

Suelos y los servicios ecosistémicos

Soils and ecosystem services

Elke Noellemeyer^{1,2}

¹Profesora de la Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam), Santa Rosa, Argentina.

²Investigadora Asociada. Proyecto BEISA 3, Instituto de Agroecología y Seguridad Alimentaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Casilla postal 1046, Calle Calvo N° 132, Sucre- Bolivia. enoellemeyer@gmail.com

La materia orgánica del suelo, y en particular el elemento más abundante en ella, el Carbono (C), son los que movilizan la mayoría de los procesos biológicos, físicos y químicos que ocurren en el suelo.

El manejo de la materia orgánica del suelo (MOS) se ha centrado tradicionalmente en la mejora de la productividad de los cultivos. Por lo tanto, MOS se ha considerado principalmente como una fuente de nutrientes para las plantas, y las prácticas agrícolas fueron desarrolladas con la premisa de extraer más fácilmente los nutrientes vegetales durante la fase de cultivo y para reponer las reservas de nutrientes durante la fase de no-cultivo de la rotación (Whitbread et al. 2000). La rotación de cultivos de cosecha y barbechos a base de pasturas perennes confiere estabilidad al sistema del suelo y era un sistema de producción agrícola sostenible hasta la llegada de los fertilizantes inorgánicos, herbicidas, el mejoramiento genético de cultivos de alto rendimiento y la innovación tecnológica de la labranza mecanizada, que en su conjunto constituyó la llamada “revolución verde”. Estos cambios globales provocaron una mejora sustancial en la producción de alimentos pero también producen un desacoplamiento de los procesos biológicos con las concentraciones de los nutrientes esenciales en el suelo (Tonitto et al. 2006). La disponibilidad de fuentes de nitrógeno sintético de bajo costo y herbicidas eficientes ha promovido esta tendencia, y permitió a vastas áreas de las tierras más productivas del mundo para ser cultivadas con un tipo de cultivo durante períodos prolongados (Tilman et al. 2002). El problema inherente asociado con este tipo de manejo de las tierras es una reducción drástica de la diversidad vegetal sobre el suelo, que también se traduce en una disminución de la actividad y la diversidad microbiana del suelo (Milcu et al. 2010), y por lo tanto en una pérdida de las funciones vitales del suelo (Nielsen et al. 2011). La producción de

biomasa, la protección de los seres humanos y el medio ambiente, reservorio de genes, base física de las actividades humanas, el origen de las materias primas, y el patrimonio geogénica y cultural se han identificado como principales funciones del suelo (Blum 2005). Los suelos son organismos vivos y sus múltiples funciones ecosistémicas están íntimamente relacionados con las transformaciones y la dinámica de la MOS, que están mediadas por la actividad biótica del suelo y la dinámica estructural del suelo (Six et al. 2002). Por lo tanto, el manejo del suelo para múltiples servicios ecosistémicos tiene que centrarse en el vínculo entre la MOS, la estructura del suelo y la biota del suelo y los factores que regulan de este enlace (Six et al. 2004, Wardle et al. 2004).

Recientemente, se ha producido un fuerte enfoque en la MOS como reservorio de C y un mecanismo de secuestro de C y la protección del cambio climático (Lal 2004, Powlson et al. 2011), pero mucho menos atención fue dada a la gestión de los servicios de regulación, los culturales y los de apoyo. La importancia del carbono del suelo en relación a abordar apremiantes problemas mundiales a través de la provisión de diversos servicios ecosistémicos ha sido reconocido por los responsables políticos hasta hace tiempos muy recientes (Victoria et al. 2012).

El capital natural del suelo y servicios ecosistémicos relacionados

El término “*capital natural*” fue diseminado por Robert Costanza (Costanza et al. 1997), que define el capital natural como “*la extensión de la noción económica del capital (medios de producción fabricados) a los bienes y servicios ambientales. Una definición funcional de capital en general es: una acción que produce un flujo de bienes o servicios valiosos en el futuro. El capital natural es, pues, la*

acción de los ecosistemas naturales que produce un flujo de bienes y servicios de los ecosistemas valiosos en el futuro. Por ejemplo, una reserva de árboles o peces proporciona un flujo de nuevos árboles o peces, un flujo que puede mantenerse indefinidamente. El capital natural también puede proporcionar servicios como los desechos de reciclaje o de captura de agua y control de la erosión. Dado que el flujo de servicios de los ecosistemas requiere que funcionen los sistemas en su conjunto, la estructura y diversidad del sistema son componentes importantes de capital natural. “ (Http://www.eoearth.org/article/Natural_capital, consultado sobre 22/01 / 2013).

Sólo recientemente, estos conceptos han sido aplicado a los suelos (Dominati et al. 2010, Robinson et al. 2012), a pesar de la importancia obvia del capital natural y de los servicios ecosistémicos para la ciencia del suelo. La falta de tipología consistente o terminología para los servicios ecosistémicos

significa que las propiedades, procesos, funciones y servicios se hayan utilizado indistintamente, lo que lleva a la confusión (Robinson et al. 2012), y con frecuencia el foco sobre los bienes y servicios finales ignora la importancia de los suelos en su entrega. En un intento de clarificar los conceptos y desarrollar un marco de capital natural y servicios ecosistémicos de los suelos, Dominati y colegas (Dominati et al. 2010) definen el capital natural de los suelos a través de sus propiedades físicas inherentes, tales como profundidad, contenido y tipo de arcilla, junto con propiedades manejables tales como la disponibilidad de nutrientes, materia orgánica del suelo, pH, etc. (Fig. 1). Estas propiedades pueden cambiar bajo la influencia de los procesos naturales, tales como los procesos climáticos y geológicos, o debido a factores antropogénicos, como el uso de la tierra y la tecnología agrícola. A través del capital natural de los suelos, servicios ecosistémicos que cumplen las necesidades humanas pueden ser definidos (Fig.1).

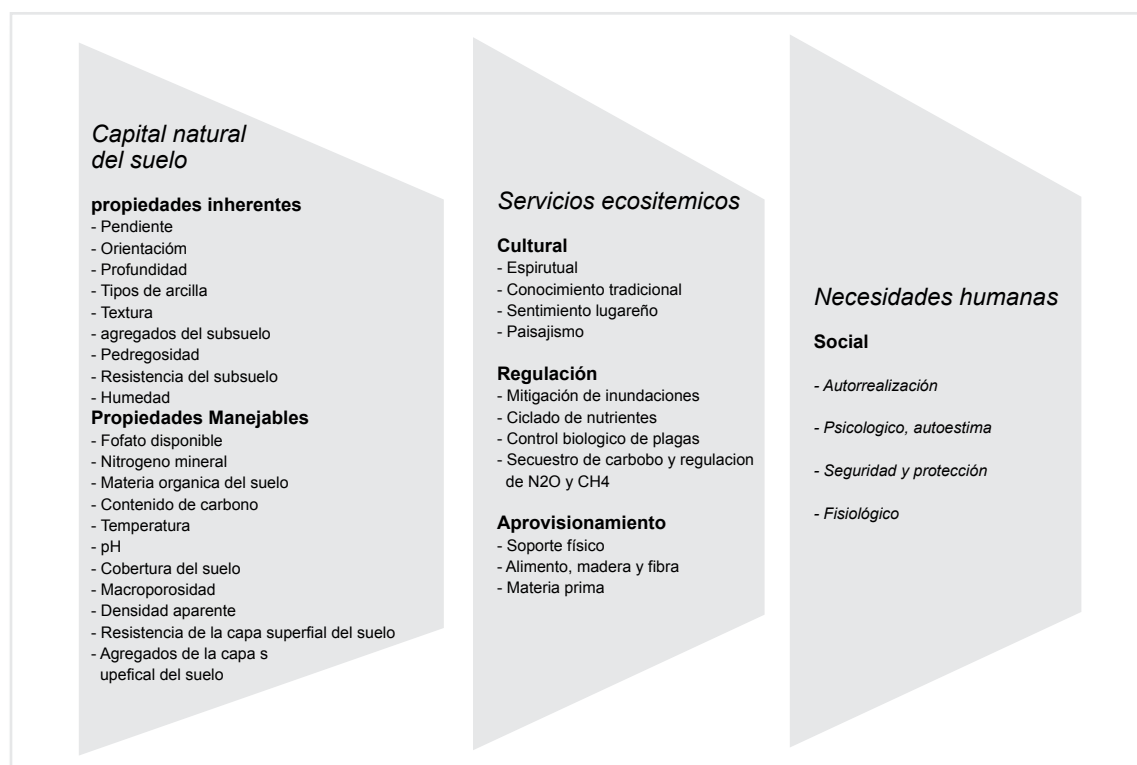


Figura 1. El capital natural del suelo, servicios ecosistémicos y necesidades humanas (Adaptado de Dominati et al. 2010)

La mayoría de las propiedades manejables de los suelos se relacionan directamente con el C del suelo. Por ejemplo, la materia orgánica del suelo contiene más de 50% de C; la disponibilidad de nitrógeno y azufre están directamente acoplados al ciclo de C (Cadisch et al. 1996); la macro porosidad, el tamaño de los agregados, la densidad aparente y otras propiedades físicas del suelo son directamente relacionadas con el C del suelo (Dexter et al. 2008, Noellemeyer et al. 2008, Urbanek et al. 2011) as it acts as physical barrier between the decomposing microorganisms and the substrates. It is, however, not fully understood how the organic carbon (C(org, Holeplass et al. 2004, Plante & McGill 2002, Scott et al. 2002, Six et al. 2004, 2002; Swinton et al. 2007) as it acts as physical barrier between the decomposing microorganisms and the substrates. It is, however, not fully understood how the organic carbon (C(org.

Servicios ecosistémicos y procesos edáficos

Independiente del tipo de servicio ecosistémico, los procesos edáficos proporcionan funciones claves para satisfacer las necesidades humanas. Estos procesos que ocurren en los suelos pueden proporcionar bienes agrícolas como alimentos o fibra, como también bienes no-agrícolas (Fig. 2).

Los servicios no-agrícolas proporcionados por los procesos edáficos son vitales para las necesidades humanas, y todos los procesos que proporcionan estos servicios están directamente relacionados con las cantidades de C del suelo y su ciclado. El manejo del suelo para sostener el abastecimiento y la calidad de agua también mejorará el control de la erosión, la composición de la atmósfera, y la regulación del clima. Todos estos servicios ecosistémicos son muy dependientes de la estructura del suelo y la dinámica de la MOS.

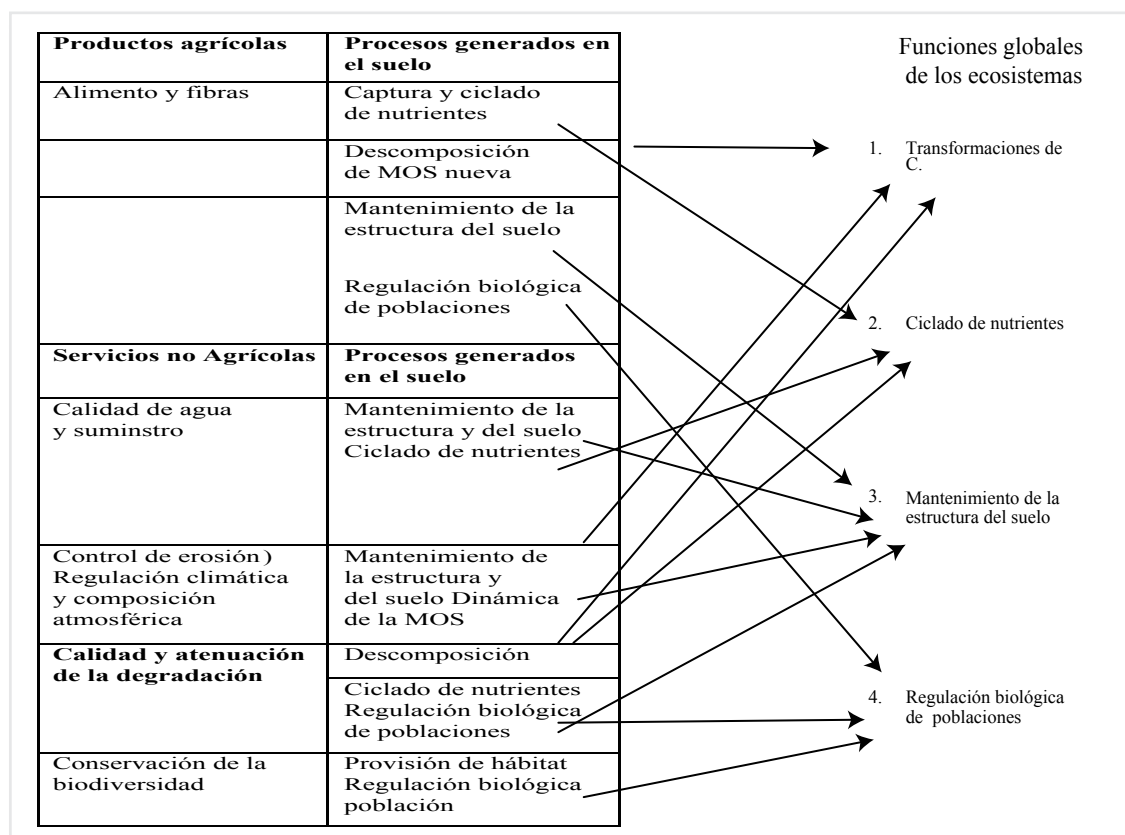


Figura 2. Servicios ecosistémicos y los procesos edáficos relacionados. (Adaptado de Pulleman et al. 2012).

Los principios básicos para el manejo del suelo que mejora la MOS y la estructura consisten en la reducción de las pérdidas de carbono a través de tasas de respiración excesivos que están asociados a las labranzas convencionales. La labranza cero es una tecnología ampliamente utilizada que produce una perturbación mínima del suelo y por lo tanto induce menos la respiración microbiana que el arado de vertedera tradicional. Esta técnica también confiere cobertura permanente de residuos al suelo, evitando exponer el suelo desnudo a los vientos o lluvias fuertes. La rotación de cultivos anuales con cultivos perennes, también contribuye a reducir las emisiones de carbono, especialmente durante la fase de pastura. Cultivos de alto rendimiento proporcionan la base para lograr buenos niveles de cobertura y residuos sobre el suelo. Sistemas de producción que eliminan una gran proporción de residuos posterior a la cosecha, como por ejemplo para la producción de biocombustibles o fardos de paja, tienen un impacto negativo sobre el

contenido de MOS (Lal 2009). La actividad biológica del suelo es fundamental para construir y mantener una buena estructura del suelo (Ayuke et al. 2011, Six and Paustian 2014). Además de los restos vegetales en la superficie del suelo, la biomasa de raíces y sus exudados constituyen una importante fuente de alimentos para los microorganismos, lombrices y otros organismos superiores, así (Kong & Six 2012, 2010).

Manejo del carbono del suelo para múltiples y específicos servicios ecosistémicos

Mantenimiento y mejora de la estructura del suelo

La estructura del suelo es el resultado de la interacción entre constituyentes minerales inorgánicos y componentes orgánicos del suelo que forman agregados estables (Elmholt et al. 2008, Niewczas 2003).

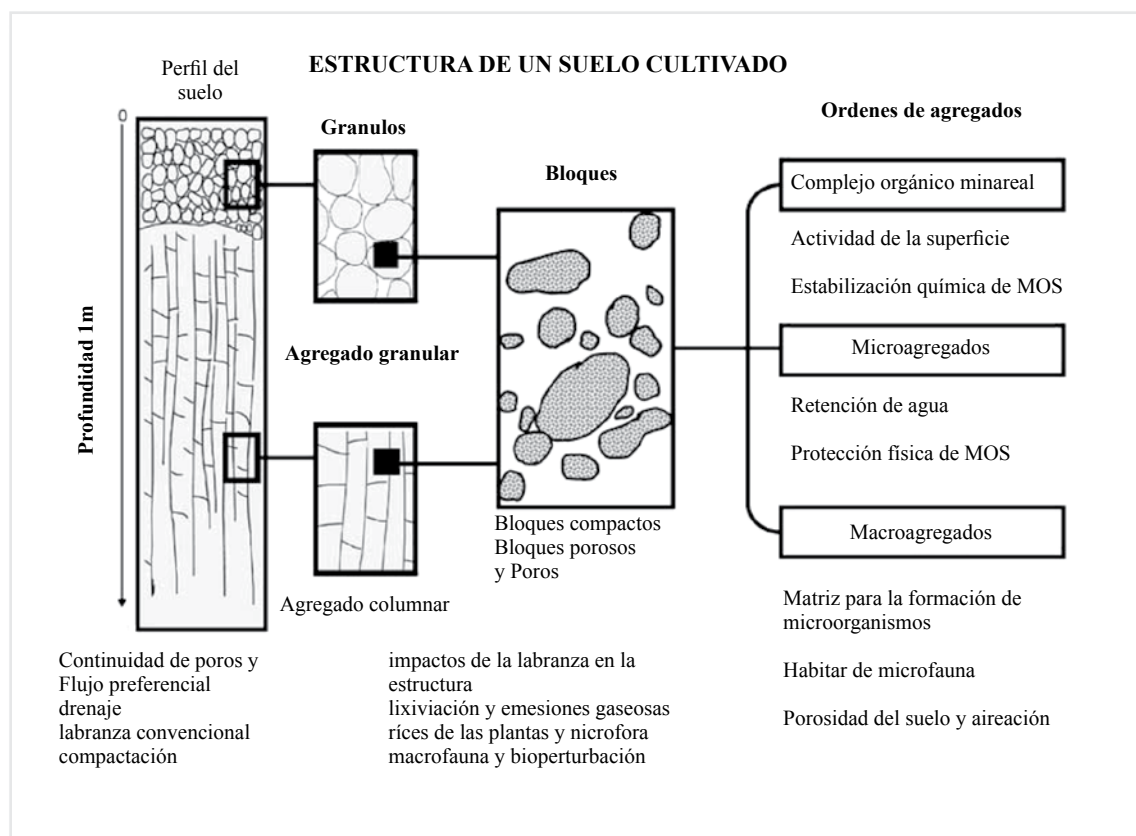


Figura 3. Jerarquía estructural del suelo en diferentes escalas de análisis, adaptado de Carter (2004).

En la mayoría de los suelos, la materia orgánica es el agente cementante más importante que contribuye a la estabilidad de los agregados, aunque en muchos suelos tropicales los iones polivalentes metálicos y alcalinos son muy importantes en el mantenimiento de la estructura (Barthes et al. 2008, Chivenge et al. 2011, Six et al. 2000). La disposición de los agregados estables define el volumen de los poros del suelo y su distribución de tamaño, que a su vez afecta a la mayoría de las propiedades del suelo relacionadas con el transporte de agua y gas (Horn & Smucker 2005). Muchos estudios han demostrado que los suelos bajo pasturas permanentes tienen mejor estructura que los suelos agrícolas que se cultivaban con frecuencia (Berhongaray et al. 2013, Noellemeyer et al. 2008, Pulleman and Marinissen 2004, Zach et al. 2006). Esta es una manera en la que rotaciones de cultivos que incluyen pasturas perennes contribuyen al mantenimiento de la estructura del suelo. La labranza cero o siembra directa (SD) también ha sido demostrada que mejora la estructura del suelo, en comparación con los sistemas de labranza tradicionales, debido a la reducción de la remoción del suelo (Fernández et al. 2010, Hollinger et al. 2005, Lal et al. 2007, López et al. 2012, Lorenz et al. 2006, Quiroga et al. 2009, Six et al. 2002, Smith & Bolton 2003, Zotarelli et al. 2005). Sin embargo, los aportes de C en un suelo es también un factor importante en la estabilización de la estructura del suelo y del C edáfico (Kong et al. 2011). Por lo tanto SD combinado con otras prácticas agrícolas que mejoran los aportes de C como el mulching y los cultivos de cobertura estabilizarán aún más la estructura del suelo y aumentarán el carbono del suelo (Alletto et al. 2011, Ding et al. 2006, Restovich et al. 2012, Rockström et al. 2009, Santos et al. 2011, Zhu et al. 2012).

Manejo del carbono del suelo para el control de la erosión

La pérdida de partículas minerales y orgánicas del suelo a través de la erosión hídrica o eólica causa una pérdida irreversible de los recursos que sustentan los servicios ecosistémicos del suelo. En algunos casos, los procesos erosivos transportan la materia orgánica y las partículas de arcilla a distancias cortas y dan lugar a una redistribución espacial de estos elementos (Li et al. 2008, Polyakov & Lal 2004), en muchos casos, sin embargo, las partículas erosionadas son transportadas a mucho mayores distancias lo cual implica su pérdida y disminución de la productividad

de la tierras (Ballantine et al. 2005). La prevención de la erosión del suelo depende en gran medida de la estabilidad de la estructura del suelo (Fattet et al. 2011) y por lo tanto se ve fuertemente afectado por la dinámica de la MOS. El contenido de materia orgánica del suelo es un factor importante para determinar la estabilidad de agregados (Cerdeira 2000; Eynard et al. 2004), y la fracción de agregados en seco de tamaño <0.84 mm se puede utilizar como un indicador de la susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica (López et al. 2007; Zobeck et al. 2003). Cuando se cambia de los sistemas de cultivo convencionales a los sistemas de labranza conservacionista o SD los procesos de erosión hídrica (Schuller et al. 2007) e eólica (Hevia et al. 2007) se reducen drásticamente. Este efecto beneficioso de la labranza conservacionista se ha relacionado con los contenidos de MOS más altos y mayor porosidad de la superficie (Kirkby et al. 2000, Rhoton and Shipitalo 2002). Otro factor que contribuye al control de la erosión es la cobertura del suelo permanente proporcionada por plantas vivas o muertas (López et al. 2003, Soane et al. 2012) o en los sistemas de vegetación naturales (Adema et al. 2004). Repetidas labranzas a una profundidad fija pueden conducir a la compactación subsuperficial del suelo y la formación de “piso de arado” (Hamza & Anderson 2005), que reducen la infiltración del agua y por lo tanto aumentan la erosión (Zink et al. 2011). Sistemas de cultivo de rotación e integradas que promueven el desarrollo radicular profundo pueden mitigar el efecto de la labranza repetida (Keller et al. 2012). En los pastizales naturales y en las pasturas implantadas, la intensidad de pastoreo es un factor desencadenante de la erosión; el sobrepastoreo promueve la erosión (Oztas 2003) mediante la compactación de la capa superficial del suelo y la reducción de los aportes de C de las hojas y de las raíces (Barto et al. 2010, Franzluebbers and Stuedemann 2008, Steffens et al. 2008).

Referencias

- Adema, E.O., D.E. Buschiazzi, F.J. Babinec, T.E. Rucci & V.F.G. Hermida. 2004. Mechanical control of shrubs in a semiarid region of Argentina and its effect on soil water content and grassland productivity. *Agric. Water Manag.* 68, 185–194. doi:10.1016/j.agwat.2004.04.001
- Alletto, L., Y. Coquet & E. Justes. 2011. Effects of tillage and fallow period management on soil physical behaviour and maize development.

- Agric. Water Manag. 102, 74–85. doi:10.1016/j.agwat.2011.10.008
- Ayuke, F.O., L. Brussaard, B. Vanlauwe, J. Six, D.K. Lelei, C.N. Kibunja & M.M. Pulleman. 2011. Soil fertility management: Impacts on soil macrofauna, soil aggregation and soil organic matter allocation. *Appl. Soil Ecol.* 48, 53–62. doi:10.1016/j.apsoil.2011.02.001
- Ballantine, J.-A.C., G.S. Okin, D.E. Prentiss & D.A. Roberts. 2005. Mapping North African landforms using continental scale unmixing of MODIS imagery. *Remote Sens. Environ.* 97, 470–483. doi:10.1016/j.rse.2005.04.023
- Barto, E.K., F. Alt, Y. Oelmann, W. Wilcke & M.C. Rillig. 2010. Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biol. Biochem.* 42, 2316–2324. doi:10.1016/j.soilbio.2010.09.008
- Blum, W.E.H. 2005. Functions of Soil for Society and the Environment. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 4, 75–79. doi:10.1007/s11157-005-2236-x
- Cadisch, G., H. Imhof, S. Urquiaga, R. Boddey & K. Giller. 1996. Carbon turnover ($\Delta^{13}\text{C}$) and nitrogen mineralization potential of particulate light soil organic matter after rainforest clearing. *Soil Biol. Biochem.* 28, 1555–1567.
- Carter, M. 2004. Researching structural complexity in agricultural soils. *Soil Tillage Res.* 79, 1–6. doi:10.1016/j.still.2004.04.001
- Cerda, A. 2000. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Plant Soil* 57, 159–166.
- Chivenge, P., B. Vanlauwe, R. Gentile & J. Six. 2011. Organic resource quality influences short-term aggregate dynamics and soil organic carbon and nitrogen accumulation. *Soil Biol. Biochem.* 43, 657–666.
- Costanza, R., R. Arge, R. Groot, S. Farberk, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V.O. Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin & P. Suttonkk. 1997. The value of the world ' s ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260.
- Dexter, A., E. Czyz, G. Richard & A. Reszkowska. 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma* 143, 243–
- Dominati, E., M. Patterson & A. Mackay, A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69, 1858–1868. doi:10.1016/j.ecolecon.2010.05.002
- Elmholt, S., P. Schjønning, L.J. Munkholm & K. Debosz. 2008. Soil management effects on aggregate stability and biological binding. *Geoderma* 144, 455–467. doi:10.1016/j.geoderma.2007.12.016
- Eynard, A., T. Schumacher, M. Lindstrom & D. Malo. 2004. Aggregate sizes and stability in cultivated South Dakota prairie Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 1360–1365.
- Fattet, M., Y. Fu, M. Ghestem, W. Ma, M. Foulonneau, J. Nespoulous, Y. Le Bissonnais, & Stokes. 2011. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena* 87, 60–69. doi:10.1016/j.catena.2011.05.006
- Fernández, R., A. Quiroga, C. Zorati & E. Noellemyer. 2010. Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. *Soil Tillage Res.* 109, 103–109. doi:10.1016/j.still.2010.05.002
- Franzluebbers, A., J. Stuedemann. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Tillage Res.* 100, 141–153. doi:10.1016/j.still.2008.05.011
- Hamza, M., W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145. doi:10.1016/j.still.2004.08.009
- Hevia, G.G., M. Mendez & D.E. Buschiazso. 2007. Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma* 140, 90–96. doi:10.1016/j.geoderma.2007.03.001
- Holeplass, H., B.R. Singh & R. Lal. 2004. Carbon sequestration in soil aggregates under different crop rotations and nitrogen fertilization in an inceptisol in southeastern Norway. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 70, 167–177.
- Hollinger, S.E., C.J. Bernacchi & T.P. Meyers. 2005. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. *Agric. For. Meteorol.* 130, 59–69. doi:10.1016/j.agrformet.2005.01.005
- Horn, R., & A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in

- unsaturated arable and forest soils. *Soil Tillage Res.* 82, 5–14. doi:10.1016/j.still.2005.01.002
- Keller, T., J. Sutter, A.K. Nissen & T. Rydberg. 2012. Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields. *Soil Tillage Res.* 124, 68–77. doi:10.1016/j.still.2012.05.002
- Kirkby, M.J., Y. Le Bissonais, T.J. Coulthard, J. Daroussin & M.D. McMahon. 2000. The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Environment* 81, 125–135.
- Kong, A.Y. & J.Six. 2012. Microbial community assimilation of cover crop rhizodeposition within soil microenvironments in alternative and conventional cropping systems. *Plant Soil* 356, 315–330. doi:10.1007/s11104-011-1120-4
- Kong, A.Y.Y., K.M. Scow, A.L. Córdova-Kreylos, W.E. Holmes & J. Six. 2011. Microbial community composition and carbon cycling within soil microenvironments of conventional, low-input, and organic cropping systems. *Soil Biol. Biochem.* 43, 20–30. doi:10.1016/j.soilbio.2010.09.005
- Kong, A.Y.Y. & J. Six. 2010. Tracing Root vs. Residue Carbon into Soils from Conventional and Alternative Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1201–1210. doi:10.2136/sssaj2009.0346
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Lal, R., D.C. Reicosky & J.D. Hanson. 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* 93, 1–12. doi:10.1016/j.still.2006.11.004
- Lal, R. 2009. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production. *Soil Tillage Res.* 102, 233–241. doi:10.1016/j.still.2008.07.003
- Li, J., G.S. Okin, L.J. Alvarez & H.E. Epstein. 2008. Sediment deposition and soil nutrient heterogeneity in two desert grassland ecosystems, southern New Mexico. *Plant Soil* 319, 67–84. doi:10.1007/s11104-008-9850-7
- López, M.V., N. Blanco-Moure & M.A. Limón, R. Gracia. 2012. No tillage in rainfed Aragon (NE Spain): Effect on organic carbon in the soil surface horizon. *Soil Tillage Res.* 118, 61–65. doi:10.1016/j.still.2011.10.012
- López, M.V., J.M. de Dios Herrero, G.G. Hevia, R. Gracia & D.E. Buschiazzi. 2007. Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma* 139, 407–411. doi:10.1016/j.geoderma.2007.03.006
- López, M.V., D. Moret, R. Gracia & J.L. Arrúe. 2003. Tillage effects on barley residue cover during fallow in semiarid Aragon. *Soil Tillage Res.* 72, 53–64. doi:10.1016/S0167-1987(03)00047-3
- Lorenz, K., R. Lal, & M.J. Shipitalo. 2006. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in no-till and meadow soils in Northern Appalachia. *Geoderma* 137, 205–211. doi:10.1016/j.geoderma.2006.08.010
- Milcu, A., E. Thebault, S. Scheu & N. Eisenhauer. 2010. Plant diversity enhances the reliability of belowground processes. *Soil Biol. Biochem.* 42, 2102–2110. doi:10.1016/j.soilbio.2010.08.005
- Nielsen, U.N., E. Ayres, D.H. Wall & R.D. Bardgett. 2011. Soil biodiversity and carbon cycling: a review and synthesis of studies examining diversity-function relationships. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 105–116. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01314.x
- Niewczas, J. 2003. Index of soil aggregates stability as linear function value of transition matrix elements. *Soil Tillage Res.* 70, 121–130. doi:10.1016/S0167-1987(02)00155-1
- Noellemeyer, E., F. Frank, C. Alvarez, G. Morazzo & A. Quiroga. 2008. Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of central Argentina. *Soil Tillage Res.* 99, 179–190. doi:10.1016/j.still.2008.02.003
- Oztas, T. 2003. Changes in vegetation and soil properties along a slope on overgrazed and eroded rangelands. *J. Arid Environ.* 55, 93–100. doi:10.1016/S0140-1963(02)00267-7
- Plante, A.F. & W.B. McGill. 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil Tillage Res.* 66, 79–92.
- Polyakov, V. & R. Lal. 2004. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. *Environ. Int.* 30, 547–556. doi:10.1016/j.envint.2003.10.011

- Powlson, D.S., A.P. Whitmore & K.W.T. Goulding. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *Eur. J. Soil Sci.* 62, 42–55. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x
- Pulleman, M., R. Creamer, U. Hamer, J. Helder, C. Pelosi, G. Pérès & M. Rutgers. 2012. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 529–538. doi:10.1016/j.cosust.2012.10.009
- Pulleman, M.M. & J.Y.C. Marinissen. 2004. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma* 120, 273–282. doi:10.1016/j.geoderma.2003.09.009
- Quiroga, A., R. Fernández & E. Noellemeyer. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. *Soil Tillage Res.* 105, 164–170. doi:10.1016/j.still.2009.07.003
- Restovich, S.B., A.E. Andriulo & S.I. Portela. 2012. Introduction of cover crops in a maize–soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *F. Crop. Res.* 128, 62–70. doi:10.1016/j.fcr.2011.12.012
- Rhoton, F. & M. Shipitalo. 2002. Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil Tillage Res.* 66, 1–11.
- Robinson, D. A., N. Hockley, D. Cooper, B. Emmett, A. M.Keith, I. Lebron, B. Reynolds, E. Tipping, a.M. Tye, C.W. Watts, W.R. Whalley, H.I.J. Black, G.P. Warren & J.S. Robinson. 2012. Natural capital and ecosystem services, developing an appropriate soils framework as a basis for valuation. *Soil Biol. Biochem.* 1–11. doi:10.1016/j.soilbio.2012.09.008
- Rockström, J., P. Kaumbutho, J. Mwalley, A.W. Nzabi, M. Temesgen, J. Mawenya, J. Barron, J. Mutua & S. Damgaard-Larsen. 2009. Conservation farming strategies in East and Southern Africa: Yields and rain water productivity from on-farm action research. *Soil Tillage Res.* 103, 23–32. doi:10.1016/j.still.2008.09.013
- Santos, N.Z. dos, J. Dieckow, C. Bayer, R. Molin, N. Favaretto, V. Pauletti & J.T. Piva. 2011. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. *Soil Tillage Res.* 111, 208–218. doi:10.1016/j.still.2010.10.006
- Schuller, P., D.E. Walling, A. Sepúlveda, A. Castillo & I. Pino. 2007. Changes in soil erosion associated with the shift from conventional tillage to a no-tillage system, documented using ^{137}Cs measurements. *Soil Tillage Res.* 94, 183–192. doi:10.1016/j.still.2006.07.014
- Scott, N. a, K.R. Tate, D.J. Giltrap, C. Tattersall Smith, R.H. Wilde, P.F.J. Newsome & M.R. Davis. 2002. Monitoring land-use change effects on soil carbon in New Zealand: quantifying baseline soil carbon stocks. *Environ. Pollut.* 116 Suppl , S167–86.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze & K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.* 79, 7–31. doi:10.1016/j.still.2004.03.008
- Six, J., R.T. Conant, E.A. Paul & K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter : Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 155–176.
- Six, J., E.T. Elliott & K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation : a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *J. Soil Sci.* 32, 2099–2103.
- Six, J. & K. Paustian. 2014. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biol. Biochem.* 68, A4–A9.
- Smith, J.M.B.J.L. & V.L.B.H. Bolton. 2003. Priming effect and C storage in semi-arid no-till spring crop rotations. *Can. J. Soil Sci.* 237–244. doi:10.1007/s00374-003-0587-4
- Soane, B.D., B.C. Ball, J. Arvidsson, G. Basch, F. Moreno, & J. Roger-Estrade. 2012. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87. doi:10.1016/j.still.2011.10.015
- Steffens, M., K. Kolbl, A. Totsche & I. Kogelknabner. 2008. Grazing effects on soil chemical and physical properties in a semiarid steppe of Inner Mongolia (P.R. China). *Geoderma* 143, 63–72. doi:10.1016/j.geoderma.2007.09.004
- Swinton, S.M., S.K. Hamilton, F. Lupi, G.P. Robertson & E. Barrios. 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecol. Econ.* 64, 269–285.

- Tilman, D., K.G. Cassman, P. Matson, A. R. Naylor & S. Polasky. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–7. doi:10.1038/nature01014
- Tonitto, C., M. David & L. Drinkwater. 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agric. Ecosyst. Environ.* 112, 58–72. doi:10.1016/j.agee.2005.07.003
- Urbanek, E., A.J.M. Smucker & R. Horn. 2011. Total and fresh organic carbon distribution in aggregate size classes and single aggregate regions using natural ^{13}C / ^{12}C tracer. *Geoderma* 164, 164–171. doi:10.1016/j.geoderma.2011.05.020
- Uribe, T.O., M.E. Mastrangelo, D.V. Torrez, A. Piaz, M. Vallejos, J. Eduardo, S. Ceja, F. Gallego, L.C. Peña, N.E. Mellado, J.F. Flores, R.G. Mairhofer, Z.G. Espino, L. Salguero, C.M. Martinez-peralta, O. Ochoa, L.P. Volkow, J. Emilio, I. Sánchez-rose, M. Weeks, D.A. García, I. Bueno, A. Carmona, F.C. Videla, C.S. Ferrer, M. Elisa, F. Buss, G.L. Carapia, M.N. Cruz, R.T. Hermoza, D. Benet, Y. Venegas, P. Balvanera, T.H. Mwampamba, E.L. Chavero, E. Noellemeyer & M. Maass. 2014. Estudios transdisciplinarios en socio-ecosistemas : reflexiones teóricas y su aplicación en contextos latinoamericanos Transdisciplinary studies in socio-ecosystems : Theoretical considerations and its application in Latin American contexts. *Investig. Ambient. Cienc. y Política Pública* 123–136.
- Victoria, R., S. Banwart, H. Black, J. Ingram, H. Joosten, E. Milne, E. Noellemeyer & Y. Baskin. 2012. The benefits of soils carbon, in: UNEP Yearbook 2012. UNEP, Nairobi, pp. 19–33.
- Wardle, D.A., R.D. Bardgett, J.N. Klironomos, H. Setälä, V. Puten, H. Der, Wim & D.H. Wall. 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* (80-.). 304, 1629–1633.
- Whitbread, A.M., G.J. Blair & R.D.B. Lefroy. 2000. Managing legume leys, residues and fertilisers to enhance the sustainability of wheat cropping systems in Australia.: 1. The effects on wheat yields and nutrient balances. *Soil Tillage Res.* 54, 63–75.
- Zach, A., H. Tiessen & E. Noellemeyer. 2006. Carbon Turnover and Carbon-13 Natural Abundance under Land Use Change in Semiarid Savanna Soils of La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1541–1546. doi:10.2136/sssaj2005.0119
- Zhu, B., L. Yi, L. Guo, G. Chen, Y. Hu, H. Tang, C. Xiao, X. Xiao, G. Yang, S.N. Acharya & Z. Zeng. 2012. Performance of two winter cover crops and their impacts on soil properties and two subsequent rice crops in Dongting Lake Plain, Hunan, China. *Soil Tillage Res.* 124, 95–101. doi:10.1016/j.still.2012.05.007
- Zink, A., H. Fleige & R. Horn. 2011. Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. *Soil Tillage Res.* 114, 127–134. doi:10.1016/j.still.2011.04.004
- Zobeck, T., T. Skidmore, E. Lamb, J. Merrill, S. Lindstrom, M. Mokma & R.D.L. Yoder. 2003. Aggregate-mean diameter and wind-erodible soil predictions using dry aggregate-size distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 425–436.
- Zotarelli, L., B. Alves, S. Urquiaga, E. Torres, H. Dos Santos, K. Paustian, R. Boddey & J. Six. 2005. Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbon in two Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69, 482–491.