



De los indicadores a una visión integral del suelo como ecosistema

From Indicators to a Holistic View of Soil as an Ecosystem

Elke Johanna Noellemeyer ¹ 

¹ AGSUS – Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina. ORCID Elke Noellemeyer: <https://orcid.org/0000-0002-6229-5938>

Autor para correspondencia: Correo electrónico: noellemeyer@agro.unlpam.edu.ar; enoellemeyer@gmail.com (Elke Noellemeyer)

Abstract

Soil health represents a paradigm shift from measuring isolated properties to understanding soil as a living, functional, and dynamic ecosystem. This manuscript examines the differences and complementarities between soil fertility and soil health, emphasizing that assessments should address explicit objectives, defined spatial scales, and processes operating over different time frames. Criteria are discussed for selecting indicators that are responsive, practical, interpretable, and linked to soil processes, while avoiding aggregate metrics that may conceal trade-offs among functions. The Soil Organic Matter Indicator and visual soil quality assessment are presented as complementary tools for diagnosing, communicating, and monitoring management-induced changes. Evidence from fields under contrasting management shows that visual indicators can reveal degradation and recovery trajectories, although responses depend on soil and production conditions. Finally, soil diagnosis is framed as a basis for guiding ecological intensification, diversification, and sustainable management strategies that maintain the rhizosphere, enhance resilience, and sustain ecosystem services.

Key words: ecosystem services, resilience, visual indicators, organic matter indicators.

Resumen

La salud del suelo propone un cambio de paradigma desde la medición de propiedades aisladas hacia la comprensión integral del suelo como un ecosistema vivo, funcional y dinámico. Este manuscrito analiza las diferencias y complementariedades entre fertilidad y salud del suelo, y destaca que la evaluación debe responder a objetivos explícitos, escalas espaciales definidas y procesos que operan en distintas escalas temporales. Se discuten criterios para seleccionar indicadores sensibles, prácticos, interpretables y vinculados con procesos edáficos, evitando métricas agregadas que oculten compensaciones entre funciones. Se presentan el Indicador de Materia Orgánica y la Evaluación Visual De La Calidad Del Suelo como herramientas complementarias para diagnosticar, comunicar y monitorear cambios asociados al manejo del suelo. La evidencia de lotes con diferentes prácticas muestra que los indicadores visuales permiten detectar trayectorias de degradación y recuperación. Finalmente, se plantea que el diagnóstico debe orientar estrategias de intensificación ecológica, diversificación y manejo sustentable que mantengan la rizosfera, favorezcan la resiliencia y sostengan los servicios ecosistémicos.

Palabras clave: servicios ecosistémicos, resiliencia, indicadores visuales, indicador de materia orgánica.

Introducción

Los suelos son esenciales para el desarrollo de la vida en nuestro planeta (Gomez et al., 2026; Pindral et al., 2026) (Fig. 1). Es el capital natural más importante con el cual cuenta la humanidad para su desarrollo (Costanza & Daly, 1992), por lo que se relaciona también con muchos objetivos de desarrollo sostenible (Bouma, 2020; Lal et al., 2021). Los suelos constituyen la base de numerosos procesos ecológicos y proporcionan funciones y servicios ecosistémicos fundamentales para las plantas, los animales y las sociedades humanas (Costanza, 2017; Dominati et al., 2010).

En este contexto, el concepto de salud del suelo (Harris et al., 2022) propone un cambio de paradigma: pasar del uso de indicadores aislados hacia una evaluación más integral del suelo. Para ello es necesario comprender los suelos como un ecosistema vivo y funcional, para asegurar los servicios ecosistémicos (Bancheri et al., 2025) y su resiliencia (Hou, 2023).

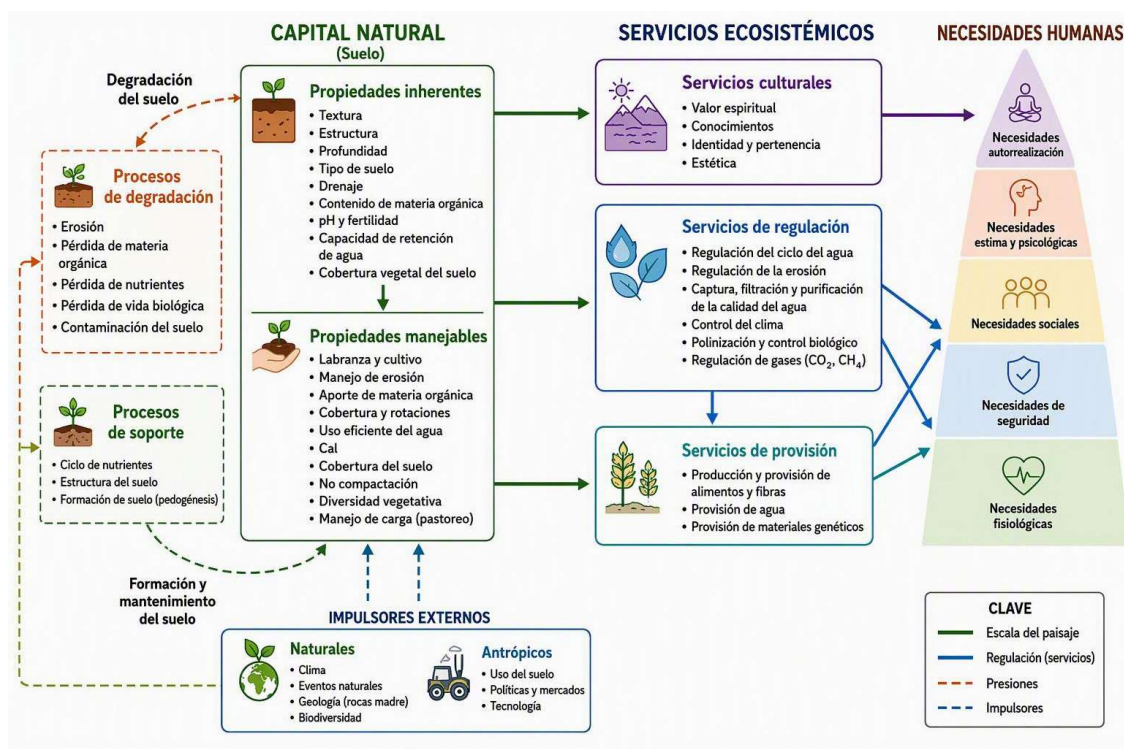


Figura 1. Las relaciones entre el capital natural del suelo, sus servicios ecosistémicos y las necesidades humanas.

¿Qué entendemos por salud del suelo?

La salud del suelo puede abordarse desde diferentes perspectivas (Harris et al., 2022). Como estado, se refiere a una condición del suelo en la que este cumple

con su rango de funciones ecosistémicas de acuerdo con lo que resulta apropiado para su entorno. Como capacidad, representa la capacidad continua del suelo para funcionar como un ecosistema vital, capaz de sostener plantas, animales y seres humanos. Este concepto tiene, además, un alcance más amplio que otros conceptos tradicionalmente utilizados en ciencia del suelo. La salud del suelo se diferencia de conceptos como fertilidad, calidad y seguridad del suelo, ya que incorpora una gama más amplia de servicios ecosistémicos y objetivos relacionados con la sustentabilidad.

Fertilidad del suelo y salud del suelo: conceptos complementarios

Una distinción importante es la que existe entre fertilidad del suelo y salud del suelo (Hitzfeld et al., 2024), ya que el análisis de fertilidad busca responder fundamentalmente a preguntas como: ¿qué nutrientes tiene el suelo y qué es necesario aplicar? Se trata, en gran medida, de una fotografía del estado nutricional actual del suelo, cuyo objetivo es optimizar las decisiones que deben tomarse en el corto plazo.

La salud del suelo plantea una pregunta diferente: ¿qué tan bien funciona el suelo como sistema vivo? En este caso, interesa no solamente conocer el estado actual, sino también comprender la tendencia temporal asociada al manejo. Prácticas como la labranza, los cultivos de cobertura y las rotaciones pueden modificar esa trayectoria y, por lo tanto, forman parte de la evaluación de la salud del suelo (Williams et al., 2020).

Ambos enfoques, por lo tanto, no deberían considerarse sustitutos. El análisis de fertilidad y el análisis de salud del suelo son complementarios. Mientras el primero permite conocer qué corregir o ajustar en el presente, el segundo aporta una perspectiva sobre cómo está funcionando el suelo y hacia dónde se orienta su evolución bajo determinadas prácticas de manejo (Swan et al., 2024).

Diferentes objetivos requieren diferentes evaluaciones

Un punto de partida fundamental para evaluar la salud del suelo es definir claramente el objetivo y el enfoque de la evaluación. No necesariamente existe un único conjunto de indicadores o una única metodología válida para todas las situaciones. La presentación plantea dos grandes posibilidades (Zwaan et al., 2026). La primera es una evaluación local de las funciones del suelo, orientada al lote y

vinculada con decisiones concretas de manejo del productor. La segunda corresponde a una evaluación de la salud del suelo a escala amplia, orientada al monitoreo regional y a la comparación entre diferentes sitios para el desarrollo de políticas ambientales. Esta diferencia de escala es importante porque cada objetivo requiere herramientas y métodos específicos. La clave es seleccionar el método que esté alineado con la pregunta que se pretende responder.

En este sentido, se desaconseja recurrir automáticamente a métricas agregadas o de multifuncionalidad, porque éstas pueden ocultar compensaciones importantes entre distintas funciones del suelo (Lehmann et al., 2020).

La importancia de considerar la dinámica temporal

Uno de los aspectos centrales de la evaluación de la salud del suelo es que los cambios en el suelo no ocurren todos a la misma velocidad. Algunas propiedades pueden responder prácticamente de manera inmediata, mientras que otras requieren años para mostrar cambios detectables. La presentación distingue diferentes escalas temporales:

- Menos de un día: respuestas inmediatas.
- Un año o más: cambios funcionales.
- Tres años o más: cambios asociados a fracciones sensibles.
- Cinco años o más: cambios acumulativos.

Esta dimensión temporal es particularmente importante cuando se seleccionan indicadores y su implementación en un cronograma de muestreo y monitoreo. Por ejemplo, dentro de la materia orgánica, el carbono orgánico disuelto puede presentar respuestas en escalas inferiores a un día, mientras que la materia orgánica particulada puede requerir tres años o más para reflejar cambios, y la materia orgánica total puede mostrar cambios acumulativos a partir de períodos de cinco años o más (Bayer et al., 2001; Blankinship et al., 2018; Farhadifar et al., 2025; Giannetta et al., 2018; Guigue et al., 2015; Meurer et al., 2020; Witzgall et al., 2024). Algo similar ocurre con las propiedades microfísicas. La estabilidad estructural puede responder rápidamente a eventos como las lluvias, mientras que la infiltración básica y el intervalo hídrico óptimo pueden reflejar cambios funcionales a escalas de un año o más. La estabilidad estructural asociada a cambios de manejo también puede requerir períodos de cinco años o más para mostrar

transformaciones acumulativas. (Dor et al., 2023; Fernández et al., 2019; Hangen et al., 2002; Meurer et al., 2020)

Por lo tanto, la elección del indicador y la frecuencia del muestreo deben estar relacionadas con la escala temporal del proceso que se quiere detectar. No tendría sentido esperar que todas las propiedades respondan de la misma manera ni utilizar un único indicador para representar procesos que evolucionan a escalas temporales diferentes.

¿Qué indicadores podemos utilizar?

La selección de indicadores constituye uno de los principales desafíos para el diagnóstico de la salud del suelo. De acuerdo con el enfoque presentado, los indicadores deberían cumplir varios requisitos. En primer lugar, debe existir evidencia de que responden de manera comprobada a los cambios que se pretende detectar. Además, deberían ser prácticos para el muestreo, fáciles de interpretar y tener un costo relativamente bajo.

Pero hay una condición adicional particularmente importante: los indicadores deberían aportar información sobre los procesos que ocurren en el suelo, y no limitarse simplemente a describir una propiedad aislada. De esta manera, un buen sistema de diagnóstico debería permitir conectar el indicador medido con el funcionamiento del suelo y con las prácticas de manejo que pueden modificarlo.

De los indicadores al diagnóstico

La idea central es avanzar desde la simple medición de indicadores hacia una interpretación que permita comprender el estado y funcionamiento del suelo en relación con su manejo. En este contexto, la evaluación de la materia orgánica adquiere especial relevancia, ya que es ella que relaciona todos los servicios ecosistémicos del suelo (Banwart et al., 2014). Este enfoque lleva a considerar herramientas como el Indicador de Materia Orgánica (IMO) (Quiroga et al., 2006) como una aproximación al diagnóstico de la salud del suelo, ya que relaciona el contenido de materia orgánica del suelo con su proporción de partículas finas (limo y arcilla), y de esta manera caracteriza el déficit de saturación de carbono que tiene el suelo (Six et al., 2024).

Por otra parte, tenemos que pensar en indicadores que permiten la fácil comunicación del estado del suelo, y el monitoreo de su evolución a consecuencia

de las decisiones de manejo de suelos que se tomen. Para ellos se presta el uso de indicadores visuales que facilita la observación de fenómenos en el perfil del suelo que son indicativos de los procesos físicos, químicos, hidrológicos y biológicos (Ball et al., 2017; Emmet-Booth et al., 2016). La Guía de Evaluación Visual de la Calidad del Suelo (Noellemeyer et al., 2021) reúne a 12 indicadores que responden de manera directa a cambios en el manejo del suelo, con excepción de variables estables como textura y profundidad efectiva del perfil. Este rango de evaluación permite un diagnóstico rápido y efectivo del estado del suelo, y las diferencias son perceptibles aun para personas no entrenadas (Fig. 2).



Figura 2. Ejemplo de la evaluación visual de dos lotes contiguos con diferente manejo en M. Riglos, La Pampa.

Una visión integral del suelo

En definitiva, hablar de salud del suelo implica ampliar la perspectiva. No se trata solamente de determinar si existen suficientes nutrientes para sostener un cultivo, sino de preguntarnos cómo funciona el suelo como sistema vivo, qué funciones puede desempeñar, cómo responde al manejo y cómo evoluciona a lo largo del tiempo. En este contexto es importante notar que la salud del suelo es indispensable para la seguridad del suelo, que se entiende como el eslabón más importante para la seguridad alimentaria, las políticas agropecuarias y las agendas de desarrollo sostenible (Bouma, 2020b; McBratney et al., 2014).

Desde esta perspectiva, la fertilidad constituye una parte importante del diagnóstico, pero no agota la evaluación del suelo. La salud del suelo incorpora dimensiones físicas, químicas y biológicas y las relaciona con las funciones ecosistémicas y con la sustentabilidad y resiliencia del sistema (Bullock et al., 2017). Por eso, el desafío no consiste simplemente en encontrar un indicador de salud del suelo. El desafío es seleccionar indicadores adecuados para la pregunta, la escala espacial y la escala temporal de interés, y utilizarlos de manera que permitan comprender los procesos del suelo y orientar las decisiones de manejo. En otras palabras, el cambio de paradigma consiste en pasar de preguntarnos únicamente “¿qué tiene este suelo?” a preguntarnos también “¿cómo está funcionando este suelo?, ¿cómo está cambiando?, y ¿qué podemos hacer para mantener o mejorar su funcionamiento?”

En este sentido, la evaluación visual se puede utilizar como herramienta para el diagnóstico y la verificación del efecto de un cambio en las prácticas agronómicas, ya que estos se reflejan en cambios de la valoración de los indicadores más importantes como Estructura, Porosidad, Color, Compactación o Costras (Fig. 3). En la comparación entre ambos suelos llama la atención la diferencia en la regeneración de los indicadores visuales, siendo el suelo de Miraflores más resiliente en su recuperación. Una posible explicación puede estar en la mayor disponibilidad de fósforo en este suelo, y además la incorporación de la ganadería en este campo.

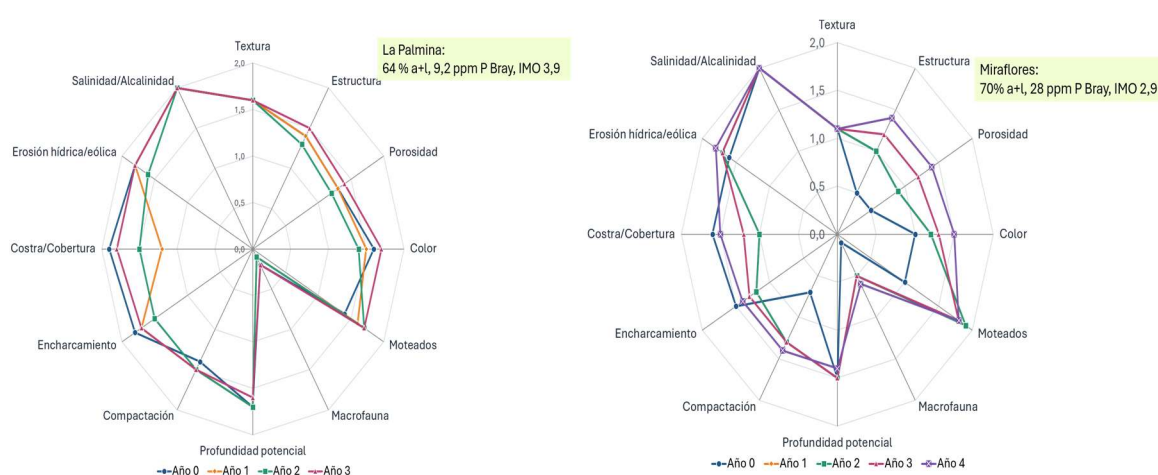


Figura 3. Monitoreo de los Indicadores Visuales durante tres y cuatro años a partir de la medición de Línea Base en dos suelos diferentes (La Palmina, Ordoñez, Córdoba y Miraflores, San Fabián, Santa Fe).

También se ha comprobado que el puntaje de evaluación visual establecido por este método se correlaciona con el valor del IMO en suelos que están en el rango de puntuación que califica como calidad Moderado, mientras que en suelos con calificación Pobre esta relación no se observó (Fig. 4) (Noellemeyer et al., 2024).

Table 2. Spearman correlation coefficients for the relationships between Visual Evaluation scores and the soil variables at 0-0.1 m and 0.1-0.2 m depth.

Depth: 0-0.10 m								
	Poor			p-value	Good			
	n	Spearman	n		n	Spearman	p-value	
Bulk density (Mg m ⁻³)	2	S/D	39	-0.13	0.4300	39	-0.2	0.2200
Clay (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	-0.10	0.5300	39	-0.13	0.4500
Silt (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	-0.51	0.0000	39	-0.16	0.3200
Sand (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	0.45	0.0000	39	0.22	0.1700
Clay+Silt (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	-0.45	0.0000	39	-0.22	0.1900
pH	2	S/D	39	0.39	0.0200	39	0.36	0.0500
SOC	2	S/D	39	0.47	0.0000	39	0.36	0.0500
OMI	2	S/D	39	0.67	0.0000	39	-0.13	0.4300

Depth: 0.10-0.20 m								
	Poor			p-value	Good			
	n	Spearman	n		n	Spearman	p-value	
Bulk density (Mg m ⁻³)	2	S/D	39	-0.06	0.7300	39	-0.28	0.090
Clay (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	0.18	0.2700	39	-0.08	0.620
Silt (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	-0.55	0.0000	39	-0.06	0.730
Sand (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	0.46	0.0000	39	0.12	0.460
Clay+Silt (g kg ⁻¹)	2	S/D	39	-0.45	0.0000	39	-0.07	0.650
pH	2	S/D	38	0.25	0.1300	31	0.39	0.030
SOC	2	S/D	39	0.16	0.3400	39	-0.1	0.550
OMI	2	S/D	39	0.45	0.0000	39	-0.1	0.530

Figura 4. Correlaciones entre el puntaje de Evaluación Visual e indicadores físicos y químicos de suelos.

Por otra parte, el diagnóstico debe conducir a identificar prácticas de manejo que contribuyan a garantizar la permanencia de la rizosfera, destacándose en este sentido estrategias relacionadas con la intensificación ecológica (Bommarco et al., 2013; Cassman, 1999; Kleijn et al., 2019) y diversificación (Fritze et al., 2024; Zimmerer & Vanek, 2016). Para facilitar y clarificar los principios del manejo sustentable de suelos se desarrolló un conjunto de ocho elementos (Fig. 5).



Figura 5: Principios de manejo sustentable de suelos, aplicados a los campos que certifican en los proyectos de AGSUS.

Estos principios de manejo sustentable son los que deben adoptar, en la medida que pueden y de manera progresiva, los productores que se han asociado al programa de Certificación de Secuestro de Carbono y de Manejo Sustentable de Suelos de AGSUS (Noellemeyer et al., 2024) , que ya cuenta con 60 productores y más de 50.000 hectáreas monitoreadas.

Literatura citada

- Ball, B. C., Guimarães, R. M. L., Cloy, J. M., Hargreaves, P. R., Shepherd, T. G., & McKenzie, B. M. (2017). Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil and Tillage Research*, 173, 114–124. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2016.07.006>
- Bancheri, M., Albrizio, R., Botta, M., Perego, A., Terribile, F., & Basile, A. (2025). Toward soil health assessment through process-based modeling of ecosystem service bundles. *Geoderma*, 462, 117494. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2025.117494>
- Banwart, S. A., Noellemeyer, E., & Milne, E. (2014). *Soil Carbon: Science, management and policy for multiple benefits*. (S. A. Banwart, E. Noellemeyer, & E. Milne, Eds.; SCOPE Seri). CABI, Wallingford, UK.
- Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Pillon, C. N., & Sangoi, L. (2001). Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 65(5), 1473. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551473x>

- Blankinship, J. C., Berhe, A. A., Crow, S. E., Druhan, J. L., Heckman, K. A., Keiluweit, M., Lawrence, C. R., Marín-Spiotta, E., Plante, A. F., Rasmussen, C., Schädel, C., Schimel, J. P., Sierra, C. A., Thompson, A., Wagai, R., & Wieder, W. R. (2018). Improving understanding of soil organic matter dynamics by triangulating theories, measurements, and models. *Biogeochemistry*, 140(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0478-2>
- Bommarco, R., Kleijn, D., & Potts, S. G. (2013). Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.10.012>
- Bouma, J. (2020a). Contributing pedological expertise towards achieving the United Nations Sustainable Development Goals. *Geoderma*, 375, 114508. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114508>
- Bouma, J. (2020b). Soil security as a roadmap focusing soil contributions on sustainable development agendas. *Soil Security*, 1, 100001. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2020.100001>
- Bullock, J. M., Dhanjal-Adams, K. L., Milne, A., Oliver, T. H., Todman, L. C., Whitmore, A. P., & Pywell, R. F. (2017). Resilience and food security: rethinking an ecological concept. *Journal of Ecology*, 105(4), 880–884. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12791>
- Cassman, K. G. (1999). Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(11), 5952–5959. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=34211&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
- Costanza, R. (2017). Ecosystem Services in Theory and Practice. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10293-3>
- Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, 6(1), 37–46. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610037.x>
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Dor, M., Assa, I., & Mishaël, Y. (2023). The Dynamic Effect of Root Exudates on Soil Structure: Aggregate Stability and Packing. *Egusphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2501>

- Emmet-Booth, J. P., Forristal, P. D., Fenton, O., Ball, B. C., & Holden, N. M. (2016). A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. *Soil Use and Management*, 32(4), 623–634. <https://doi.org/10.1111/sum.12300>
- Farhadifar, A., Kooch, Y., & Bahmanyar, M. A. (2025). Landform boosts the role of toposequence positions on labile and non-labile fractions of soil organic matter. *CATENA*, 261, 109491. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2025.109491>
- Fernández, R., Frasier, I., Quiroga, A., & Noellemeyer, E. (2019). Pore morphology reveals interaction of biological and physical processes for structure formation in soils of the semiarid Argentinean Pampa. *Soil and Tillage Research*, 191(January), 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.011>
- Fritze, H., Tuomivirta, T., Orrù, L., Canfora, L., Cuartero, J., Ros, M., Pascual, J. A., Zornosa, R., Egea-Cortines, M., Lång, K., Kaseva, J., & Peltoniemi, K. (2024). Effect of no-till followed by crop diversification on the soil microbiome in a boreal short cereal rotation. *Biology and Fertility of Soils*. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01797-x>
- Giannetta, B., Plaza, C., Vischetti, C., Cotrufo, M. F., & Zaccone, C. (2018). Distribution and thermal stability of physically and chemically protected organic matter fractions in soils across different ecosystems. *Biology and Fertility of Soils*, 54(5), 671–681. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1290-9>
- Gomez, M. F., Piaz, A., Alvarez, L., Gili, A., Leizica, E., & Noellemeyer, E. (2026). ECOSYSTEM SERVICES IN AGROECOSYSTEMS OF THE PAMPAS REGION: SOIL INDICATORS AND STAKEHOLDER PERCEPTIONS. *Ciencia del Suelo*, (44(1)), 73–84. <https://doi.org/https://doi.org/10.64132/cds.v44i1.936>
- Guigue, J., Lévêque, J., Mathieu, O., Schmitt-Kopplin, P., Lucio, M., Arrouays, D., Jolivet, C., Dequiedt, S., Chemidlin Prévost-Bouré, N., & Ranjard, L. (2015). Water-extractable organic matter linked to soil physico-chemistry and microbiology at the regional scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 84, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.016>
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J., & Hu, R. F. (2002). Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage : influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Geoderma*, 63, 181–186.
- Harris, J. A., Evans, D. L., & Mooney, S. J. (2022). A new theory for soil health. *European Journal of Soil Science*, 73(4), e13292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejss.13292>

- Hitzfeld, B., Rodríguez Eugenio, N., & Wissemeier, A. H. (2024). Soil health—From practical issues to indicators: A workshop at the 1st European Healthy Soils Conference. *European Journal of Soil Science*, 75(3), e13504. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ejss.13504>
- Hou, D. (2023). Soil health and ecosystem services. *Soil Use and Management*. <https://doi.org/10.1111/sum.12945>
- Kleijn, D., Bommarco, R., Fijen, T. P. M., Garibaldi, L. A., Potts, S. G., & van der Putten, W. H. (2019). Ecological Intensification: Bridging the Gap between Science and Practice. *Trends in Ecology and Evolution*, 34(2), 154–166. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.11.002>
- Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D. J., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A. E., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G. M., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sánchez, L. B., Sandén, T., Singh, B. R., ... Zhang, J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*, 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2013.08.013>
- Meurer, K. H. E., Chenu, C., Coucheney, E., Herrmann, A. M., Keller, T., Kätterer, T., Nimblad Svensson, D., & Jarvis, N. (2020). Modelling dynamic interactions between soil structure and the storage and turnover of soil organic matter. *Biogeosciences*, 17(20), 5025–5042. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5025-2020>
- Noellemeyer, E., Álvarez, L., Álvarez, C., Dillchneider, A., Farrell, M., Fernández, R., Buss, E. F., Frasier, I., Gaggioli, C., Gili, A., Gómez, F., Lara, G., Leizica, E., Lorda, M., Quiroga, A., & Rainhart, L. (2024). From science to practice: The AGSUS protocol for monitoring and certification of sustainable soil management and carbon sequestration. *Soil and Tillage Research*, 241, 106102. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106102>
- Noellemeyer, E., Álvarez, L., Leizica, E., Gómez, F., Fernández, R., Frasier, I., Álvarez, C., & Quiroga, A. (2021). *Guía para la evaluación visual de la calidad del suelo*. EdUNLPam.
- Pindral, S., Wnuk, A., Coblinski, J. A., Niedźwiecki, J., & Smreczak, B. (2026). Models and Methods for Evaluating the Soil-Based Ecosystem Services of Agricultural Soils—A

- Global Systematic Review. *Agronomy*, 16(11).
<https://doi.org/10.3390/agronomy16111072>
- Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., & Peinemann, N. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 90(1–2), 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.019>
- Six, J., Doetterl, S., Laub, M., Müller, C. R., & Van de Broek, M. (2024). The six rights of how and when to test for soil C saturation. *SOIL*, 10(1), 275–279.
<https://doi.org/10.5194/soil-10-275-2024>
- Swan, T., McBratney, A., & Field, D. (2024). Linkages between Soil Security and One Health: implications for the 2030 Sustainable Development Goals. In *Frontiers in Public Health* (Vol. 12). Frontiers Media SA.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1447663>
- Williams, H., Colombi, T., & Keller, T. (2020). The influence of soil management on soil health: An on-farm study in southern Sweden. *Geoderma*, 360, 114010.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114010>
- Witzgall, K., Steiner, F. A., Hesse, B. D., Riveras-Muñoz, N., Rodríguez, V., Teixeira, P. P. C., Li, M., Oses, R., Seguel, O., Seitz, S., Wagner, D., Scholten, T., Buegger, F., Angst, G., & Mueller, C. W. (2024). Living and decaying roots as regulators of soil aggregation and organic matter formation—from the rhizosphere to the detritusphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 197, 109503.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109503>
- Zimmerer, K., & Vanek, S. (2016). Toward the Integrated Framework Analysis of Linkages among Agrobiodiversity, Livelihood Diversification, Ecological Systems, and Sustainability amid Global Change. *Land*, 5(2), 10. <https://doi.org/10.3390/land5020010>
- Zwaan, R. E., Verwijmeren, M., Rutgers, M., Swart, E., Schoffelen, N., Moinet, G. Y. K., Vazquez, C., & Creamer, R. E. (2026). Soil health indices in disagreement: A systematic review and comparison of soil health assessment methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 220, 110184. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2026.110184>