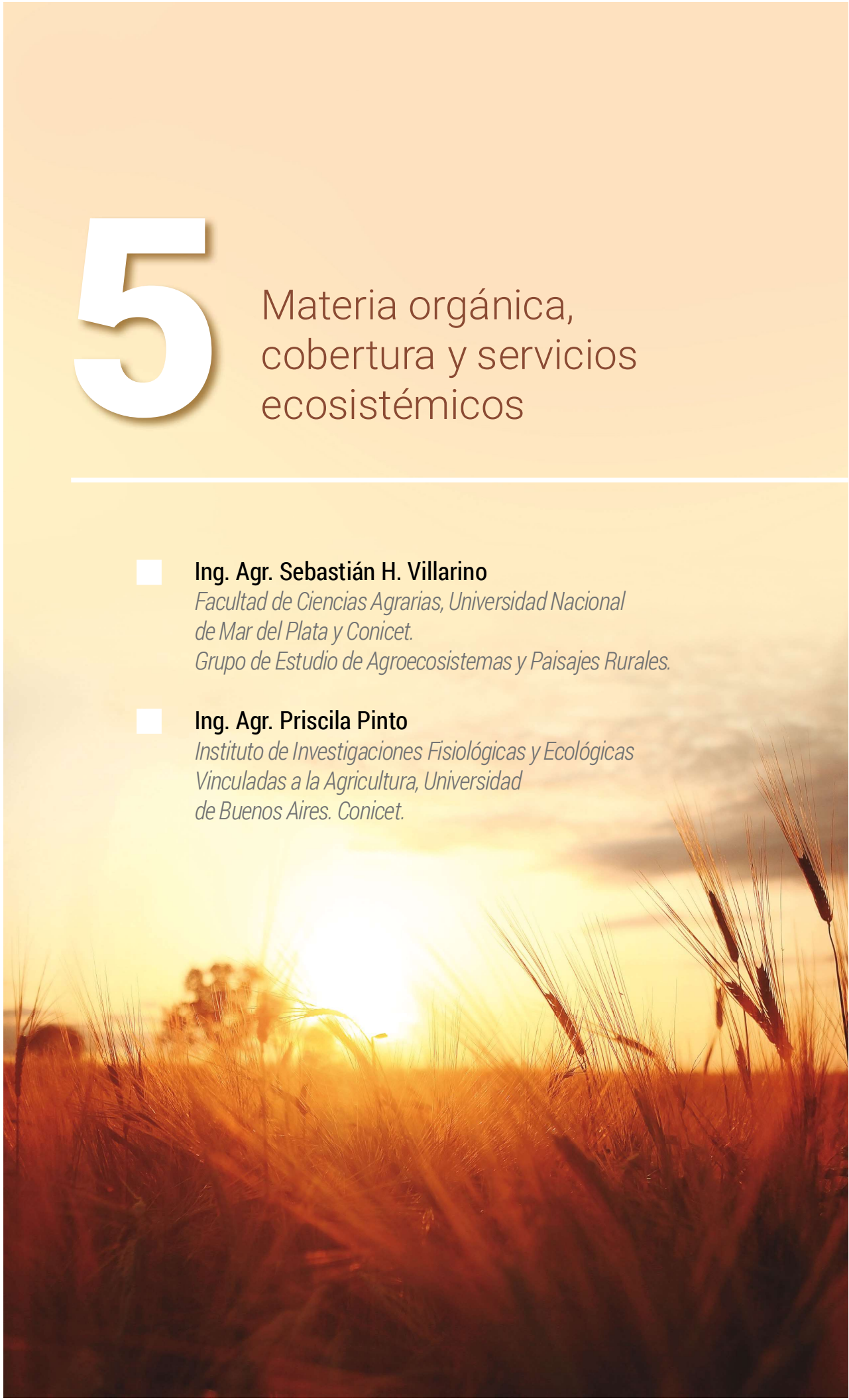


5

Materia orgánica, cobertura y servicios ecosistémicos

- **Ing. Agr. Sebastián H. Villarino**
*Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional
de Mar del Plata y Conicet.
Grupo de Estudio de Agroecosistemas y Paisajes Rurales.*
- **Ing. Agr. Priscila Pinto**
*Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas
Vinculadas a la Agricultura, Universidad
de Buenos Aires. Conicet.*



El suelo desempeña un rol fundamental en la producción agrícola-ganadera, pero también en los procesos de regulación naturales que contribuyen al bienestar humano. Es considerado el biomaterial más complejo del planeta debido a que está compuesto por una rica mezcla de minerales, materia orgánica, organismos vivos, gases, agua y nutrientes. Quizá sea debido a esta complejidad, que la relevancia del suelo para nuestra vida no está lo suficientemente reconocida. En la figura 1 se presenta un marco conceptual que permite ejemplificar algunas relaciones entre el funcionamiento del suelo y las necesidades humanas.

El capital natural del suelo refiere a su estructura biofísica, la cual puede ser descripta a través de sus componentes y propiedades. Los componentes pueden definirse como los elementos biogeoquímicos presentes en el suelo, mientras que las propiedades corresponden a sus características físicas, químicas y biológicas. Dichos componentes y propiedades se encuentran en un equilibrio dinámico definido por los procesos que tienen lugar en el suelo. Los servicios ecosistémicos, definidos como aquellos aspectos de los ecosistemas que aportan beneficios a diferentes actores sociales, emergen de esta interacción entre componentes, propiedades y procesos, mientras que los actores sociales son los grupos de personas que se benefician de los servicios ecosistémicos y pueden ser clasificados según su relación con el capital natural. Existen quienes tienen relación directa con él, porque lo utilizan y, además de beneficiarse de sus servicios, cumplen el rol de afectados (por ejemplo, los productores agrícolas). Según las prácticas de manejo y el uso del suelo que realicen estos afectados, se verán favorecidos procesos de degradación del capital natural o procesos de soporte de servicios ecosistémicos. Por otro lado, se encuentran otros actores sociales, por ejemplo la población urbana, que se benefician de los servicios ecosistémicos pero no tienen capacidad para afectar directamente el capital natural y los servicios derivados.

Figura 1. Relaciones entre el suelo (capital natural), las funciones ecosistémicas, los servicios ecosistémicos y los actores sociales



Las cajas verdes corresponden a cuestiones biofísicas, las naranjas a las sociales y las violetas a la interfaz entre lo biofísico y lo social.

Fuente: Adaptado de Haines-Young y Potschin (2010) y de Dominati et al. (2010).

Manejar la cobertura y el balance de carbono en los sistemas agrícola-ganaderos es fundamental para favorecer procesos de soporte de servicios ecosistémicos y desalentar los de degradación. Al manejar estos aspectos se actúa directamente sobre el principal indicador de “salud” del suelo: la materia orgánica (MO). Cuando los contenidos de materia orgánica del suelo (MOS) son los adecuados –es decir, cuando se encuentran por encima de un nivel mínimo–, la mayoría de las propiedades y los procesos necesarios para lograr un buen funcionamiento del suelo se ven favorecidos. Por otra parte, la MOS almacena grandes cantidades de carbono (de hecho, es el principal reservorio de carbono terrestre), por lo tanto, sus variaciones a escala global tienen una enorme potencialidad para emitir o secuestrar dióxido de carbono (CO₂), el principal gas de efecto invernadero.

¿Qué es la materia orgánica del suelo?

La MOS se forma a partir de la descomposición de los restos vegetales muertos y del recambio de raíces y la producción de exudados (rizodeposición) que aportan las plantas vivas. Durante mucho tiempo se sostuvo la teoría de que la persistencia de la MOS estaba determinada por la síntesis de sustancias húmicas de alta estabilidad, cuya formación dependía de los tejidos vegetales más recalcitrantes (con alta lignina y relación carbono/nitrógeno). Sin embargo, esta idea cambió sustancialmente gracias a los avances tecnológicos que permitieron realizar observaciones *in situ* (mediante la espectroscopia por resonancia magnética) y estimar con mayor fiabilidad los flujos de formación y mineralización de diferentes fracciones de la MOS (por medio del uso de isótopos y técnicas de fraccionamiento físico). La conclusión derivada de estas nuevas aproximaciones es que el suelo no presenta moléculas de humus que permanecen en él debido a su complejidad molecular, sino que la MOS está integrada principalmente por moléculas simples. Esto sugiere que

las sustancias complejas de humus observadas en laboratorio son un producto artificial que se sintetiza durante la extracción del suelo, pero que no ocurre en la naturaleza.

Ahora, si la MOS se encuentra formada principalmente por moléculas simples y si el suelo contiene una enorme cantidad y diversidad de microorganismos, ¿por qué la MOS no es consumida por ellos? ¿Cómo es posible que permanezca durante miles de años? La respuesta a estas preguntas parece encontrarse en la existencia de una interacción entre la fracción orgánica y la matriz mineral del suelo, a partir de la cual se generan los “mecanismos de protección”, que serían responsables de que la MOS permanezca y se acumule.

Una estrategia que resultó muy efectiva para abordar la complejidad de la MOS fue su separación física en dos fracciones que demostraron ser muy distintas en cuanto a su composición, funcionamiento y tiempo de permanencia en el suelo. Estas fracciones son la MOS particulada (MOP) y la MOS asociada a los minerales (MOAM); ambas se distinguen por el tamaño de la partícula. La MOP es la fracción de mayor tamaño ($> 53\mu\text{m}$) y contiene residuos parcialmente descompuestos. Puede permanecer por décadas en el suelo si presenta compuestos recalcitrantes ricos en lignina y con una alta relación carbono/nitrógeno (MOP “protegida” por su composición química), o si se encuentra ocluida dentro de macroagregados, donde la actividad de la biota del suelo puede ser reducida (MOP “protegida” por su ubicación). En cambio, el tamaño de la partícula MOAM es menor a $53\mu\text{m}$ y está compuesta por moléculas simples de bajo peso, por lo general ricas en nitrógeno. Es el caso de los productos derivados de los microorganismos y exudados radicales. Esta fracción está compuesta por sustancias lábiles que, paradójicamente, pueden permanecer durante siglos dentro el suelo. Esto se debe a que dichas sustancias se encuentran ocluidas dentro

de microagregados -donde el acceso de los microorganismos está más restringido aún que dentro de los macroagregados (MOAM "protegida" por su ubicación)- adsorbidas a las arcillas del suelo ("protegida" por enlaces físicos) o formando compuestos órgano-minerales con diferentes metales ("protegida" por enlaces químicos).

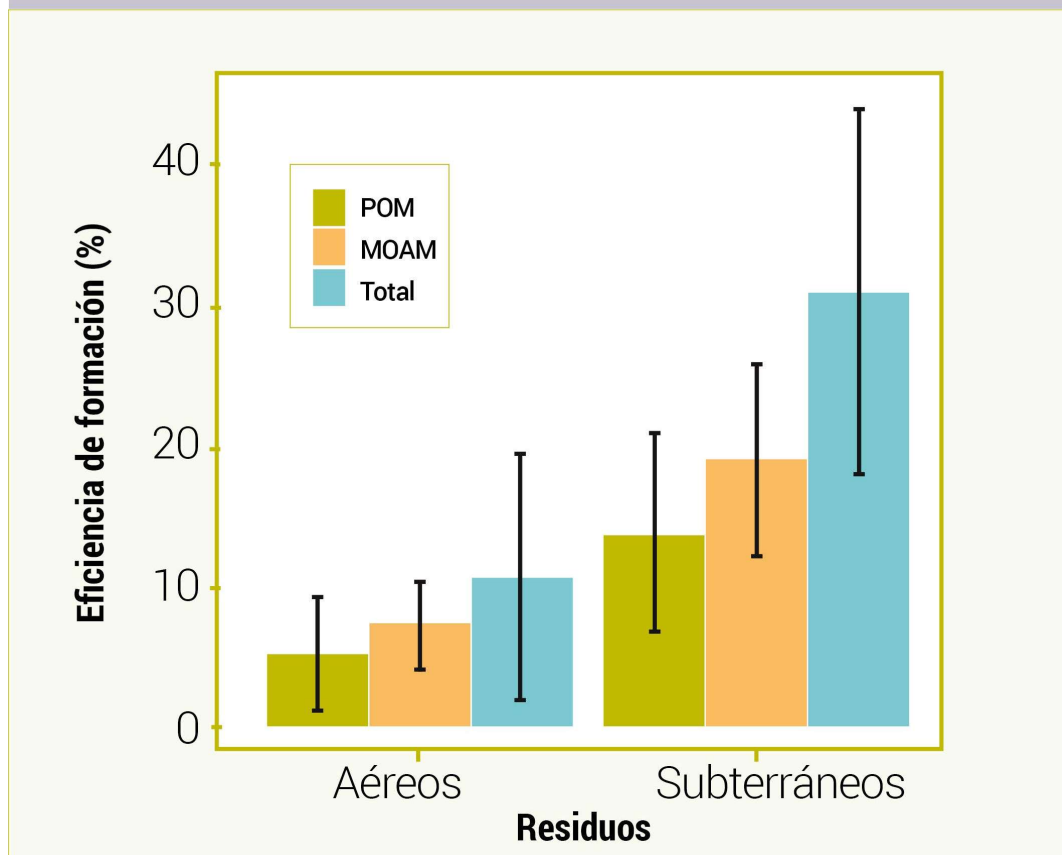
Es decir que la prolongada permanencia de esta fracción en el suelo se debe a estos tres mecanismos que la protegen de la descomposición microbiana y no a la recalcitrancia de sus compuestos, tal como sostenía la teoría del humus. Sin embargo, estos mecanismos tienen una capacidad de protección limitada que establece un límite máximo de formación de MOAM, conocido como *nivel de saturación*. Superada esa frontera, las sustancias simples que le dan origen se encuentran desprotegidas, por lo tanto, los microorganismos pueden descomponerlas muy rápidamente.

Por otra parte, el uso de isótopos permitió marcar los residuos vegetales y conectar el proceso de su descomposición con el de la formación de MOS. Tradicionalmente, se sostenía que los residuos vegetales recalcitrantes, de lenta descomposición, eran los que más contribuían a la formación de MOS. Sin embargo, la posibilidad de estimar cuánto del carbono de los residuos termina finalmente conformando MOS (eficiencia de formación) permitió destacar el rol que cumplen los compuestos más lábiles en la formación de MOAM. Si seguimos en el tiempo lo que ocurre con la descomposición de residuos vegetales, se pueden diferenciar dos etapas contrastantes que contribuyen a la formación de las fracciones MOP y MOAM. En la primera etapa de descomposición, los residuos pierden los compuestos más lábiles, no estructurales y ricos en nitrógeno, que son incorporados rápidamente a la biomasa microbiana, por lo tanto, presentan una alta eficiencia de formación de MOAM. La descomposición de los compuestos estructurales ocurre en la etapa final, cuando

aquellos que son ricos en lignina, y presentan una descomposición más lenta, contribuyen principalmente a la formación de MOP. Finalmente, como la MOAM representa una mayor proporción de la MOS total y se encuentra más protegida de la descomposición que la MOP, los residuos que se descomponen rápidamente contribuyen mucho más a la formación de MOS de lo que se pensaba antiguamente.

Las diferentes vías por las que se forman las fracciones MOP y MOAM también determinan que los residuos subterráneos sean tres veces más eficientes que los aéreos (gráfico 1). Con respecto a la MOP, la eficiencia de formación de los residuos aéreos (hojas y tallos) es de 5%, mientras que la de los subterráneos (raíces y rizodeposición, exudados radicales y reciclado de raíces pequeñas) es de 15% (gráfico 1).

Gráfico 1. Eficiencia de formación de MOAM y de MOP a partir de residuos vegetales aéreos y subterráneos en experimentos realizados con plantas vivas a nivel global



Fuente: Adaptado de Villarino et al., 2019^a.

Esta diferencia podría explicarse porque las raíces contienen mayores contenidos de compuestos recalcitrantes que los residuos aéreos. Por otro lado, las raíces crecen dentro de los agregados, mientras que los residuos permanecen protegidos en su interior (protección por ubicación). Adicionalmente, la eficiencia de formación de MOAM es de 8% para los residuos aéreos y de 20% para los subterráneos. La diferencia en esta fracción se explica principalmente por la rizodeposición, que se incluye dentro de los residuos subterráneos. Las raíces vivas, en activo crecimiento, producen exudados ricos en sustancias simples que promueven el crecimiento y el reciclado de microorganismos. Éstos se multiplican y mueren: así, junto con las sustancias simples excretadas por las raíces, generan un aporte fundamental para la formación de MOAM. Por lo tanto, la existencia de raíces vivas en el suelo resulta clave para la formación de MOS estable, la MOAM.

Funciones de la MOP y la MOAM

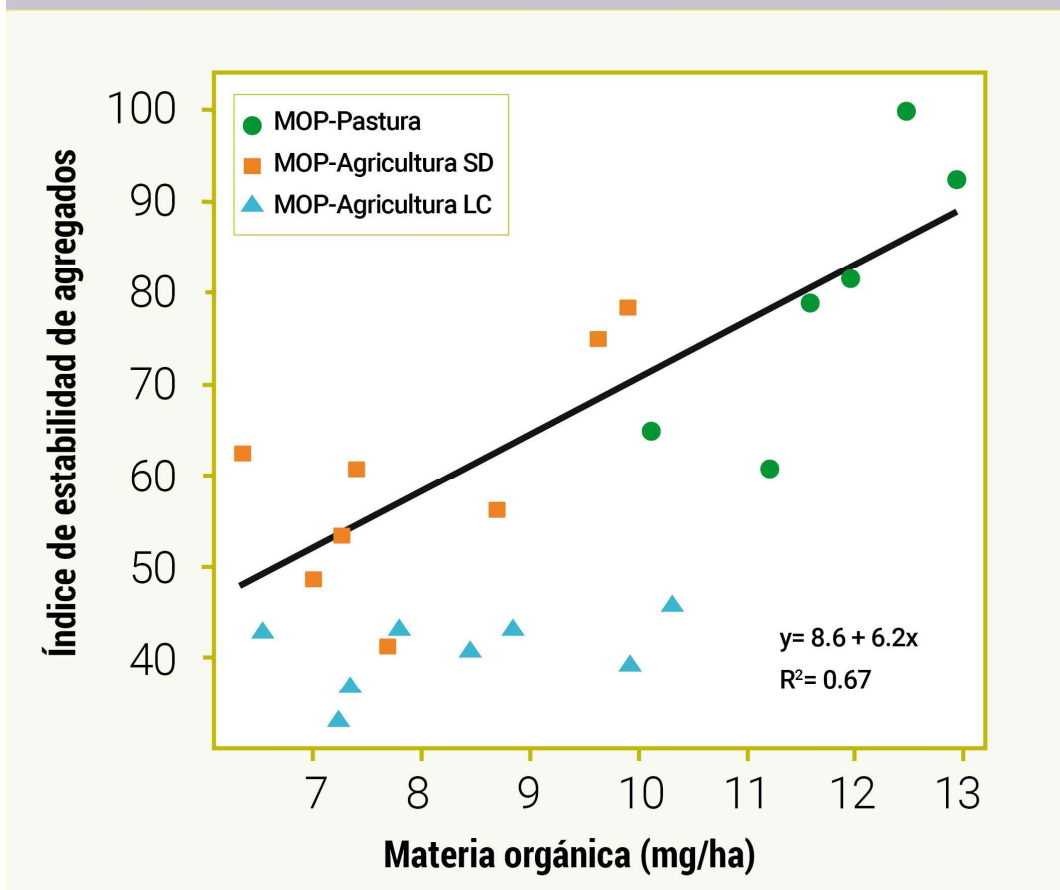
Las fracciones MOP y MOAM se diferencian por sus vías de formación y por su tiempo de permanencia en el suelo, pero también porque cumplen distintas funciones que dan soporte a servicios ecosistémicos (figura 1).

La formación y el reciclaje de agregados están directamente relacionados con la dinámica de la MOP. Al incorporar residuos vegetales al suelo se incrementa el crecimiento de hongos y microorganismos, igual que la producción de mucílagos, que promueven la formación de macroagregados alrededor de la MOP. Cuando el suelo es sometido a un disturbio, como ocurre con la labranza, los agregados se rompen y la MOP que se encontraba protegida dentro de ellos queda expuesta al consumo por parte de los microorganismos. En ensayos realizados en el sudeste bonaerense se observó que la estabilidad de agregados se relaciona positivamente con los contenidos de MOP en situaciones de bajos disturbios, como son las pasturas o la agricultura en

siembra directa (gráfico 2a). Sin embargo, en agricultura con labranza convencional no se encontró relación entre la estabilidad de agregados y la MOP; tampoco se encontró relación entre ésta y la MOAM en ninguna situación.

Otra función sumamente importante de la MOS es la provisión de nutrientes para el crecimiento vegetal. Esto ocurre cuando se descompone, proceso comúnmente conocido como *mineralización*. El nitrógeno es el macronutriente más demandado por los vegetales, por lo tanto, cuantificar la capacidad de la MOS para proveerlo es un desafío histórico de la investigación en fertilidad de suelos. El amonio liberado durante una incubación

Gráfico 2. a) Relación entre la estabilidad de los agregados y el contenido de MOP en un molisol de Balcarce con pasturas, agricultura en siembra directa y agricultura en labranza convencional

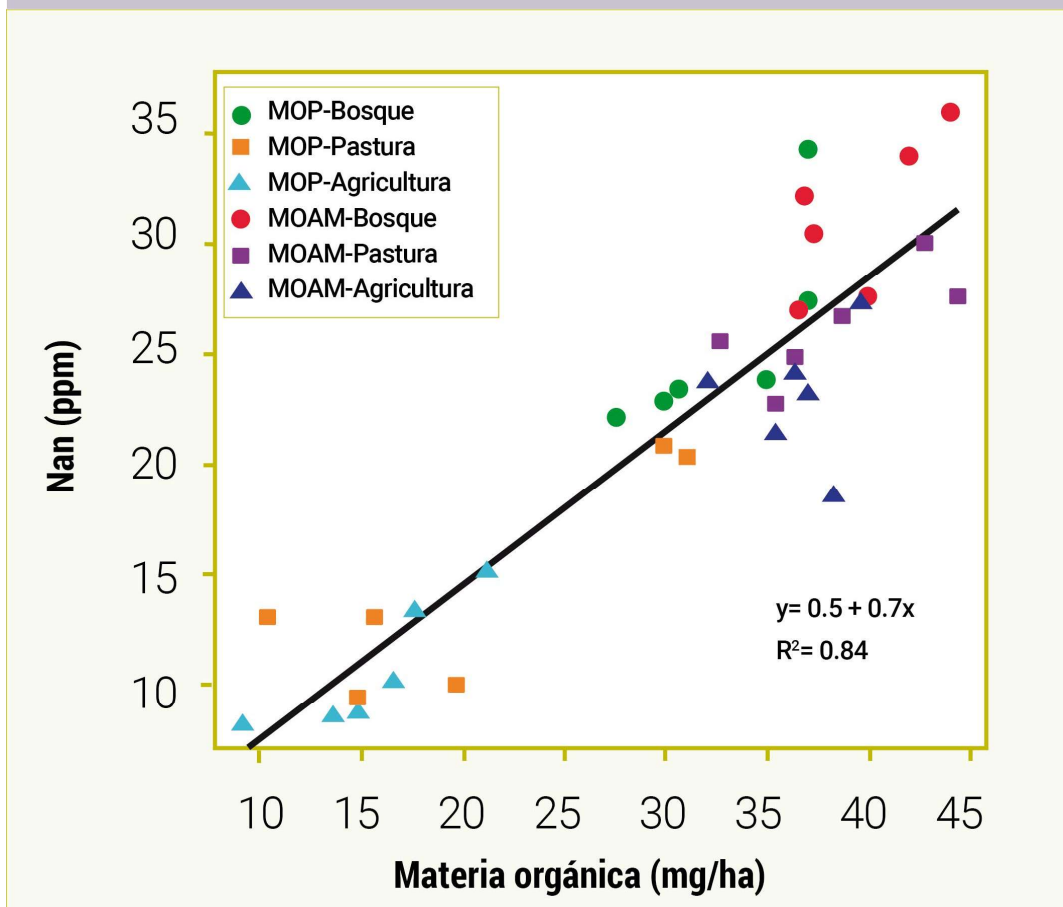


La profundidad de suelo es 0-20 cm. en todas las situaciones.
Fuente: Adaptado de Colombani, 2004, y Eiza, 2006.

anaeróbica corta (Nan) demostró ser un indicador preciso del nitrógeno potencialmente mineralizable. Como se mencionó anteriormente, la tasa de reciclado de la MOP es mucho mayor que la de la MOAM. Se ha observado que el Nan se relaciona positivamente con la MOS, y que esta relación es aún más estrecha con la MOP.

Debido a que la MOAM es la fracción más estable y de mayor tamaño, es difícil detectar cambios en sus contenidos y relacionarlos con funciones del suelo. No obstante, se ha demostrado que no es una fracción inerte; parte de ella se encuentra en continua formación y mineralización. Por lo tanto,

Gráfico 2. b) Relación entre el nitrógeno liberado durante una incubación anaeróbica corta (Nan) de la MOP y la MOAM, y contenidos de MOP y MOAM en suelos del Chaco Semiárido con pastura, bosque y agricultura



Fuente: Adaptado de Talab et al. [2019]).

es esperable que al mineralizarse libere nitrógeno al suelo, en particular, si se tiene en cuenta que representa una alta proporción de la MOS total y que la relación carbono/nitrógeno de la MOAM (por lo general de entre 8 y 13) es más baja que en el caso de la MOP (comúnmente, entre 10 y 40). Mediante la estimación del Nan en cada fracción de la MOS se observó una elevada contribución de la MOAM, incluso mayor a la de la MOP, particularmente en suelos agrícolas (gráfico 2b). Este resultado nos advierte que ciertos conocimientos no son alcanzables a través de la simple observación de los contenidos de materia, también es necesario entender cómo son los flujos que determinan dichos contenidos.

Cambios en la cobertura y en el balance de carbono

El reemplazo de la cobertura natural por cultivos anuales implica grandes cambios en el balance de carbono del suelo. En esta transformación, los aportes de residuos vegetales se modifican en cantidad, calidad, estacionalidad y en la partición entre residuos aéreos y subterráneos.

Mientras que los ecosistemas naturales presentan una elevada diversidad y aportan residuos aéreos de diferentes calidades a lo largo del año, los cultivos anuales concentran el aporte de residuos de una determinada calidad al final del ciclo. A su vez, la producción de biomasa subterránea de los cultivos es menor de la que presentan las especies de los ecosistemas naturales.

En general, la domesticación de las especies condujo a una disminución en la partición de asimilados hacia las raíces. Esto tuvo consecuencias negativas en los contenidos de MOS, debido a la mayor eficiencia de formación que presentan los residuos subterráneos respecto de los aéreos (gráfico 1). Por un lado, los menores aportes de biomasa radical

permiten explicar los menores contenidos de MOP respecto de los ecosistemas naturales. Por otro, la rizodeposición se encuentra limitada al período de crecimiento de los cultivos, mientras que en los ecosistemas naturales está presente durante todo el año, contribuyendo en gran medida a la formación de MOAM. Estos factores nos ayudan a entender por qué ha sido ampliamente documentado que el reemplazo de cobertura natural por cultivos reduce los contenidos de MOS.

La expansión agrícola en la Argentina comenzó a ser un factor importante en la transformación del paisaje a fines de la década del 60, con foco principal en la región pampeana, pero también con epicentro en el chaco subhúmedo y semiárido. La región pampeana es una extensa llanura de aproximadamente 50 millones de hectáreas donde las condiciones edáficas y climáticas proporcionan un ambiente adecuado para el crecimiento de pastizales (naturales e implantados) y de cultivos anuales; por lo tanto, se transformó en la principal zona de producción agrícola del país. Una forma de evaluar el deterioro del suelo que provocan las prácticas agrícolas es mediante su comparación con los ecosistemas naturales. La región pampeana fue perdiendo MOS conforme se expandían las tierras de cultivo sobre los pastizales naturales (figura 2). Durante la primera etapa (1960), las pérdidas promedio de MOS respecto de la condición nativa fueron relativamente bajas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las pérdidas promedio integran los cambios en las tierras transformadas a cultivos y pasturas y la proporción del área transformada dentro de cada departamento. Si consideramos únicamente las tierras de cultivos, las mayores pérdidas ocurrieron durante la primera etapa (alrededor del 30% respecto de la condición nativa), algo que podría deberse a que la agricultura se realizaba bajo el sistema de labranza convencional y a que los rendimientos de los cultivos eran bajos, produciendo pocos aportes de residuos al suelo. Dado que el disturbio ocasionado por la labranza rompe los meso y macroagregados del

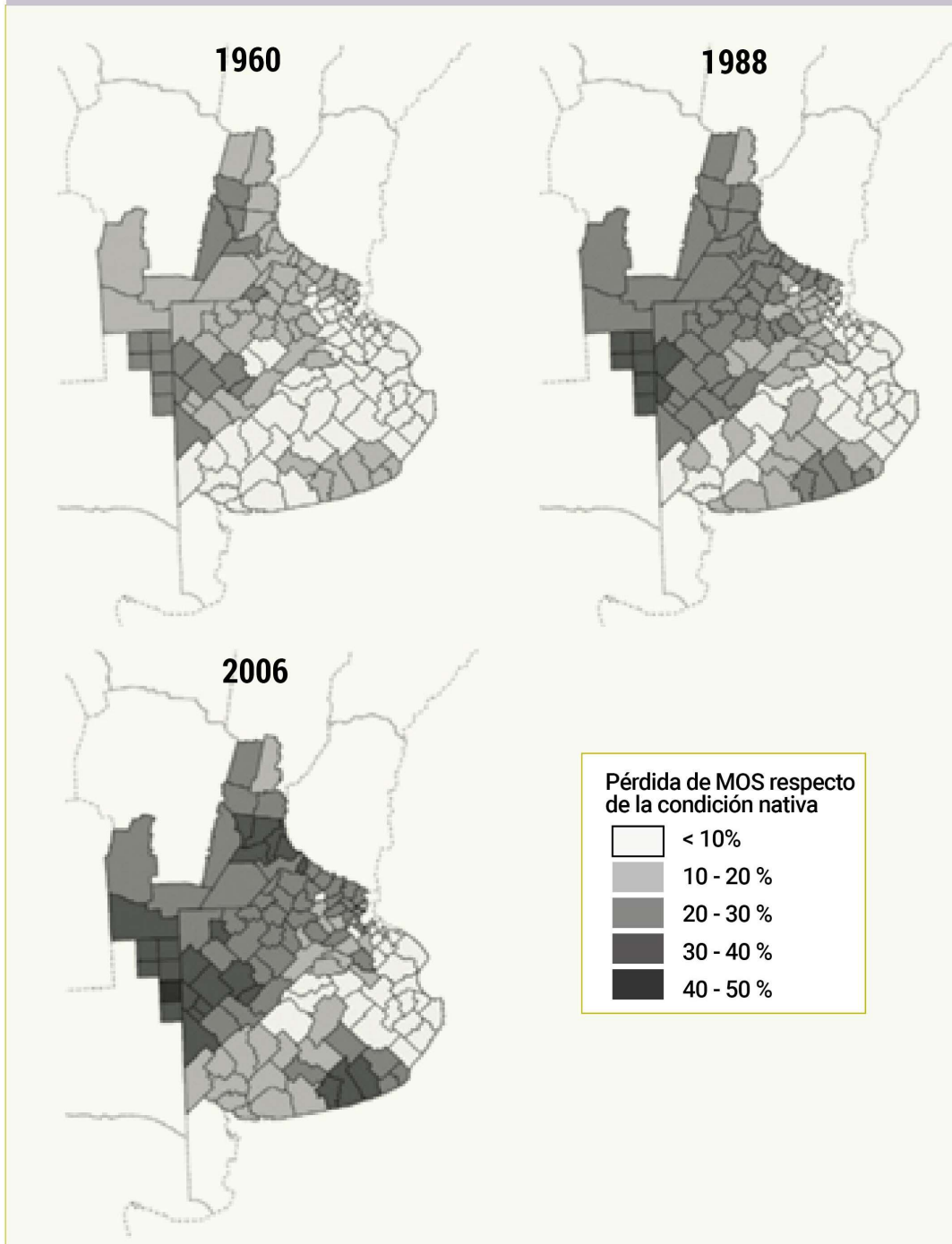
suelo, la MOS se vuelve más susceptible a la descomposición, principalmente en el caso de la MOP cuya protección depende exclusivamente de la oclusión dentro de los agregados.

Hasta 1988, la región pampeana se encontraba en una fase de expansión agrícola: a partir de allí entró en una fase de intensificación traccionada por grandes cambios tecnológicos, como el mejoramiento genético de las especies cultivadas, el aumento en el uso de fertilizantes, mejoras en la maquinaria agrícola, la introducción de soja transgénica tolerante al glifosato (*Glycine max* (L.) Merr.) y la adopción del sistema de siembra directa. Una de las consecuencias de estos cambios fue el desplazamiento de la frontera agrícola desde la región pampeana hacia el norte de la Argentina, principalmente hacia el chaco semiárido. Si bien este proceso tuvo múltiples causas (económicas, sociales y ambientales), el cultivo de soja, sumado al sistema de siembra directa fue, sin dudas, un factor de suma importancia. Los contenidos de MOS en esta región son bajos, incluso en la condición nativa (el bosque), pero son sumamente importantes para que el suelo mantenga su capacidad de proveer servicios ecosistémicos. El reemplazo de bosque por cultivos redujo los contenidos de MOS a niveles preocupantes, por debajo de los umbrales críticos. El avance de la agricultura en regiones con alta fragilidad ambiental, como es el caso del chaco semiárido, no sólo puede producir sistemas agrícola-ganaderos poco sostenibles, sino que también puede generar procesos de degradación ambiental a escala de paisaje, como las tormentas de polvo ocurridas en regiones semiáridas.

Dentro de la región pampeana, el proceso de intensificación agrícola produjo tres grandes cambios en los sistemas de producción que afectaron el balance de carbono del suelo, dos de ellos en forma positiva y uno en forma negativa. Los positivos fueron el aumento en los rendimientos por hectárea de los cultivos de granos, mejorando los aportes de resi-

duos al suelo, y la adopción del sistema de siembra directa. La disminución de disturbios en la siembra directa permitió aumentar la protección de la MOS y, en algunas situaciones,

Figura 2. Pérdidas de MOS expresadas como porcentaje de su contenido en la condición nativa (pastizales naturales), en la región pampeana y en tres años diferentes (1960, 1988 y 2006).



Fuente: Adaptado de Villarino et al. (2014).

restaurar parte de las reservas que se habían perdido con la labranza. Además, tuvo un efecto importante en la reducción de pérdidas de suelo provocadas por la erosión. Sin embargo, entre 1988 y 2006 las pérdidas aumentaron (figura 2). Una parte de estas pérdidas podría explicarse porque, incluso a tasas mucho menores que durante la primera etapa, los cultivos continuaron avanzando sobre las pocas áreas naturales remanentes. Otra parte se debe a un cambio que tuvo un efecto negativo sobre el balance de carbono: la disminución de rotaciones mixtas (ganadero-agrícolas), acompañada por el desplazamiento de la actividad ganadera hacia zonas marginales o su transformación en sistemas de engorde intensivo a corral (conocido como *feed lot*). Las pasturas perennes presentes en las rotaciones mixtas desempeñan un rol fundamental en el balance de carbono, permitiendo que el sistema tenga períodos donde se favorece la acumulación de MOS. Por lo tanto, la segregación de cultivos y pasturas tuvo un impacto negativo sobre el balance de carbono.

Desde hace algunos años se sostiene que la intensificación ecológica de la agricultura es el camino para aumentar los niveles de MOS. La siembra de cultivos durante los períodos de barbecho permitiría lograr que los aportes por rizodeposición ocurran a lo largo de todo el año, como en los ecosistemas naturales. Además, si el objetivo de estos cultivos no es la cosecha, las especies a sembrar podrían contar con una domesticación distinta a favor de la producción subterránea. Finalmente, la siembra de mezclas de especies durante los períodos de barbecho permitiría contar con mayor diversidad en la calidad de los aportes.

Bibliografía

Berg, B., McClaugherty, C. "Decomposition, humus formation, carbon sequestration". *Plant litter*. 2nd ed. Berlin Heidelberg: Springer. 2008.

Cotrufo, M.F., Soong, J.L., Horton, A.J., Campbell, E.E., Haddix, M.L., Wall, D.H., Parton, W.J., "Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss". *Nature Geoscience* 8, 776. 2015.

Colombani, E. *Evaluación de propiedades físicas de suelos del sudeste bonaerense bajo distintos manejos*. Trabajo de graduación de la carrera de Ingeniería Agronómica, FCA, UNMdP. 2004.

Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A. "A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils". *Ecological Economics* 69, 1858-1868. 2010.

Domínguez, G., García, G., Studdert, G., Agostini, M., Tourn, S., Domingo, M. "Is anaerobic mineralizable nitrogen suitable as a soil quality/health indicator?" *Spanish Journal of Soil Science* 6, 82-97. 2016.

Echeverría, H., San Martín, N., Bergonzi, R. "Métodos rápidos de estimación del nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos". *Ciencia del Suelo* 18, 9-16. 2000.

Eiza, M.J. *Dinámica de la materia orgánica particulada bajo distintas rotaciones y sistemas de labranza*. Tesis de Magister Scientiae en Producción Vegetal. Área de Posgrado en Producción Vegetal, FCA, UNdMP. 2005.

Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P. "Defining and classifying ecosystem services for decision making". *Ecological economics* 68, 643-653. 2009.

Gasparri, N.I., Grau, H., Angonese, J.G. "Linkages between soybean and neotropical deforestation: coupling and transient decoupling dynamics in a multi-decadal analysis". *Global Environmental Change* 23, 1605-1614. 2013.

Gasparri, N.I., Grau, H.R. "Deforestation and fragmentation of Chaco dry forest in NW Argentina" (1972–2007). *Forest ecology and Management* 258, 913-921. 2009.

Guo, L.B., Gifford, R. "Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis". *Global change biology* 8, 345-360. 2002.

Haines-Young, R., Potschin, M. "The links between biodiversity, ecosystem services and human well-being". In: Raffaelli, D.G., Frid, C. (Eds.), *Ecosystem Ecology: a new synthesis*. Cambridge University Press Cambridge, pp. 110-139. 2010.

Hall, A.J., Rebella, C.M., Ghera, C.M., Culot, J.P. "Field-crop systems of the Pampas". In: Pearson, C.J. (Ed.), *Ecosystems of the World*. Elsevier, Amsterdam, pp. 413-450. 1992.

Jilling, A., Keiluweit, M., Contosta, A.R., Frey, S., Schimel, J., Schnecker, J., Smith, R.G., Tiemann, L., Grandy, A.S. "Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes". *Biogeochemistry* 139, 103-122. 2018.

Lavallee, J.M., Soong, J.L., Cotrufo, M.F. "Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century". *Global change biology*. 2019.

Manuel-Navarrete, D., Gallopín, G.C., Blanco, M., Díaz-Zorita, M., Ferraro, D.O., Herzer, H., Littera, P., Murmis, M.R., Podestá, G.P., Rabinovich, J., Satorre, E.H., Torres, F., Viglizzo, E.F. *Multi-causal and integrated assessment of sustainability: the case of agriculturization in the Argentine Pampas*. *Environment, Development and Sustainability*. 11, 621-638. 2007.

Paruelo, J.M. "Valoración de servicios ecosistémicos y planificación del uso del territorio ¿es necesario hablar de dinero?" In: Littera, P., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. (Eds.), *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial*. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, pp. 121-139. 2011.

Reboratti, C. "La Argentina rural entre la modernización y la exclusión". In: Geraiges de Lemos, A.I., Arroyo, M., Silveira, M. (Eds.), *América Latina: cidade, campo e turismo*, San Pablo, Brasil, pp. 175-187. 2006.

Reussi Calvo, N.I., Studdert, G.A., Calandroni, M.B., Diovisalvi, N.V., Cabria, F.N., Berardo, A. "Nitrógeno incubado en anaerobiosis y carbono orgánico en suelos agrícolas de Buenos Aires". *Ciencia del suelo* 32, 189-196. 2014.

Schmidt, M.W., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kogel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E. "Persistence of soil organic matter as an ecosystem property". *Nature* 478, 49-56. 2011.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K. "A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics". *Soil and Tillage Research* 79, 7-31. 2004.

Smith, P., House, J.I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Clark, J.M., Adhya, T., Rumpel, C. "Global change pressures on soils from land use and management". *Global change biology* 22, 1008-1028. 2016.

Studdert, G.A., Echeverría, H.E., Casanovas, E.M. "Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll". *Soil Science Society of America Journal* 61, 1466-1472. 1997.

Talab, E., Villarino, S.H., Di Gerónimo, P.F., Videla, C., Piñeiro, G. "¿Qué fracción de la materia orgánica del suelo aporta el nitrógeno para los cultivos, la fracción particulada o la fracción asociada a los minerales?", *XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, del 7 al 11 de octubre de 2019, Montevideo, Uruguay. 2019.

Viglizzo, E.F., Frank, F.C. "Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century". *Quaternary International* 158, 122-126. 2006.

Viglizzo, E.F., Lértora, F., Pordomingo, A.J., Bernardosc, J.N., Robertoa, Z.E., Del Valle, H. "Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina". *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83, 65-81. 2001.

Villarino, S.H., Pinto, P., Piñeiro, G. "Raíces para formar materia orgánica particulada y rizodeposición para formar materia orgánica asociada a los minerales". *XXII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, del 7 al 11 de octubre de 2019, Montevideo, Uruguay. 2019a.

Villarino, S.H., Studdert, G.A., Láttera, P. "How does soil organic carbon mediate trade-offs between ecosystem services and agricultural production?" *Ecological Indicators* 103, 280-288. 2019b.

Villarino, S.H., Studdert, G.A., Láttera, P., Cendoya, M.G. "Agricultural impact on soil organic carbon content: Testing the IPCC carbon accounting method for evaluations at county scale". *Agriculture, Ecosystems & Environment* 185, 118-132. 2014.

Waring, S., Bremner, J. "Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability". *Nature* 201, 951-952. 1964.

Young, I.M., Crawford, J.W. "Interactions and self-organization in the soil-microbe complex". *Science* 304, 1634-1637. 2004.