

Roberto Álvarez, Gonzalo Berhongaray, Josefina De Paepe, María Rosa Mendoza, Haydée Steinbach, Constanza Caride, Rodolfo Cantet y Carina Álvarez

Facultad de Agronomía, UBA

Sojización y productividad de los suelos pampeanos

El campo argentino, un escenario de fuertes cambios productivos

La producción agropecuaria argentina ha sido escenario de grandes y continuas transformaciones en las últimas décadas. La tradicional 'rotación agrícola-ganadera' que se utilizaba hasta la década del 60, que alternaba un período agrícola con cultivos de granos y otro de pasturas para alimentación del ganado, se reemplazó progresivamente por planteos de agricultura continua (figura 1). Durante el período de pastura se buscaba recuperar la fertilidad del suelo perdida en la fase agrícola, logrando pequeños aumentos de los contenidos de materia orgánica y nutrientes. Paralelamente al avance de la agricultura, a mediados de la década del 70 irrumpe en escena el cultivo de soja, que se difundió exponencialmente a

partir de entonces y generó el fenómeno conocido como *sojización* (figura 2A).

El avance de la soja se debió a numerosos factores como bajos costos de producción, precios favorables, gran adaptabilidad del cultivo a distintas condiciones ambientales, baja necesidad de fertilizantes, adopción de la siembra directa de los cultivos sin necesidad de labrar el suelo previamente y posibilidad de hacer dos cultivos por año en lugar de solo uno cultivando la secuencia trigo-soja, en la cual el trigo se cultiva en invierno y la soja inmediatamente a continuación de la cosecha del trigo, en verano. Otro elemento clave que contribuyó al avance del cultivo de soja fue la introducción de cultivares transgénicos con resistencia a herbicidas de acción total (glifosato). A nivel de toda la región pampeana el proceso de *sojización* no produjo una reducción importante de la superficie destinada a los cultivos tradicionales como trigo, maíz y girasol, sino que

¿DE QUÉ SE TRATA?

La aptitud de los suelos para cultivarlos y producir alimentos está estrechamente ligado a un proceso lento pero constante: la transformación de residuos vegetales, animales y microbianos en materia orgánica. ¿Cómo afectó la agricultura este proceso? ¿Cómo varió su impacto en el espacio y el tiempo?

Antes de 1960

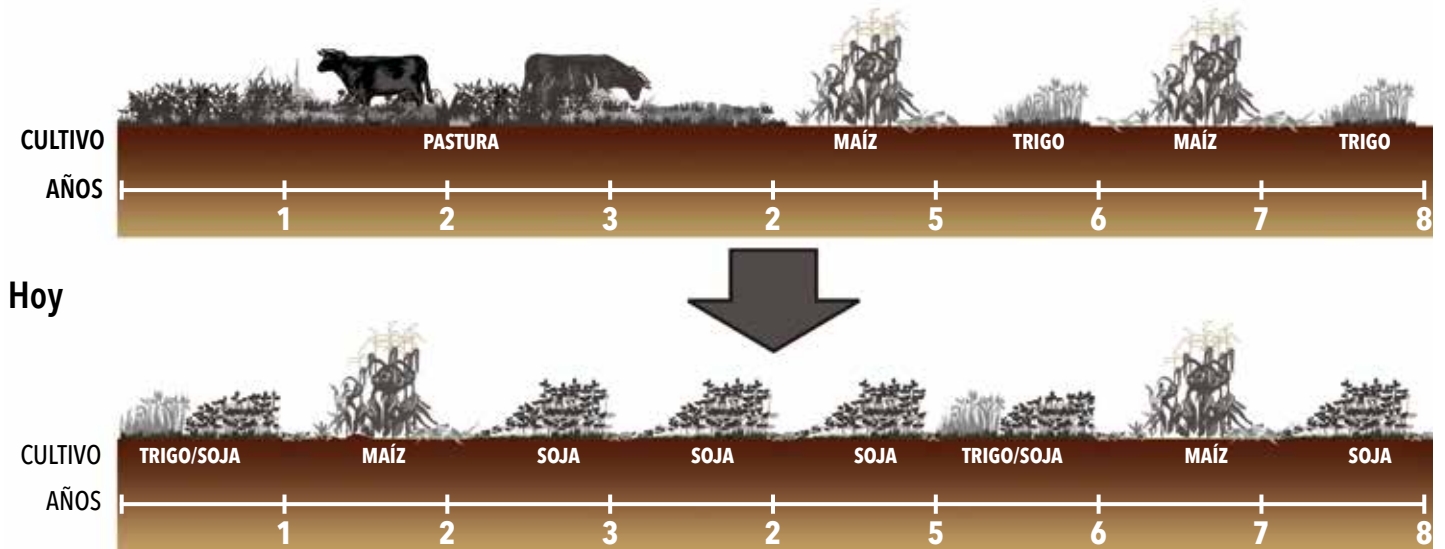


Figura 1. Ejemplo de rotaciones dominantes en la pampa ondulada (norte de Buenos Aires, sur de Santa Fe, sudeste de Córdoba) antes de 1960 y en la actualidad. Antes de 1960 se alternaba un período de producción ganadera sobre pasturas con un período de agricultura con producción de cultivos de granos. En la actualidad hay una tendencia a realizar solo cultivos agrícolas y es la soja el cultivo que ocupa mayor proporción de la rotación. Este fenómeno se ha denominado *sojización*.

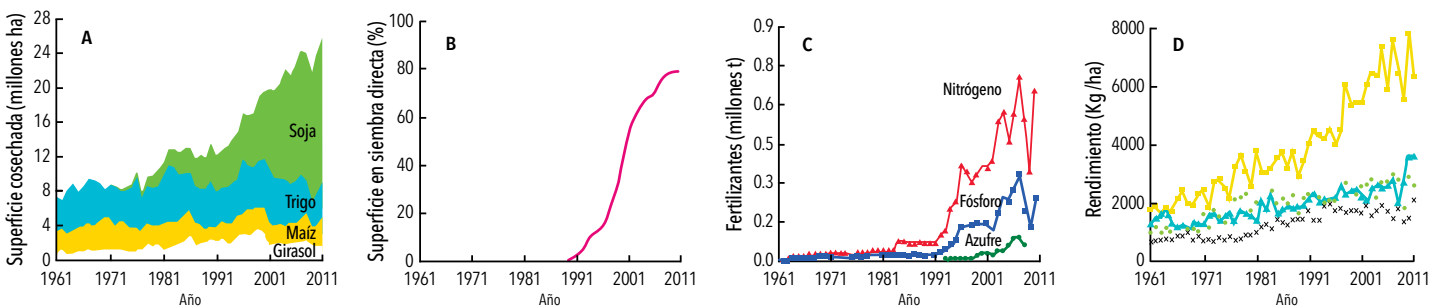


Figura 2. A. Evolución de la superficie cosechada de los principales cultivos en la región pampeana. B. Evolución porcentual de la superficie de cultivos manejados en siembra directa en la región. C. Evolución del consumo de nitrógeno, fósforo y azufre de fertilizantes en la Argentina. D. Evolución de los rendimientos de los principales cultivos de la región pampeana entre 1969 y 2011. Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, AAPRESID y Fertilizar Asociación Civil.

generó el reemplazo en las rotaciones de las pasturas por agricultura con soja y la expansión de la frontera agrícola hacia regiones anteriormente no cultivadas.

El suelo, un recurso natural esencial para la producción

El suelo es uno de los recursos naturales esenciales para la producción de alimentos. En él crecen las raíces de las plantas que absorben agua, oxígeno y nutrientes como nitrógeno, fósforo y azufre, todos necesarios para el crecimiento de un cultivo (figura 3). La fracción sólida del suelo está formada principalmente por partículas minerales de distinto tamaño y por materia orgánica, generada a partir de restos de vegetales y animales en descomposición. Estos materiales se organizan en agregados o terrones, dejando espacios entre ellos, llamados poros.

Los poros más pequeños permiten retener agua y en los más grandes crecen las raíces y circula el oxígeno necesario para la respiración de las raíces. El volumen del suelo se reparte aproximadamente en partes iguales de sólidos y poros. La materia orgánica tiene una gran influencia sobre la calidad de los suelos ya que mejora la formación de agregados y poros, es fuente de nutrientes para las plantas y de energía para los microorganismos, favoreciendo los procesos de reciclaje de materia y energía.

El esquema de producción tradicional pampeano, ampliamente difundido años atrás, se caracterizaba por el uso del sistema de labranza convencional durante la fase agrícola de la rotación. En ella se preparaba el suelo para la siembra del cultivo mediante la utilización del arado que enterraba los residuos del cultivo anterior. Esta forma de preparación del suelo requiere una gran cantidad de energía en forma de combustible para operar la maquinaria y deja el suelo descubierto, sin protección contra la acción erosiva de la lluvia o el viento (figu-

ra 4). Comenzaron entonces a manifestarse síntomas de erosión hídrica y eólica, y ello condujo, en una primera etapa, a la adopción de sistemas de labranza conservacionista, con máquinas menos agresivas que el arado que dejaban el suelo parcialmente cubierto por residuos del cultivo anterior. También estos sistemas implicaban una menor necesidad de maquinaria y combustible.

Durante la década del 90 la disminución del precio del herbicida glifosato y los avances tecnológicos en las máquinas sembradoras dieron comienzo a un proceso de crecimiento sostenido de la superficie manejada en siembra directa en la Argentina (figura 2B). En este sistema, la siembra del cultivo se realiza directamente sobre los residuos del cultivo antecesor, sin ningún tipo de movimiento del suelo, lo que reduce el riesgo de erosión (figura 4). La adopción de la siembra directa fue acompañada por el aumento en el uso de fertilizantes, en especial nitrogenados, fosforados y azufrados, principalmente para el trigo y el maíz (figura 2C).

¿Cómo cambiaron las propiedades del suelo con la agricultura?

Cuando un ecosistema natural es cultivado experimenta cambios en los suelos que afectan su productividad. Estos cambios son generalmente negativos (degradan el suelo) y los principales que se observan en la región pampeana son la disminución de la materia orgánica, la pérdida de nutrientes, la erosión y la compactación.

Como mencionamos, la materia orgánica es un elemento esencial del suelo. Se compone de carbono en un 56-58% y en menor proporción por nitrógeno, fósforo y azufre, entre otros. La materia orgánica influye sobre numerosas propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo que afectan su capacidad para albergar cultivos, actuando



Figura 3. Esquema del suelo y sus funciones, que muestra la disposición de los poros entre y dentro de los agregados o terrones. También se indica la composición aproximada de un suelo pampeano en sus fases sólida, líquida y gaseosa. La materia orgánica se constituye a partir de restos vegetales y animales transformados y los minerales se presentan como arena, arcilla o limo, según el tamaño de partícula.



Figura 4. Izquierda: suelo desnudo preparado para la siembra con uso de arado. Derecha: siembra de soja en un sistema de siembra directa sobre suelo cubierto por residuos del trigo anterior.

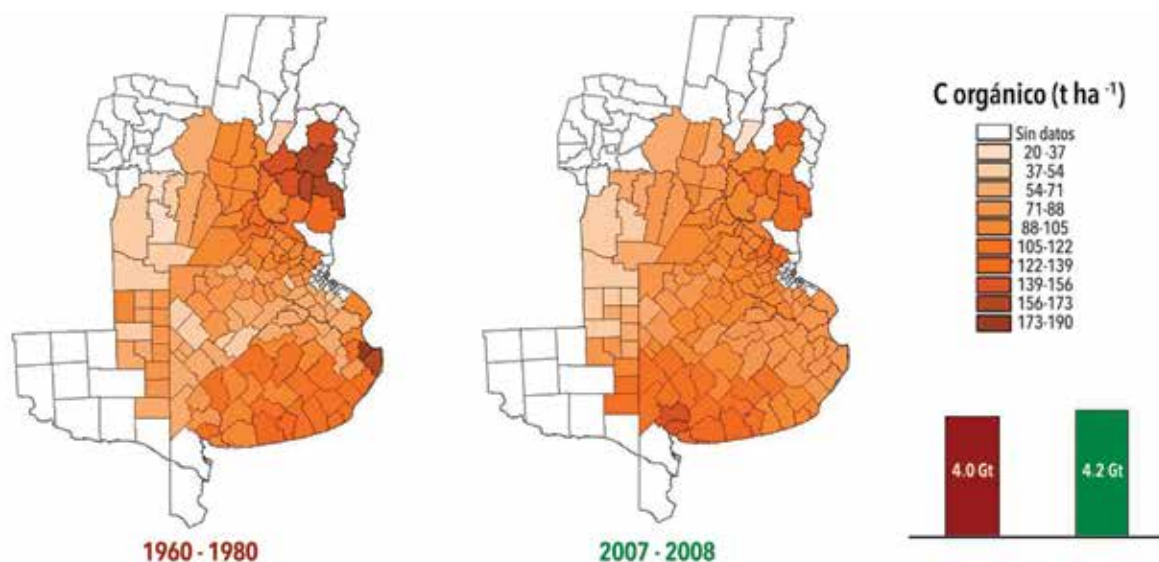


Figura 5. Stock de carbono en la materia orgánica en suelos pampeanos hasta 1m de profundidad estimado para 1960-1980 y en 2007-2008. Las barras indican la cantidad de carbono en el suelo hasta el metro de profundidad en toda la región para ambos períodos. Fuente: redibujado de Álvarez, Berhongaray *et al.*, 2012.

principalmente como proveedora de nutrientes para las plantas. En la región pampeana se ha encontrado una estrecha relación entre la productividad de trigo y el contenido de materia orgánica del suelo en el que se cultivó.

Recientemente se ha evaluado el efecto de la agricultura sobre la cantidad de materia orgánica de los suelos pampeanos. Mediante la comparación de suelos apareados, cultivados y sin cultivar, en establecimientos productivos distribuidos en toda la región pampeana, se observó que los suelos cultivados presentan alrededor de 14% menos de materia orgánica (ver tabla). Esta disminución se produjo a lo largo de entre 60 y 140 años, lo que revela un efecto negativo de la agricultura sobre las reservas de materia orgánica de los suelos pampeanos. Sin embargo, si se comparan los contenidos de carbono de los suelos entre 1960 y 1980 (época en que fueron evaluados por el INTA) y la actualidad, no se detectan cambios importantes a nivel regional, aunque sí se ad-

vierten variaciones zonales importantes (figura 5). Esto sugiere que el total de materia orgánica de los suelos pampeanos no ha variado significativamente en las últimas décadas, lo cual sugiere que las pérdidas debieron ocurrir en períodos anteriores al avance de la agricultura continua y la expansión de la soja.

La agricultura extrae nutrientes del suelo en los productos cosechados que son transportados hacia las ciudades. No solo nitrógeno o fósforo, sino también cationes como calcio, potasio y magnesio, produciendo la acidificación del suelo (disminución de su pH). Suelos con un pH por debajo de 5,5 presentan problemas para el crecimiento de la mayor parte de los cultivos. En el relevamiento realizado en la región pampeana antes descrito no se han detectado problemas de acidificación generalizados ni se han detectado diferencias entre sitios cultivados y no cultivados (ver tabla), de modo que la acidificación no parece ser un problema que haya afectado la productividad pampeana hasta el presente.

Otro proceso de degradación observado en la región, ligado al laboreo continuo del suelo y a la ausencia de cobertura vegetal o de residuos, es la erosión. En el este de la región pampeana predomina la erosión producida por las lluvias y en el oeste, la generada por el viento. La erosión reduce o elimina la capa superficial del suelo en la que se encuentra la mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes. La subregión conocida como pampa ondulada (norte de la provincia de Buenos Aires, sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba) es la más afectada por este proceso. Estudios recientes mostraron una disminución de unos 4cm en la capa superficial de los suelos de esta subregión. Esta pérdida de suelo, en la medida en que el proceso erosivo no se detenga, representa una disminución potencial de la productividad en el largo

Propiedades de los suelos pampeanos en situaciones no cultivadas y cultivadas en la capa superficial (0-25cm)

Propiedad del suelo	No cultivado	Cultivado	Variación (%)
Materia orgánica (t /ha)	84	72	-14
pH (acidez)	6,2	6,4	no significativa estadísticamente
Densidad aparente (t/m ³)	1,1	1,2	+10
Nitrógeno total (t/ha)	5,9	5,1	-14
Fósforo disponible (kg/ha)	170	59	-65

Fuente: Álvarez, Berhongaray *et al.*, 2012.

plazo debido a que conlleva la pérdida de materia orgánica y nutrientes. Como consecuencia de los procesos de erosión, pérdida de materia orgánica y salida de nutrientes por cosecha, se ha producido una disminución en la fertilidad o disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo en los suelos (ver tabla).

El suelo debe ser un ambiente favorable para el desarrollo y la exploración por parte de las raíces. La compactación disminuye el volumen de los poros más grandes del suelo por donde crecen las raíces, con lo cual reduce el volumen de suelo explorado por ellas y, consecuentemente, la absorción de agua y nutrientes. La caída en el contenido de materia orgánica del suelo, el tránsito de maquinaria y las labranzas continuas son causantes de la compactación. Esta puede medirse mediante la determinación de la densidad aparente del suelo, que consiste en la relación entre su masa y el volumen ocupado. En los planteos agrícolas de la región pampeana se han encontrado aumentos de la densidad aparente que rondan en promedio un 10% respecto de suelos no cultivados (ver tabla), si bien los valores hallados no alcanzan los valores críticos que pueden afectar el crecimiento de las raíces (entre 1,5 y 1,8t m⁻³ según el suelo).

La adopción de siembra directa descrita antes revirtió parcialmente algunos de los cambios negativos generados por la agricultura. Este sistema permitió un aumento promedio de 6% del nivel de materia orgánica en la capa superficial en suelos de la región. Sin embargo, no resulta suficiente para controlar la erosión cuando las pendientes del terreno son pronunciadas o predominan cultivos que dejan el suelo poco cubierto por residuos, como ocurre con la soja. Como contrapartida, se observa un leve incremento de la densidad aparente (3%) bajo

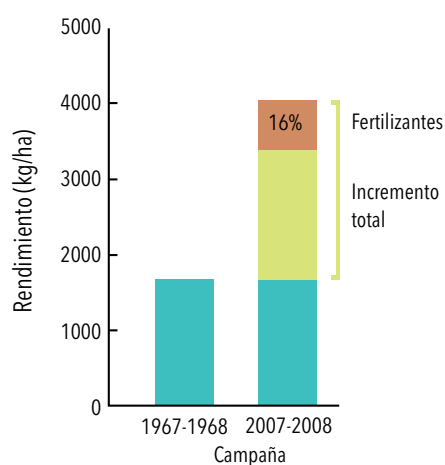


Figura 6. Rendimiento promedio de grano de la región pampeana (trigo, maíz, soja y girasol) para dos campañas agrícolas, 1967-1968, en la que casi no se utilizaban fertilizantes, y 2007-2008, con alto uso de fertilizantes. La franja azul indica la proporción del aumento de rendimiento atribuible al uso de fertilizantes entre esas dos campañas. Fuente: Álvarez *et al.*, 2013.

este sistema de labranza, aunque no suele alcanzar valores críticos. Algunos interrogantes que resta contestar se vinculan al impacto de este sistema sobre la acumulación de agroquímicos en suelo y las masas de agua y la biodiversidad.

¿Cómo evolucionaron los rendimientos de los cultivos?

En los apartados anteriores se describieron los cambios de manejo y su impacto sobre algunas propiedades importantes de los suelos relacionadas a la productividad. Podemos preguntarnos ahora si el rendimiento de los cultivos reflejó los cambios en las propiedades de los suelos. La respuesta es no. Los rendimientos aumentaron y el maíz presentó los aumentos más importantes (figura 2D).

Los factores que contribuyeron a estos aumentos, y que no se relacionan con el suelo, son numerosos: mejora genética, ajustes en la fecha de siembra, mejor control de malezas, enfermedades y plagas, etcétera. Un factor que sí se relaciona con el suelo y el aporte de nutrientes, y que también contribuyó a este aumento, fue el incremento en el uso de fertilizantes, principalmente de nitrógeno, fósforo y azufre. Este aporte de nutrientes permitió aumentar los rendimientos, especialmente de cereales como trigo y maíz. Entre la campaña agrícola 1967-1968 y la campaña 2007-2008 el rendimiento medio de grano de la región pampeana se duplicó. Se estima que un 16% de ese aumento se debe a la fertilización (figura 6).

Por el contrario, el cambio de la modalidad de labranza (de convencional a siembra directa) no parece haber afectado los rendimientos. Los resultados de numerosos experimentos realizados en la región pampeana, principalmente en la porción más húmeda, muestran que los principales cultivos tienen rendimientos semejantes en sistemas manejados con uno u otro tipo de labranza, en la medida en que el suministro de nitrógeno por ferti-

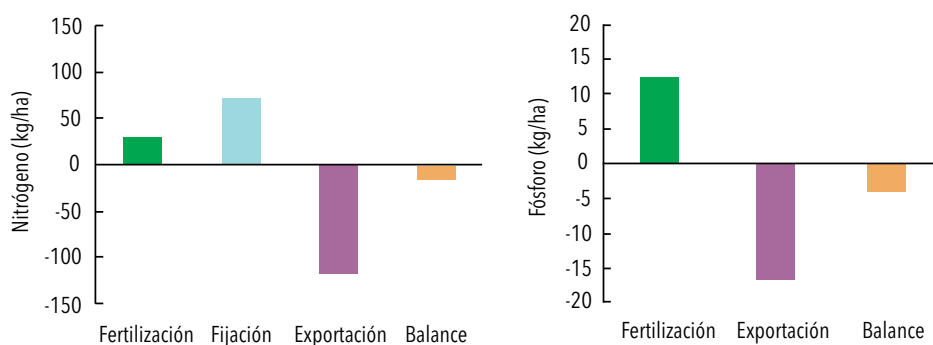


Figura 7. Balance promedio de nitrógeno y fósforo para los suelos cultivados de la región pampeana en la campaña 2007-2008. Fuente: Álvarez *et al.*, 2013.

Balance de nitrógeno

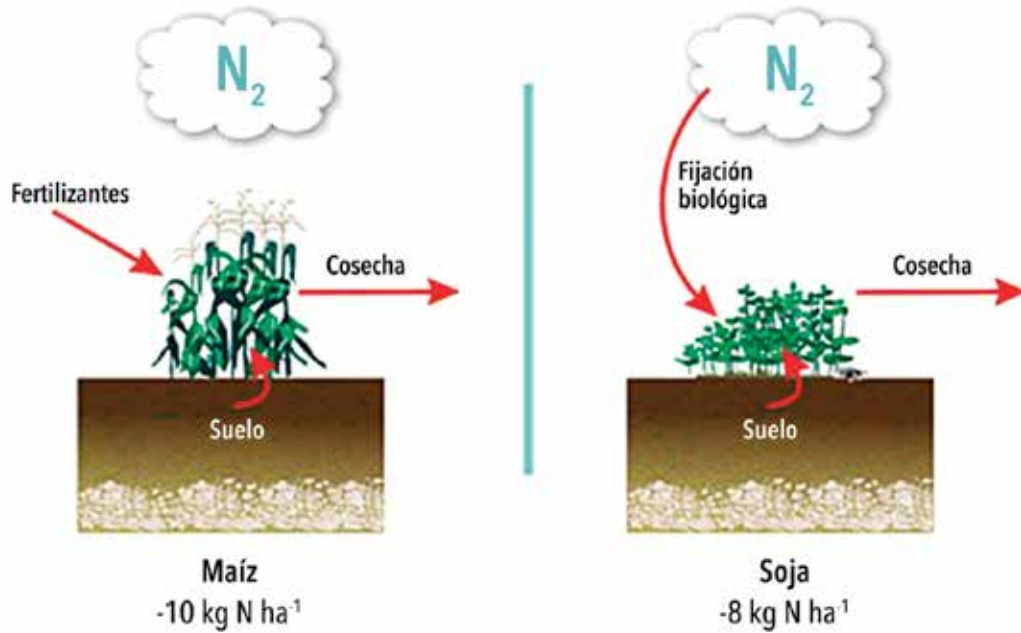


Figura 8. Balance de nitrógeno de maíz o soja en la región pampeana. Fuente: Álvarez, Berhongaray *et al.*, 2012.

lización sea adecuado. Sin embargo, resulta aventurado generalizar estos resultados a la porción semiárida de la región, donde no está claro qué papel puede jugar el sistema de labranza sobre la producción.

¿Cómo podrían cambiar las propiedades de los suelos en el futuro?

Las pérdidas de nutrientes que han experimentado históricamente los suelos pampeanos continúan en los sistemas productivos contemporáneos. Estas pérdidas se producen mediante cosechas cada vez más voluminosas con respecto a los nutrientes que ingresan al suelo. En la actualidad existe un flujo de entrada importante de nutrientes como nitrógeno y fósforo en los ecosistemas cultivados por fertilización y de nitrógeno mediante la fijación biológica que realiza la soja. Esta especie pertenece a la familia de las leguminosas que mediante una asociación con una bacteria que se aloja en sus raíces es capaz de aprovechar el nitrógeno del aire, una fuente inagotable.

A pesar de esto, los balances regionales de nitrógeno y fósforo, que resultan de la diferencia entre entradas y salidas de nutrientes, siguen siendo negativos (figura 7). También la sustitución de maíz por soja en algunas rotaciones, por ejemplo en las usadas en la

pampa ondulada, ha permitido mantener o mejorar levemente los balances de nitrógeno ya que el maíz presenta un balance más negativo que la soja, aun con uso de fertilizantes (figura 8). Un esquema racional de fertilización permitirá manejar los niveles de nutrientes en los suelos de manera de evitar que su disponibilidad caiga por debajo de niveles críticos.

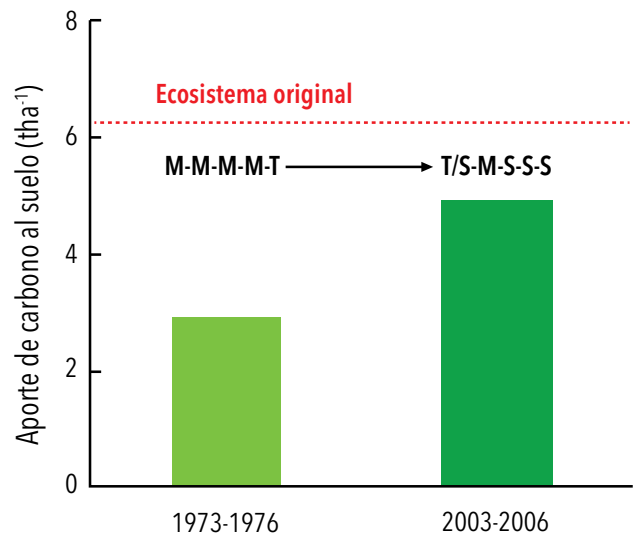



Figura 9. Aporte estimado de carbono de residuos vegetales a suelos de la pampa ondulada generado por las rotaciones usadas en diferentes períodos en esa subregión. M = maíz, T = trigo, S = soja. La línea punteada indica el aporte de carbono al suelo estimado para el ecosistema original. Fuente: Álvarez, Berhongaray *et al.*, 2012.

Entre los productores agropecuarios existe una gran preocupación con relación a los cambios futuros del contenido de materia orgánica de los suelos. Este contenido refleja la diferencia entre las entradas producidas por el ingreso de residuos vegetales y las salidas generadas por la actividad de los microorganismos descomponedores, que eliminan el carbono mediante la respiración celular. La introducción de soja en las rotaciones en reemplazo del maíz en algunas zonas determinó una drástica disminución de los ingresos de residuos vegetales al suelo por ser una especie de mucho menor porte. Sin embargo, el incremento generalizado de los rendimientos de todos los cultivos debido a la mejora tecnológica trajo aparejado un efecto contrapuesto, el de generar plantas cada vez más grandes que aportan más residuos al suelo. A esto se sumó también un mayor número de cultivos por año al generalizarse el doble cultivo trigo-soja en un mismo año. El resultado de estos dos procesos antagónicos ha sido que los ingresos de carbono en residuos a los suelos han aumentado respecto de los que se producían años antes en planteos agrícolas, aunque son todavía inferiores a los que existían bajo la vegetación pampeana original (figura 9). Es esperable que el aumento del ingreso de residuos a los suelos se mantenga en el futuro y

permita incrementos de los niveles de materia orgánica a largo plazo.

Consideración final

En la región pampeana se ha observado un deterioro generalizado de los suelos debido a su cultivo, pero en su mayoría los cambios de las propiedades de los suelos no alcanzaron valores críticos o preocupantes. La tecnología ha compensado los efectos de la degradación sobre el rendimiento de los cultivos, incrementándolos. Es esperable que el avance de la agricultura y de la soja lleve a pérdidas de fertilidad de los suelos en el futuro, pero su impacto sobre la productividad puede minimizarse y hasta revertirse con el tiempo si se mantiene el efecto positivo de los avances tecnológicos producidos en las últimas décadas sobre los rendimientos. La agricultura y el proceso de sojización tienen otros impactos sobre los ecosistemas además de los descriptos aquí sobre los suelos, así como sobre aspectos económicos y sociales que no son abordados en este artículo, pero que resultan igualmente relevantes. 

LECTURAS SUGERIDAS

ÁLVAREZ R, BERTHONGARAY G, DE PAEPE J, MENDOZA MR, STEINBACH HS, CARIDE C y CANTET R, 2012, 'Productividad, fertilidad y secuestro de carbono en suelos pampeanos: efecto del uso agrícola', *Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, t. LXVI: 381-426.

ÁLVAREZ R, PRYSTUPA P, RODRÍGUEZ MB y ÁLVAREZ CR (eds.), 2013, *Fertilización de cultivos y pasturas*, FAUBA, Buenos Aires.

ÁLVAREZ R, RUBIO G, ÁLVAREZ CR y LAVADO R (eds.), 2012, *Fertilidad de los suelos: caracterización y manejo en la región pampeana*, FAUBA, Buenos Aires.

DE PAEPE J & ÁLVAREZ R, 2013, 'Developments of a soil productivity index using an artificial neural network approach', *Agronomy Journal*, 105: 1803-1813.

Roberto Álvarez

Ingeniero agrónomo, UBA.
Profesor titular, Facultad de
Agronomía, UBA.
Investigador independiente del
Conicet.
ralvarez@agro.uba.ar

Gonzalo Berhongaray

PhD e investigador posdoctoral,
Universidad de Amberes.
bgonzalo@agro.uba.ar

Josefina L De Paepe

MSc, Universidad de Amberes.
Jefa de trabajos prácticos, Facultad
de Agronomía, UBA.
depaepe@agro.uba.ar

María R Mendoza

Ingeniera agrónoma, UBA.
mmendoza@agro.uba.ar

Haydée S Steinbach

MSc, UBA.
Profesora adjunta, Facultad de
Agronomía, UBA.
steinbac@agro.uba.ar

Constanza Caride

Ingeniera agrónoma, UBA.
Ayudante de primera, Facultad de
Agronomía, UBA.
conicaride@gmail.com

Rodolfo Cantet

PhD, Universidad de Illinois.
Profesor titular, Facultad de
Agronomía, UBA.
Investigador principal del Conicet.
rcantet@agro.uba.ar

Carina R Álvarez

Doctora en agronomía, UBA.
Profesora asociada, Facultad
de Agronomía, UBA.
alvarezc@agro.uba.ar