdidas de materia orgánica del suelo (MOS), compactación y reducción de la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, erosión y desertificación y degradación biológica del suelo (Coutinho *et al.*, 2015).

En Uruguay, la Ley de Conservación de Suelos modificada en 2009 ha contribuido a morigerar las consecuencias negativas de esta tendencia al monocultivo. Esta ley fue originalmente pensada para reducir las

pérdidas de suelo por erosión. Más allá del éxito asociado a este objetivo, brinda la oportunidad de aumentar la oferta de otros servicios ecosistémicos, además de la conservación del suelo.

En los sistemas agrícolas, la mayor parte de la energía absorbida se asigna a la producción de granos; como consecuencia, se destina muy poca energía a otros servicios, como el de regulación de los ciclos de la materia. En los pastizales del Río de la Plata, la apropiación humana de la productividad primaria neta (AHPPN), o sea, el carbono (C) fijado que los humanos retiramos del sistema vía exportaciones o desechos (Vitousek *et al.*, 1986), cambió en el siglo XXI. La apropiación humana media fue del 42% en 2001-2002 y aumentó en el 4,5% en los últimos diez años, debido a los intensos cambios en el uso de la tierra. La mayor parte de la apropiación humana se explicó por el aumento del rendimiento de los cultivos y la expansión del sistema de doble cultivo de renta como práctica agronómica común. La apropiación humana en los sistemas ganaderos fue sensiblemente menor a la observada en sistemas agrícolas (Baeza y Paruelo, 2018).

2. Los cultivos de servicio: una tecnología para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos

El aumento de la AHPPN determina que menos energía queda disponible para que se lleven a cabo funciones del ecosistema clave para determinar la oferta de servicios ecosistémicos. Para aumentar la energía disponible para la generación de servicios ecosistémicos de regulación, es necesario disminuir la exportación de granos y/o biomasa, o aumentar la fijación de C (energía) del ecosistema. Por ello, diversos autores proponen aumentar la absorción de energía proveniente del sol mediante la siembra de cultivos que no sean de renta en los períodos de barbecho (Power, 2010; Tittonell, 2014). Esto permitiría aumentar y diversificar la oferta de distintos servicios ecosistémicos en el tiempo (Schipanski *et al.*, 2014; Tittonell, 2014; Gaba *et al.*, 2015; Frasier *et al.*, 2016; Pinto *et al.*, 2017). Estos cultivos que se siembran en los periodos de barbechos y no se cosechan comenzaron a ser denominados “cultivos de servicios”, pero esta práctica fue desarrollada con mucha anterioridad (Piñeiro *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2017; García *et al.*, 2018). La siembra de abonos verdes para aumentar la materia orgánica y el nitrógeno (N) del suelo se remonta a 300 años a. C. (Pieters y McKee, 1938). Desde principios del siglo xx se siembran cultivos de cobertura para evitar la erosión del suelo y la lixi-

viación de los nutrientes. En sus inicios eran incorporados al suelo como abonos verdes (Pieters y McKee, 1938), pero a partir de la adopción de la siembra directa se comenzaron a utilizar herbicidas para interrumpir su ciclo (Mitchell y Tell, 1976; Kemper y Derpsch, 1980). Debido a que el término cultivos de cobertura solo hace referencia a mantener el suelo cubierto para disminuir la erosión, en las últimas décadas se propusieron otras denominaciones para resaltar los diferentes beneficios que brindan: “cultivos trampa”, porque pueden disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación, volatilización o desnitrificación (Thorup-Kristensen, 1994); o “cultivos multipropósitos”, debido a los diversos objetivos por los que pueden ser sembrados (Weil *et al.*, 2009). Sin embargo, el uso de estas denominaciones es menos frecuente y en la comunidad se reconoce la multifuncionalidad de los cultivos de cobertura, más allá de lo que su nombre sugiere. Existe un interés creciente en adoptar el término “cultivos de servicios” (CS) porque, más allá de resaltar la multifuncionalidad, proporciona un marco ecológico que puede ayudar a mejorar el manejo de los agroecosistemas.

Los cultivos de servicios pueden restaurar la provisión de algunos servicios ecosistémicos que se pierden bajo agricultura continua y tienen impacto a distintas escalas. Por un lado, pueden reducir el impacto a escala global mediante el secuestro de C en la MOS (Liu *et al.*, 2005; Ding *et al.*, 2006; Olson *et al.*, 2010) o la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que ocurren durante los períodos de barbecho (*i.e.* óxido nitroso) (Wagner-Riddle y Thurtell, 1998); o, a escala regional, por mantener el nivel de las napas (Nosetto *et al.*, 2012) o evitar su contaminación reduciendo la lixiviación de nutrientes (Rosecrance *et al.*, 2000; Kramer *et al.*, 2002; Venkateswarlu *et al.*, 2007; Bergkvist *et al.*, 2011; Restovich *et al.*, 2012).

Por otro lado, pueden tener impactos a escala local (infiltración, control de malezas, estructuración del suelo) que, a diferencia de los anteriores, son directamente percibidos por los productores y pueden estimular su adopción. Los cultivos de servicios permiten absorber una gran parte de la radiación del sol que generalmente se pierde durante los períodos de barbechos (Caviglia, 2004). A partir de esta energía se puede disminuir, por ejemplo, el subsidio de la fertilización nitrogenada, que permite aumentar la proporción de la radiación incidente que es transformada en productividad primaria neta.

Cada CS brinda una variedad de servicios de regulación y, eventualmente, estos cultivos podrían ser utilizados para brindar también algún servicio de abastecimiento (*e.g.*, pastoreo, producción de semillas), cui-

dando los compromisos en la asignación de energía y recursos. Diversos trabajos científicos, ensayos de productores y experiencias a campo muestran la diversidad de beneficios que estos cultivos brindan, pero, como se dijo anteriormente, es muy importante evaluar de modo detallado los riesgos de la existencia de posibles compromisos entre los cs y los cultivos de renta. La mayoría de estos compromisos se evitan con un buen diseño de las rotaciones y manejos acordes, que potencien las interacciones positivas entre especies y minimicen las negativas.

3. Rasgos de las especies de cs que favorecen la provisión de distintos servicios ecosistémicos

La construcción equilibrada de mezclas de especies, priorizando distintos servicios, debe ser un aspecto clave del uso de cs. En la confección de la mezcla de especies deberá considerarse la complementariedad entre grupos funcionales, tanto a nivel espacial como temporal (*i.e.*, ciclos de crecimientos distintos). La confección de mezclas que proveen distintas calidades de residuos es una herramienta clave para lograr sincronizar la oferta de nutrientes del cs y la demanda del cultivo de renta, y al mismo tiempo dejar el periodo de tiempo necesario para la recarga del perfil. A su vez, con el balance de especies en la mezcla también deberá buscarse cortar el ciclo de transmisión de enfermedades o plagas de los cs al cultivo de renta. Es decir, mediante el manejo y la selección de proporciones y especies en la mezcla podrá encontrarse un equilibrio entre los servicios ecosistémicos priorizados y los riesgos de disminuir excesivamente la provisión de otros.

Según la función ecosistémica a maximizar, las especies deberán presentar distintas características. Se plantean a continuación algunas funciones y algunos aspectos que deberían considerarse en la selección de las especies a usar como cs.

3.1. Formación de materia orgánica

Para aumentar la materia orgánica del suelo es necesario sembrar cultivos que aporten biomasa de diferentes calidades y que tengan una alta producción de raíces finas y exudados radicales, ya que cerca del 50% de la biomasa de raíces pasa a formar materia orgánica del suelo, pero solo el 5% de la biomasa aérea (Jackson *et al.*, 2017). Para aumentar la materia orgánica particulada, clave para la formación y el reciclaje de

los agregados del suelo, es necesario que los cultivos aporten residuos de biomasa de lenta descomposición (alta C/N) y una gran cantidad de raíces finas. Estos residuos promueven la formación de macroagregados porque incrementan el crecimiento de hongos y microorganismos que producen mucílagos, especialmente los residuos de las raíces, por su íntimo contacto con la matriz del suelo (Six *et al.*, 2002). Para aumentar la materia orgánica asociada a los minerales es necesario que los cultivos aporten residuos de biomasa de rápida descomposición (baja C/N y altas cantidades de N) y reducir los periodos de barbechos, para contar con aportes de exudados radicales durante la mayor parte del año. Estos compuestos promueven el crecimiento y el reciclado de microorganismos que, junto con las sustancias simples excretadas por las raíces, dan origen a esta fracción. Es por ello que la siembra de una mezcla de cultivos de servicios que aporten distintas calidades de biomasa (gramíneas, leguminosas, crucíferas, etc.) resulta fundamental para contribuir a la formación de ambas fracciones en simultáneo. Un aspecto clave es que los aportes de biomasa (aérea, pero principalmente subterránea) ocurran durante la mayor parte del año. Por eso es crucial sembrarlos (al voleo o con siembras aéreas) antes de la recolección del cultivo de renta. La maximización de este servicio trae aparejados compromisos que podrían afectar el rendimiento del cultivo de renta siguiente. Por un lado, la eliminación del periodo de barbecho compromete la recarga de agua en el perfil del suelo por el consumo que realiza el cs y aumenta el riesgo de déficit hídrico para el cultivo siguiente. Por otro lado, la supresión tardía de los cs podría provocar una inmovilización de N en el suelo, principalmente con cs de alta C/N y suprimidos tarde o con sembrado en verde del cultivo de renta. Finalmente, en el caso de sembrar cs con especies puras se podrían transmitir algunas plagas y enfermedades, sobre todo en el caso de que se siembren cultivos de renta de las mismas familias.

3.2. Control de malezas

Para controlar malezas y reducir las aplicaciones de herbicidas es necesario sembrar cultivos que presenten una alta tasa de crecimiento, que aporten rastrojo de lenta descomposición y que produzcan compuestos alelopáticos (sustancias químicas que impiden el crecimiento de otras especies) (Véase el Capítulo 6 de esta obra). En este caso hay que priorizar que los cs presenten una rápida captura de los recursos para que compitan con las malezas y que produzcan cambios en el ambiente por

medio de sus raíces, por el rastrojo que dejen en superficie o por las sustancias que liberen al suelo. Está documentado que las raíces de algunas especies como el centeno pueden producir compuestos alelopáticos que reducen la emergencia de malezas (Jabran *et al.*, 2015). Por otro lado, el aporte de rastrojo de lenta descomposición provoca en el ambiente cambios que reducen la emergencia y el crecimiento de las malezas. A su vez, permite que el control de malezas sea más efectivo porque concentra la emergencia en el tiempo y provoca uniformidad en el desarrollo de las plantas. Por eso, la provisión de este servicio no solo aporta beneficios a escala local, sino que también provee un servicio a escala regional porque disminuye la presión de selección de los herbicidas. En este sentido, cambiar el mecanismo de control sobre las malezas resulta muy prometedor para disminuir la aparición de resistencias (Vila-Aiub *et al.*, 2009). Para maximizar este servicio se recomienda la siembra temprana de cultivos de servicios de gramíneas o mezclas. Si bien las leguminosas también pueden lograr un buen control de malezas, principalmente *Vicia villosa*, las gramíneas tienen un efecto residual debido a la lenta descomposición de su rastrojo. Esta residualidad permite contar con un breve periodo de barbecho previo al cultivo de renta y aumentar las reservas de agua. Sin embargo, la lenta descomposición del rastrojo compromete la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo siguiente. Estos residuos favorecen la inmovilización microbiana porque presentan una alta concentración de compuestos recalcitrantes, como la lignina, y una alta relación carbono/nitrógeno. Como consecuencia, pueden disminuir los rendimientos del cultivo de renta siguiente o incrementarse los costos, ya que será necesario aumentar el uso de fertilizantes nitrogenados.

3.3. Descompactación y mejora de propiedades físicas

Para descompactar y mejorar las propiedades físicas del suelo es necesario sembrar cultivos que presenten una alta producción de raíces finas y gruesas. Por un lado, los cultivos de servicios con sistemas radicales más finos pueden aumentar la agregación del suelo, lo cual determina la tasa de infiltración del agua en el suelo y en la porosidad total (Álvarez, 2013; Villamil *et al.*, 2006). Estas propiedades son muy importantes en los agroecosistemas porque evitan el anegamiento y determinan la capacidad de almacenaje del agua en el suelo (Banwart *et al.*, 2016). Por otra parte, cuando el suelo presenta impedancias mecánicas que dificultan la penetración y exploración del suelo por las raíces, la siembra de cultivos

de servicios con raíces más gruesas puede reducir la resistencia a la penetración para el cultivo de renta. Las raíces de mayor diámetro logran atravesar las capas endurecidas del suelo y crean bioporos que favorecen la exploración del suelo del cultivo de renta siguiente (Chen y Weil, 2010; Clark *et al.*, 2003). Por eso la siembra de una mezcla de cultivos de servicios de gramíneas que producen raíces finas con crucíferas de raíces gruesas resulta fundamental para favorecer las distintas propiedades físicas del suelo.

En este caso, es posible que los cultivos de servicios sean de ciclo corto y permitan contar con un breve periodo de barbecho previo al cultivo de renta. Estos cultivos podrían sembrarse precosecha o poscosecha, con siembra terrestre en línea o al voleo. La prioridad es maximizar la producción de raíces, lo cual es posible lograr en periodos cortos de tiempo con cultivos que sean de rápido crecimiento. Si bien esto permite reducir el compromiso con la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente, la elección de cultivos de ciclo corto trae aparejados otros compromisos. Por un lado, favorecen el crecimiento de malezas previo al cultivo de renta siguiente. Como consecuencia, aumentan las aplicaciones de herbicidas en el año, porque se desacopla el control de malezas de la interrupción del cs. Por otro lado, si los cs son de ciclos muy cortos pueden producir semillas y construir un banco de semillas en el suelo. Si la posterior emergencia del cs al año siguiente ocurre en ausencia de cultivos de renta, esto resulta en un beneficio porque se puede contar con un nuevo cs sin la necesidad de volver a sembrarlo. Sin embargo, el crecimiento no planificado de los cultivos de servicios es susceptible de generar problemas en los años en que siembren cultivos de renta durante el periodo que generalmente se encuentra con barbechos (*e.g.*, cultivos de invierno en zonas con predominio de cultivos de verano).

3.4. Control de la erosión

Al igual que para controlar malezas, para controlar la erosión también es necesario sembrar cultivos que presenten una alta tasa de crecimiento y que aporten rastrojo de lenta descomposición; por lo tanto, estos dos servicios se encuentran correlacionados. En este caso es importante garantizar la presencia de cobertura en los momentos de mayor riesgo de erosión. Por un lado, estos servicios ayudan a reducir la erosión hídrica porque la cobertura que generan impide el impacto directo de la gota de lluvia sobre el suelo, frenando la destrucción de los agregados y disminuyendo la ve-

locidad de escurrimiento superficial del agua (Sawchik *et al.*, 2012). Pero, además, como la cobertura vegetal queda anclada al suelo por medio de las raíces, reducen el transporte de sedimentos que se puede dar, tanto por erosión hídrica como eólica. Para maximizar este servicio se recomienda la siembra temprana de cultivos de servicios de gramíneas. De igual modo que para el control de malezas, esto brinda un efecto residual luego de la interrupción del cultivo de servicios, con sus beneficios y compromisos asociados (Véase el apartado 3.2. Control de malezas).

3.5. Abundancia de enemigos naturales

Para aumentar la biodiversidad y favorecer la abundancia de enemigos naturales es fundamental contar con una alta diversidad de plantas que les provean refugio y alimentos. Esto determina que, para maximizar la provisión de este servicio, sea recomendable implementar corredores biológicos que presenten una alta conexión con el área destinada a la agricultura. Diversos trabajos muestran que los corredores biológicos, o “elementos lineales en el paisaje”, como bordes de caminos o alambrados, pueden contener vegetación perenne que provea estos servicios. Por lo tanto, la maximización de este servicio tiene como compromiso la pérdida del área destinada a la producción, aunque pueden utilizarse áreas marginales. Los corredores biológicos, o áreas de refugio de biodiversidad, pueden complementarse con la siembra de una mezcla muy diversa de cultivos de servicios en los periodos de barbechos, disminuyendo el compromiso de la pérdida de área productiva.

3.6. Reposición de N cosechado

Para reponer el nitrógeno cosechado con los cultivos de renta es conveniente sembrar cs de leguminosas que incorporan al suelo nitrógeno del aire por medio de la fijación biológica. Las leguminosas aportan residuos de rápida descomposición, que favorecen el crecimiento y el reciclado de microorganismos que luego dan origen a la fracción de materia orgánica asociada a los minerales. Dado que esta fracción es la principal fuente de nitrógeno para los cultivos (Jilling *et al.*, 2018), su aumento provee dos grandes beneficios. A escala local, reduce la dosis de fertilizante nitrogenado que puede requerir el cultivo de renta siguiente (*e.g.*, maíz, girasol, sorgo) (Pinto *et al.*, 2021). A escala regional y global, disminuye las

pérdidas asociadas a la fertilización nitrogenada (lixiviación y emisión de óxido nitroso), porque el nitrógeno de la materia orgánica se libera gradualmente, mientras que los fertilizantes producen un pulso de liberación luego de su aplicación.

Para maximizar este servicio se debe garantizar una buena implantación e inoculación de las leguminosas, con el fin de acumular biomasa y de contar con altos porcentajes de fijación biológica de nitrógeno (Véase el Capítulo 7 de esta obra). Para lograrlo, puede ser necesario que las leguminosas se siembren en línea, luego de la cosecha del cultivo de renta. Sobre todo cuando requieren un íntimo contacto con el suelo para que se obtenga una buena implantación. A su vez, cuando no exista historia previa de la especie en el lote será fundamental contar con una buena inoculación, incluso utilizando el doble de inoculantes de la dosis recomendada. Por otra parte, la cantidad de nitrógeno fijado biológicamente que aporten las leguminosas también depende de la biomasa acumulada. Las especies que permitan una siembra temprana podrán acumular rápidamente biomasa y ser interrumpidas en forma temprana, dando lugar a periodos de barbechos breves previamente al cultivo siguiente. De este modo, se relativiza el riesgo de disminuir las reservas de agua para el cultivo siguiente, pero podría favorecerse el crecimiento de malezas tardías o las pérdidas de nitrógeno (lixiviación o emisiones de óxido nitroso). Esto último, dado que la liberación de nitrógeno durante la descomposición de las leguminosas es muy rápida –en ciertas condiciones ambientales se puede liberar cerca del 80% del nitrógeno en la biomasa en solo un mes–, y se daría durante el periodo de barbecho, sin poder ser absorbida por el cultivo de renta subsiguiente. Por ello la sincronización de la oferta y demanda de nitrógeno resulta un aspecto central del manejo de todos los cs. Por otro lado, aquellas especies de cs de leguminosas que deban sembrarse en línea comenzarán su ciclo más tarde y será necesario extenderlo para alcanzar una buena acumulación de biomasa, lo cual genera un compromiso con las reservas de agua del suelo.

3.7. Disminución de las emisiones de óxido nitroso, o gei

En este caso, el servicio a priorizar tiene un impacto global, como es la disminución de las emisiones de óxido nitroso. Las emisiones de este gas de efecto invernadero suelen ser altas en los agroecosistemas y, por lo tanto, contribuyen al cambio climático global. Para proveer el servicio de su mitigación se debe priorizar la sincronización entre la disponibilidad

de nitrógeno del suelo y la demanda de los cultivos. Para ello sería recomendable sembrar gramíneas capaces de lograr una rápida captura de los recursos y que aporten rastrojo de lenta descomposición. Pero, por otro lado, la siembra de leguminosas promueve el aumento de la materia orgánica del suelo y la reducción de las emisiones asociadas al uso de los fertilizantes nitrogenados. Por eso, para maximizar la provisión de este servicio resultan muy útiles las mezclas de gramíneas y leguminosas. Finalmente, extender la duración de su ciclo mediante siembras tempranas e interrupciones tardías es crucial para la sincronización, pero presenta compromisos con la disponibilidad de agua y el riesgo de transmitir plagas y enfermedades, como se detalló previamente para el servicio de materia orgánica del suelo.

4. Evidencias empíricas de la contribución de los CS

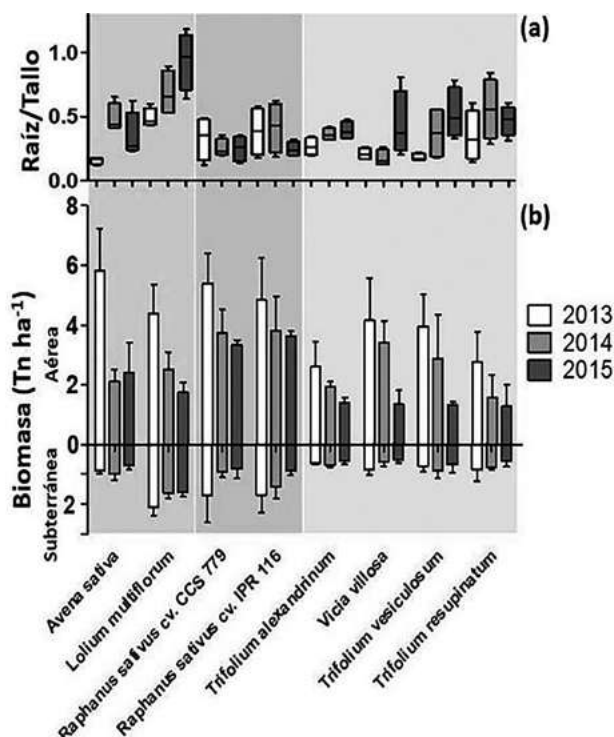
Para evaluar la potencial contribución de los cultivos de servicios se realizaron en el INIA La Estanzuela y el INIA 33 distintos experimentos orientados a explorar las características que presentan distintas especies y los servicios que estas pueden brindar.

1. En el INIA La Estanzuela se evaluó la producción de biomasa aérea y subterránea de ocho especies candidatas a ser empleadas como cultivos de servicios, durante tres años. Las especies sembradas fueron dos gramíneas (*Avena sativa* L. cv. LE 1095a y *Lolium multiflorum* cv. INIA Camaro), dos crucíferas (*Raphanus sativus* cv. IPR 116 y *Raphanus sativus* cv. CCS 779) y cuatro leguminosas (*Vicia villosa* Roth cv. Amoreiras, *Trifolium alexandrinum* cv. INIA calipso, *Trifolium vesiculosum* cv. Sagit y *Trifolium resupinatum* cv. Sirius). La siembra de las especies fue al voleo, sobre el cultivo de soja en pie durante el mes de abril. En todos los años, luego de la evaluación de biomasa se aplicaron herbicidas para terminar el ciclo de los cultivos de servicios y sembrar la soja siguiente.

Los resultados obtenidos en este experimento mostraron que tanto la producción de biomasa subterránea como su relación con la biomasa aérea fueron variables entre las distintas especies, incluso dentro de la misma familia (Figura 1). Las mayores producciones de biomasa subterránea las presentaron *L. multiflorum* y los dos cultivares de *R. sativus* (entre 1,3 y 1,8 t ha⁻¹). La biomasa subterránea de las distintas especies de leguminosas y gramíneas fue variable, pero en todas ellas se mantuvo relativamente constante entre años, resultando en una disminución

en la partición raíz/tallo en los años de mayor producción de biomasa aérea. En cambio, los dos cultivares de crucíferas (*R. Sativus*) presentaron una partición estable entre años y, por lo tanto, la biomasa aérea y la subterránea aumentaron en los años buenos. Las diferencias que presentaron las especies de las diferentes familias probablemente se deban a los rasgos que fueron considerados durante su mejoramiento genético, la biomasa aérea en las gramíneas y leguminosas, y la biomasa subterránea en las especies de crucíferas evaluadas.

FIGURA 1. PARTICIÓN RAÍZ/TALLO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y SUBTERRÁNEA DE OCHO ESPECIES PERTENECIENTES A LAS FAMILIAS DE GRAMÍNEAS, CRUCÍFERAS O LEGUMINOSAS, EN LOS AÑOS 2013, 2014 Y 2015



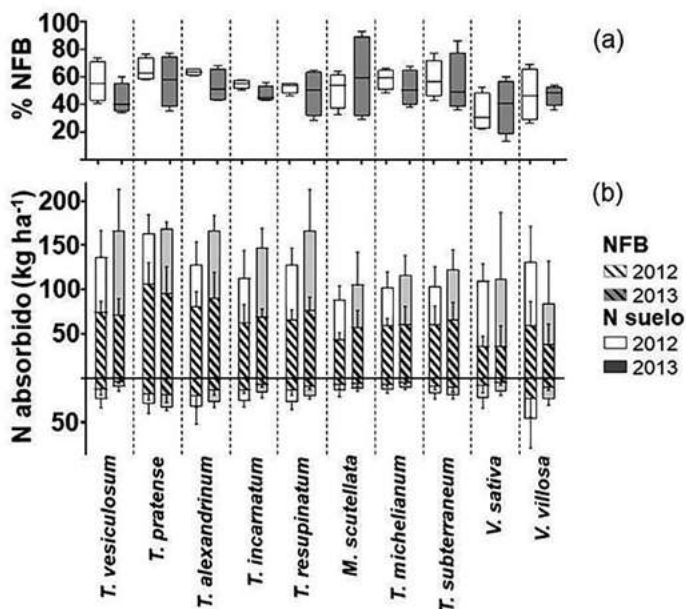
Nota: En el panel superior, las cajas y bigotes muestran las particiones raíz/tallo, la caja contiene al 50% de los datos y la línea indica el valor de la mediana (a). En el panel inferior, las columnas muestran la biomasa aérea (en valores positivos) y la subterránea (en valores negativos) que produjeron en promedio las distintas especies en cada año y su error estándar ($n = 4$) (b). En ambos paneles, las especies se encuentran agrupadas por familia.

Fuente: Elaboración propia.

2. En el INIA La Estanzuela se evaluó la producción de biomasa aérea y subterránea y el aporte de N fijado biológicamente (NFB) en diez especies de cultivos de servicio de leguminosas de invierno, durante dos años consecutivos. Para estimar el NFB se utilizó el método de abundancia natural ^{15}N , que consiste en comparar la señal isotópica que presentan las leguminosas –que absorben N tanto del suelo como del aire– con los valores estimados para cada una de estas fuentes nitrogenadas.

Las especies de leguminosas mostraron diferencias en la producción de biomasa aérea y también en la subterránea, aunque exploraron un rango menor en esta última (3,4 a 9,1 *versus* 0,8 a 1,3 t ha⁻¹, respectivamente). El porcentaje de NFB varió entre 36 y 61%, y los aportes de NFB al suelo fueron de 43 a 121 kg de N ha⁻¹ (Figura 2). Mientras que la biomasa aérea varió entre años, la biomasa subterránea y los aportes de NFB fueron bastante constantes, lo que determinó una baja correlación entre las variables. Entre las especies evaluadas, *Trifolium pratense* y *T. alexandrinum* fueron las mejor clasificadas para las condiciones evaluadas, mostrando la mayor cantidad de biomasa de raíces (~ 1,3 t ha⁻¹) y aportes de NFB (~ 112 kg de N ha⁻¹).

FIGURA 2. PROPORCIÓN DE NITRÓGENO FIJADO BIOLÓGICAMENTE (% NFB) Y CANTIDAD DE N ABSORBIDO (N TOTAL, NFB Y N ABSORBIDO DEL SUELO) DE DIEZ ESPECIES DE LEGUMINOSAS PERTENECIENTES A LOS GÉNEROS MEDICAGO, TRIFOLIUM Y VICIA, EN LOS AÑOS 2012 Y 2013



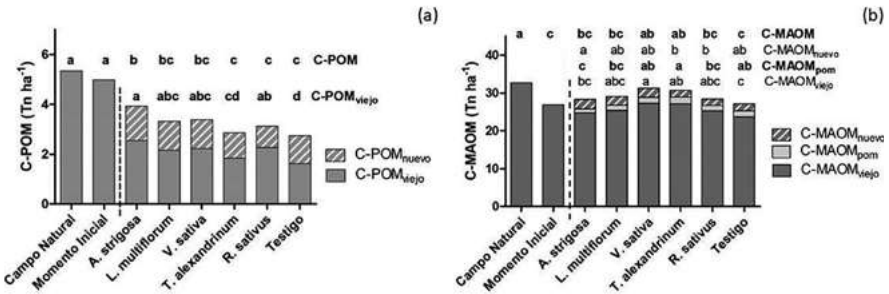
Nota: En el panel (a), las cajas y bigotes muestran los % nfb, la caja contiene al 50% de los datos y la línea indica el valor de la mediana. En el panel (b), las columnas muestran el promedio y el error standard del NFB y el N absorbido del suelo que presenta la biomasa aérea y subterránea en las distintas leguminosas. Las leguminosas se encuentran ordenadas de mayor a menor producción de biomasa aérea en el año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

- En el INIA 33 se estudió el efecto acumulado de rotaciones agrícolas con y sin cultivos de servicios en la formación y descomposición de la materia orgánica del suelo. Para ello se estimaron los contenidos de materia orgánica particulada (POM) y asociada a los minerales (MOAM) al inicio del experimento y luego de tres años de mantener la misma rotación. El uso de isótopos de ¹³C permitió diferenciar el “C nuevo” (proveniente de los cultivos sembrados en el experimento) del “C viejo” (formado previamente al experimento) y, por lo tanto, la formación de POM y MOAM y la descomposición de cada fracción.

El contenido de C-POM del tratamiento testigo (2,74 t C ha⁻¹) fue menor que en las rotaciones con cs, pero en ninguna de estas se alcanzó el C-POM que presentaba el campo natural (5,34 t C/ha⁻¹). Los menores contenidos de C-POM se explican por el aumento en la descomposición del C_{viejo}, ya que todas las rotaciones formaron la misma cantidad de C_{nuevo}. El testigo también presentó los menores contenidos de C-MOAM (27,17 t C ha⁻¹). Todos los cs tendieron a aumentar el C-MAOM y las leguminosas alcanzaron los niveles que presentaba el campo natural (30,98 y 32,68 t C ha⁻¹, respectivamente), debido a una menor descomposición y a que formaron más MAOM a partir de la POM que el resto de las rotaciones. Entre los cs evaluados, avena, raigrás y vicia presentaron los mayores contenidos de C-POM y, vicia y trébol alejandrino los mayores contenidos de C-MOAM. Esto sugiere que, para aumentar ambas fracciones, deberíamos aportar en simultáneo biomasa con calidades diferentes, mediante mezclas de cs de leguminosas y gramíneas (Figura 3).

FIGURA 3. CARBONO EN LA FRACCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA (A) Y ASOCIADA A LOS MINERALES (B) ACUMULADO EN LOS PRIMEROS 15 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO (T C HA⁻¹)



Nota: En el panel (a), las barras lisas muestran el C-POM_{viejo} (C formado previamente a la instalación del experimento) y las barras rayadas, el C-POM_{nuevo} (C formado a partir de los cultivos presentes en la rotación). En el panel (b), las barras oscuras y lisas muestran el C-MAOM_{viejo}, las barras claras y lisas muestran el C-MAOM_{pom} (C formado a partir de la descomposición de la POM) y las barras rayadas el C-MAOM_{nuevo} (C formado a partir de los cultivos presentes en la rotación). Las letras distintas muestran diferencias significativas en los contenidos de C presentes en el campo natural, en el momento inicial y en las distintas rotaciones de soja con cultivos de servicios o barbecho invernal (testigo) luego de tres años ($p < 0,05$ en negrita; $p < 0,10$ en automático).

Fuente: Elaboración propia.

5. Consideraciones finales

El uso de cultivos de servicios (cs) reseñado en este capítulo y en otros es una pieza clave en el diseño de transiciones agroecológicas en sistemas agrícolas de escala. El desarrollo de una agenda de investigación para hacer disponibles tecnologías de este tipo en sistemas agropecuarios extensivos es de enorme importancia para lograr efectos cuantitativamente relevantes sobre la oferta de SE (Tiftonell *et al.*, 2020). Los cs impactan no solo sobre los SE de regulación sino también sobre los de producción, a través de la mejora en la disponibilidad de recursos o la sanidad de los cultivos de renta. Los efectos de los cs se verifican a escala local, con beneficios apropiables por los productores y las comunidades, así como a nivel regional o global. Los cs pueden contribuir de manera directa a varias de las distintas dimensiones que caracterizan a una transición agroecológica. Unos aspectos clave en los que impacta un cs en una rotación agrícola son el aumento de la entrada de C, es decir, energía al sistema, y la reducción de la estacionalidad de las ganancias de C y de la interceptación de radiación. Al ser C lo que queda disponible en el agroecosistema, la inclusión de cs disminuirá la apropiación humana de la productividad primaria e incrementará la energía disponible para mantener las funciones básicas, o el “metabolismo”, del ecosistema. Paruelo *et al.* (2016) y Staiano *et al.* (2021) muestran que la combinación de la cantidad total de C fijado y de su estacionalidad es un buen *proxy* de la oferta de “paquetes” de SE de regulación. Dentro de estos “paquetes”, el balance de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) es uno de los más importantes. La mejora en la eficiencia en el uso de los recursos (particularmente agua y nutrientes) es otro. Finalmente, los cs permiten una reducción sustancial en la aplicación de productos sintéticos, en especial fertilizantes y herbicidas, disminuyendo la dependencia de insumos externos de los sistemas agrícolas y favoreciendo la actividad microbiana y, en definitiva, la salud del suelo y del sistema.

Referencias

Álvarez, C. R.

(2013), “Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo”, en *IAH*, 10, pp. 2-9.

Baeza, S., Baldassini, P., Bagnato, C., Pinto, P. y Paruelo, J.

(2014), *Caracterización del uso/cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS*, *Agrociencia* 18, pp. 95-105.

Baeza, S. y Paruelo, J. M.

(2018), “Spatial and temporal variation of human appropriation of net primary production in the Rio de la Plata grasslands”, en *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.014.

Banwart, S. A., Black, H., Cai, Z., Gicheru, P. T., Joosten, H., Victoria, R. L., Milne, E., Noellemeyer, E. y Pascual, U.

(2016), “The Global Challenge for Soil Carbon”, en *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*, 71, pp. 1-9.

Bergkvist, G., Stenberg, M., Wetterlind, J., Båth, B. y Elfstrand, S.

(2011), “Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley—Effect of N dose and companion grass”, en *Field Crops Research*, 120, pp. 292-298.

Caviglia, O.

(2004), “Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean”, en *Field Crops Research*, 87, pp. 117-129.

Chen, G. y Weil, R. R.

(2010), “Penetration of cover crop roots through compacted soils”, en *Plant and Soil*, N° 331, pp. 31-43.

Clark, L. J., Whalley, W. R. y Barraclough, P. B.

(2003), “How do roots penetrate strong soil?”, en *Plant and Soil*, 255, pp. 93-104.

Coutinho, H. L., Noellemeyer, E., de Carvalho-Balheiro, F., Piñeiro, G., Fidalgo, E. C. C., Martius, C. y Figueira da Silva, C.

(2015), “Impacts of Land Use Change on Carbon Stocks and Dynamics in Central-Southern South American Biomes: Cerrado, Atlantic Forest and Southern Grasslands. Land Use Change and Carbon Dynamics in South America”, en *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*, pp. 224-234.

Ding, G., Liu, X., Herber, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D. y Xing, B.

(2006), “Effect of cover crop management on soil organic matter”, en *Geoderma*, 130, pp. 229-239.

Frasier, I., Quiroga, A. y Noellemeyer, E.

(2016), “Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems”, en *Science of the Total Environment*, 562, pp. 628-639.

Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E. P., Navas, M. L., Wery, J., Louarn, G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M. y Ozier-Lafontaine, H.

(2015), “Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services : from concepts to design”, en *Agronomy for Sustainable Development*, 35, pp. 607-623.

García, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H. y Metay, A.

(2018), “Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review”, en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, pp. 158-170.

Hall, A. J.

(1992), "Field-Crop systems of the Pampas", en Elsevier (ed.), *Ecosystems of the World*, pp. 413-450.

Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V. y Chauhan, B. S.

(2015), "Allelopathy for weed control in agricultural systems", en *Crop Protec*, 72, pp. 57-65.

Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G. y Piñeiro, G.

(2017), "The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls", en *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 48, pp. 419-445.

Jilling, A., Keiluweit, M., Contosta, A. R., Frey, S., Schimel, J., Schnecker, J., Smith, R. G., Tiemann, L. y Grandy, A. S.

(2018), "Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes", en *Biogeochemistry*, 139, pp. 103-122.

Kemper, B. y Derpsch, R.

(1980), "Results of studies made in 1978 and 1979 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraña, Brazil", en *Soil & Tillage Research*, 1, pp. 253-267.

Kramer, A. W., Doane, T. A., Horwath, W. R. y van Kessel, C.

(2002), "Combining fertilizer and organic inputs to synchronize N supply in alternative cropping systems in California", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91, pp. 233-243.

Liu, A., Ma, B. L. y Bomke, A. A.

(2005), "Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides", en *Soil Science Society of America Journal*, 69, p. 2041.

Mitchell, W. H. y Tell, M. R.

(1976), "Winter-Annual Cover Crops for No-Tillage Corn Production", en *American Society of Agronomy*, 69, pp. 569-573.

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B. y Jackson, R. B.

(2012), "The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, pp. 2-11.

Olson, K. R., Ebelhar, S. A. y Lang, J. M.

(2010), "Cover Crop Effects on Crop Yields and Soil Organic Carbon Content", en *Soil Science*, 175, pp. 89-98.

Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L. y Gallego, F.,

(2016), "An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data", en *Ecological Indicators*, 71, pp 145-154.

Pieters, A. y McKee, R.

(1938), "The use of cover and green-manure crops", en Knight, H. (ed.), *Soils and*

Men: Yearbook of Agriculture 1938, United States Department of Agriculture, Washington, pp. 431-444.

Pinto, P.

(2018), *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo*, Tesis de doctorado, Escuela para graduados de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Pinto, P., Fernández-Long, M. E. y Piñeiro, G.

(2017), Including Cover Crops during fallow periods for increasing ecosystem services: is it possible in croplands of South.

Pinto, P., Rubio, G., Gutiérrez, F., Sawchik, J., Arana, S. y Piñeiro, G.

(2021), “Variable root:shoot ratios and plant nitrogen concentrations discourage using just aboveground biomass to select legume service crops”, en *Plant and Soils*, 463, pp. 347-358.

Piñeiro, G., Pinto, P., Arana, S., Sawchik, J., Díaz, J. I., Gutiérrez, F., y Zarza, R.

(2014), “Cultivos de servicio: integrando la ecología con la producción agrícola”, en XXVI Reunión Argentina de Ecología, Comodoro Rivadavia, Chubut (Argentina).

Power, A. G.

(2010), “Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies”, en *Philosophical transactions of the Royal Society B*, 365, pp. 2959-2971.

Restovich, S. B., Andriulo, A. E. y Portela, S. I.

(2012), “Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics”, en *Field Crops Research*, 128, pp. 62-70.

Rosecrance, R. C., McCarty, G. W., Shelton, D. R. y Teasdale, J. R.

(2000), “Denitrification and N mineralization from hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) and rye (*Secale cereale* L.) cover crop monocultures and bicultures”, en *Plant and Soil*, 227, pp. 283-290.

Rubio, G.

(2011), “Los sistemas de producción actuales en la Región Pampeana. Una visión científica”, Simposio Fertilizar 2011. IPNI Fertilizar, pp. 143-149.

Sawchik, J., Pérez-Bidegain, M. y García, C.

(2012), “Impact of Winter Cover Crops on Soil Properties Under Soybean Cropping Systems”, en *Agrociencia Uruguay*, 16, pp. 288-293.

Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., Kemanian, A. R., Mortensen D. A., Ryan, M. R., Tooker, J. y White, C.

(2014), “A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems”, en *Agricultural Systems*, 5, pp. 12-22.

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. y Paustian, K.

(2002), "Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils", en *Plant and Soil*, 241, pp. 155-176.

Soriano, A.

(1991), "Río de la Plata Grasslands", en *Ecosystems of the World*, Elsevier (ed.), Ámsterdam, pp. 367-407.

Staiano L., Camba Sans, G. H., Baldassini, P., Gallego, F., Texeira, M. A. y Paruelo, J. M.

(2021), "Putting the Ecosystem Services idea at work: Applications on impact assessment and territorial planning", en *Environmental Development*, 38, pp. 100570.

Thorup-Kristensen, K.

(1994), "The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops", en *Fertilizer research*, 37, pp. 227-234.

Tittonell, P.

(2014), "Ecological intensification of agriculture-sustainable by nature", en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, pp. 53-61.

Venkateswarlu, B., Srinivasarao, Ch., Ramesh, G., Venkateswarlu, S. y Katyal, J. C.

(2007), "Effects of long-term legume cover crop incorporation on soil organic carbon, microbial biomass, nutrient build-up and grain yields of sorghum/sunflower under rain-fed conditions", en *Soil Use and Management*, 23, pp. 100-107.

Vila-Aiub, M. M., Vidal, R. A., Balbi, M. C., Gundel, P. E., Trucco, F. y Ghera, C. M.

(2008), "Glyphosate-resistant weeds of South American cropping systems: An overview", en *Pest Management Science*, 64, pp. 366-371.

Villamil, M. B., Bollero, G. A., Darmody, R. G., Simmons, F. W. y Bullock, D. G.

(2006), "No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops", en *Soil Science Society of America Journal*, 70, p. 1936.

Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. y Matson, P. A.

(1986), "Human appropriation of the products of photosynthesis", en *BioScience*, 36, pp. 368-373.

Volante, J., Mosciaro, J.; Morales Poclava, M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J., Tiscornia, G., Fuente, M., Maldonado, I., Vega, A., Trujillo, R., Cortéz, L. y Paruelo, J. M.

(2015), "Expansión agrícola 2000-2010 en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación", en *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41, pp. 179-191.

Wagner-Riddle, C. y Thurtell, G. W.

(1998), "Nitrous oxide emissions from agricultural fields during winter and

spring thaw as affected by management practices”, en *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, pp. 151-163.

Weil, R., White, C. y Lawley, Y.

(2009), “Forage radish: A new multi-purpose cover crop for the Mid-Atlantic”, en *Fact Sheet*, 824, pp. 1-8.