

El suelo auto organizado

Self-organized soil

Patrick Lavelle 

Acceso Abierto

Correspondencia:
plavelle48@gmail.com
Université Paris Sorbonne; Université
Pierre et Marie Curie, Francia.

Recibido: 24-03-2021
Aceptado para publicación:
28-07-2021
Publicado en línea: 09-09-2021

Palabras clave:

Agregación del suelo;
estructuras del suelo
funcionamiento del suelo;
horizontes del suelo;
ingenieros del ecosistema;
servicios ecosistémicos;
sistemas auto organizados.

Key words:

Ecosystem engineers;
ecosystem services;
soil functioning;
self-organized systems;
soil aggregation;
soil horizons;
soil structures.

Citación:

Lavelle P. El suelo auto organizado.
Magna Scientia UCEVA 2021; 1: 84–9.
<https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a12>.

Resumen

El objetivo de esta reflexión es exponer el modelo de funcionamiento del suelo, donde se explica cómo los diferentes organismos, cooperan en sistemas auto organizados para regular y optimizar todas las funciones del suelo, permitiendo así, una producción primaria sostenida. Los suelos son sistemas ecológicos autoorganizados dentro de los cuales los organismos interactúan dentro de un conjunto anidado de escalas discretas. Los ingenieros de ecosistemas, principalmente raíces de plantas, lombrices de tierra, termitas y hormigas, desempeñan un papel clave en la creación de hábitats para otros organismos y en el control de sus actividades mediante procesos físicos y bioquímicos. Este modelo de funcionamiento del suelo, se convierte en una guía fundamental y base para el diseño de experimentos y nuevos tipos de manejo del suelo, permitiendo conservar y amplificar la producción de los servicios ecosistémicos.

Abstract

The aim of this reflection is to expose the soil functioning model, where it is explained how the different organisms cooperate in self-organized systems to regulate and optimize all soil functions, thus allowing a sustained primary production. Soils are self-organized ecological systems within which organisms interact within a nested suite of discrete scales. Ecosystem engineers, principally plant roots, earthworms, termites, and ants, play key roles in creating habitats for other organisms and controlling their activities through physical and biochemical processes. This soil functioning model, becomes a fundamental guide and basis for the design of experiments and new types of soil management, allowing the conservation and amplification of the ecosystem services production.

Introducción

Después de la breve euforia de la revolución verde que permitió, en 40 años, multiplicar la producción agrícola por 2.5 y disminuir su precio al 40% de su valor anterior [1], la humanidad se encuentra otra vez con el desafío de inventar de forma urgente una nueva forma de hacer la gestión de los suelos [2]. Mientras se resolvía de forma temporal el problema del hambre, se degradaba de manera muy preocupante, el 60% de los servicios ecosistémicos; la agricultura es responsable de la mitad del cambio climático que ya empezaba a mostrar sus efectos dramáticos [3].

Las condiciones están mucho más difíciles que hace 50 años, existe muy poca disponibilidad de ecosistemas vírgenes para convertir al uso agrícola, y los que quedan, están considerados como las últimas reservas de biodiversidad a conservar [4]. Con una superficie igual o hasta menor de lo que fue al principio del siglo, se va pedir a los suelos lo siguiente: *i*) aumentar la producción de alimentos 70% hasta el 2050; *ii*) controlar el cambio climático secuestrando un cuarto del carbono liberado por los combustibles fósiles y la degradación de los ecosistemas; *iii*) seguir filtrando, almacenado y limpiando el agua y regulando los caudales de los ríos; *iv*) producir biocombustibles para suplir la rarefacción de los fósiles; *v*) conservar la biodiversidad única que tienen que representar un tercio de la biodiversidad global y *vi*) servir finalmente de soporte al desarrollo de las ciudades y vías de comunicación.

La agricultura en un futuro cercano tendrá que estar menos dependiente del C fósil y de los agroquímicos, asociando la productividad y rentabilidad de los sistemas *convencionales* con la calidad ambiental de los sistemas agroecológicos [5]. El manejo de la fauna del suelo, especialmente de los llamados *ingenieros del ecosistema*, es una opción muy prometedora, aunque la ignorancia de los productores y de muchos agrónomos, requiere un esfuerzo muy especial de investigación y de socialización de los resultados [6].

En este artículo se hace una reflexión alrededor del modelo de funcionamiento del suelo, donde se explica cómo los diferentes organismos, cooperan en sistemas auto organizados para regular y optimizar todas las funciones del suelo, permitiendo así, una producción primaria sostenida.

Auto organización en los suelos, los sistemas de producción y las sociedades

Los precursores de la ciencia del suelo como Dokuchaev, Jenny [7] y Duchaufour [8], han mostrado que la formación y el funcionamiento del suelo dependen de la interacción de tres elementos fundamentales: el substrato geológico, el clima y los organismos. En el siglo XX se han desarrollado muchos trabajos y teorías describiendo procesos e interacciones basados en este paradigma. Sin embargo, el modelo general de funcionamiento no ha progresado mucho y la investigación muchas veces se ha especializado en cada uno de los componentes, olvidándose del marco global [9].

La urgente necesidad de promover gestiones holísticas de los suelos, que representen el mejor compromiso en la conservación del recurso y la producción sostenible de bienes y servicios ambientales, requiere de un marco conceptual más detallado y amplio que el marco original propuesto por Dokuchaev: *i*) un modelo de funcionamiento del suelo que considere al mismo tiempo los organismos, las estructuras físicas del suelo y los procesos a través de las escalas de espacio y tiempo. Este modelo permitirá evaluar la integridad del suelo y determinar las consecuencias de intervenciones o cambios externos sobre él; *ii*) un modelo de gestión de recursos que integre el suelo, el ambiente global, las sociedades humanas y el sistema económico. Con este modelo, se podrán considerar los mejores compromisos entre los diversos bienes y servicios, así como las necesidades y condiciones de los ámbitos sociales y económicos. El modelo propuesto por Lavelle et al. [10], en línea con lo que plantea Perry [11], reconoce que el suelo responde a las características de los sistemas auto organizados.

En los sistemas auto organizados se pueden evidenciar los siguientes escenarios: *i*) el orden se observa cuando el desorden hubiera sido previsto. La organización de los horizontes del suelo, la distribución de los poros en clases de tamaño y su arreglo espacial, la estructura de las comunidades de invertebrados del suelo o de microorganismos, son ejemplos de esta organización; *ii*) las estructuras y los procesos se refuerzan mutuamente. Un ejemplo en el suelo, es el efecto de la agregación que tiene un efecto positivo sobre la dinámica hídrica del suelo, lo cual, es favorable para la actividad de

los organismos que a su vez, mantienen la agregación por sus actividades. Cabe anotar la relevancia especial del concepto de emergía “*emergy*”, creado por Odum [12] para identificar esta fracción del flujo energético invertida en la construcción de estructuras que modifican el funcionamiento del sistema; *iii*) el sistema al interior, establece límites y mantiene el orden a través de interacciones que se concentran en el espacio delimitado. Distintas observaciones enseñan, por ejemplo, que los dominios funcionales de los organismos ingenieros del suelo (raíces, lombrices, termitas...), poseen límites que pueden definirse con la firma espectral (NIRS) de los agregados producidos del suelo [13,14]; el sistema está lejos del equilibrio, se encuentra en un estado meta estable mantenido por la constante actividad de los organismos. Por ejemplo, la agregación del suelo medida en un momento dado, es el resultado del equilibrio entre un flujo de agregados recién formados por los procesos biológicos y físicos del suelo, y un flujo de destrucción de los mismos.

Si cesa la actividad de formación tras la desaparición de los organismos ingenieros, la agregación del suelo desaparecerá progresivamente o cambiará en formas catastróficas [15].

Finalmente, los sistemas naturales, como es el suelo; están conformados por una jerarquía de sistemas auto organizados a diferentes escalas, encajados uno en el otro. El sistema está estabilizado por relaciones de cooperación enfocadas en las fronteras espaciales y temporales que los delimitan. La figura 1, ilustra el funcionamiento del suelo, el cual está concebido como una serie de unidades que, al igual que los engranajes de una maquina mecánica, se entrenan, desde las ruedas pequeñas, que tienen procesos rápidos a pequeñas escalas (ej. procesos microbianos en los micro agregados del suelo, hasta procesos lentos que se desarrollan a grandes escalas; la producción de servicios ecosistémicos a la escala del paisaje, de la biomasa o la biosfera) (figura 1).

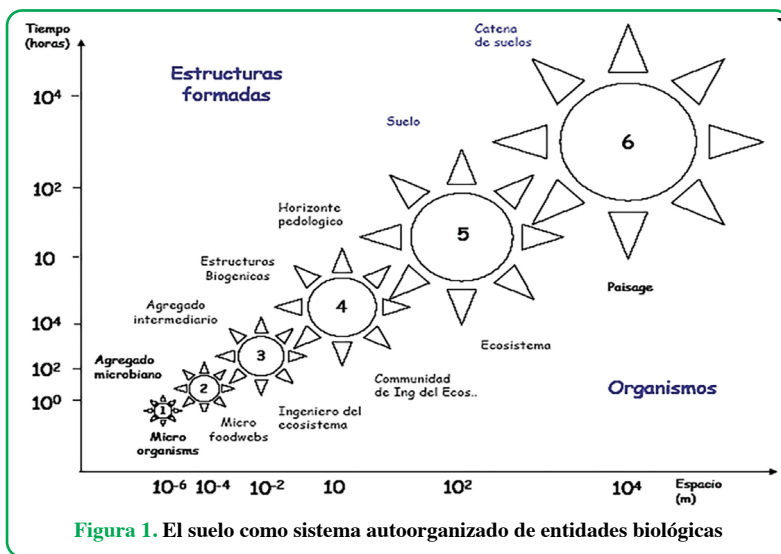
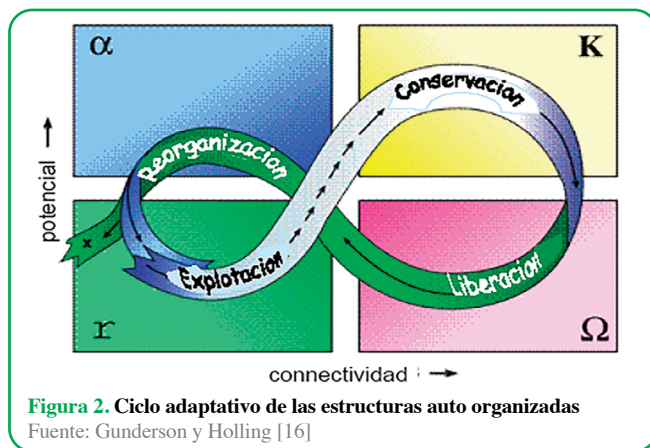


Figura 1. El suelo como sistema autoorganizado de entidades biológicas

De la figura 1, se infiere que los organismos de tamaños crecientes, desde microorganismos a microinvertebrados (*microfoodwebs*), los ingenieros de ecosistemas y los ecosistemas (eje horizontal), crean estructuras de diferentes tamaños (eje vertical) y organizan al suelo en diferentes escalas anidadas a partir de 1 (agregados microbianos habitados por comunidades microbianas) hasta 5 (paisaje visto como un mosaico de diferentes ecosistemas) (figura 1); la mayoría de los servicios ecosistémicos basados en el suelo, se perciben y prestan a escala de paisaje [10].

Los sistemas auto organizados de acuerdo con Gunderson y Holling [16], poseen una dinámica en el tiempo que les hace pasar por 4 fases sucesivas a saber: *i*) una fase α de organización, a partir de elementos de la biodiversidad, de materiales (materia orgánica; partículas minerales) y de fuentes de energía o de nutrientes disponibles dentro de las fronteras a partir de las cuales, se va formar el sistema auto organizado (figura 1). Por ejemplo, una raíz que crece en el suelo, selecciona la microflora al activarla de forma selectiva por la producción de exudados; también crea un hábitat particular para la micro y meso fauna al agregar

el suelo en su entorno, utilizando los elementos minerales y también la porosidad que existían en el micrositio, la materia orgánica y los nutrientes que pueden ser utilizados por la raíz o las micorrizas que crecen sobre ella (figura 2).



ii) Una fase r de crecimiento rápido, que corresponde a la expansión del sistema, el cual aumenta su conectividad mientras se vuelve más complejo al aumentar la biodiversidad y la diversidad de las estructuras físicas creadas (figura 2); iii) una fase K de conservación donde el sistema una vez llegado a la madurez, se mantiene en un estado meta estable (figura 2); iv) Una fase Ω de destrucción del sistema, cuando se presentan eventos externos (ej. La destrucción física y/o la dispersión de las estructuras creadas; la muerte del organismo ingeniero principal que estaba produciendo las estructuras y activando de forma selectiva, los microorganismos presentes) (figura 2).

Respondiendo preguntas aún sin respuesta

La división de la ciencia del suelo en múltiples subdisciplinas y el confinamiento de ciertos problemas en un solo campo disciplinar, no han hecho posible avanzar en ciertos problemas a pesar de su importancia. Se presentan a continuación, dos ejemplos particulares.

Dinámica de la materia orgánica y la agregación del suelo

Existe una extensa literatura que enseña la conservación o secuestro del Carbono en el suelo, ligada al proceso de agregación [17]. Si bien los físicos pueden medir la

resistencia de los agregados hacia agresiones físicas, pueden medir además, la cantidad de agregados estables presentes en un suelo; no tienen idea ni del origen (*¿quiénes los hicieron?*) ni de la dinámica (*¿cómo se transforman? o ¿cuánto tiempo durara?*). Sin respuesta a estas preguntas, es difícil diseñar sistemas de manejo del suelo que acumulen Carbono. Se conocen empíricamente cuatro (4) condiciones para que el suelo se agregue y conserve Carbono: i) que se aporten abonos orgánicos; ii) que se mantenga una cobertura, viva o muerta, pero permanente; iii) que se limite al máximo el trabajo físico del suelo por labranza y iv) que no se aplique ningún tipo de biocida.

Pero el mecanismo preciso que permite la creación de estos agregados, está poco conocido. Los macro agregados del suelo están de hecho, producidos en gran parte, por los macroinvertebrados llamados *ingenieros del ecosistema*, solos o en asociación con las raíces, que son también grandes constructoras de agregados. La visión holística propuesta con el modelo de auto organización, permite considerar todos los procesos, los organismos y las estructuras involucradas en el secuestro de Carbono en el suelo [17]. Estudios detallados de estos procesos, permitirán optimizar el secuestro de C en los suelos, proceso que es muy necesario para disminuir la carga de C en la atmósfera.

El papel de la biodiversidad en el funcionamiento del suelo

Una extensa reciente literatura, ha mostrado la importancia de la biodiversidad y su papel en el suelo [18]. Aunque todavía la mayoría de las especies presentes estén sin describir, se estima que un tercio de la biodiversidad global vive en los suelos. Sin embargo, falta todavía entender mejor el papel de esta biodiversidad en la provisión de los servicios ecosistémicos del suelo. La mayoría de los estudios se limitan a evaluar el efecto de un solo grupo taxonómico, sean los microorganismos (bacterias, micorrizas y otros), la microfauna con el tema de las cadenas tróficas que ella constituye, la meso o la macrofauna. Es muy importante articular estos efectos en modelos más holísticos, con el fin de evitar la extrapolación de datos obtenidos en condiciones limitadas de biodiversidad; a veces sin plantas y en suelos desagregados, hacia los ecosistemas reales. La publicación de un meta análisis de datos, sobre las emisiones de gases efecto invernadero por las lombrices, es un ejemplo de este problema [19].

Si bien es cierto, una biomasa incrementada de lombrices que es mantenida en un suelo desagregado, libera óxidos nitrosos, gran parte de esta emisión se debe a la desnitrificación de las grandes cantidades de amonio que producen las lombrices de tierra en densidad exagerada, en un espacio reducido que se vuelve anaeróbico; en ausencia de plantas que normalmente hubieran absorbido este nitrógeno mineral.

Conclusión

El modelo de auto organización propuesto aquí, es una guía que habría que tomar en cuenta para diseñar experimentos y nuevos tipos de manejo de los suelos, que permitan conservar y amplificar la producción de los servicios ecosistémicos.

Consentimiento de publicación

El autor leyó y aprobó el manuscrito final.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés.

Perfil de autoría

Patrick Lavelle

Es profesor emérito de la Pierre et Marie Curie, Universidad de París, donde obtuvo un doctorado en Ecología. Es especialista en Ecología de Suelos, con especial conocimiento de lombrices y otros macroinvertebrados del suelo. Ha sido Director del Laboratoire d'Ecologie des Sols Tropicaux y ha dirigido proyectos de investigación y estudios de doctorado en muchos países de África tropical, América, China, India y Francia. Es autor de más de 200 artículos en revistas internacionales y de un libro de texto sobre Ecología del suelo publicado en 2001 con Alisterc España. Es miembro de la Academia Francesa de Ciencias.

Recientemente, ha desarrollado en la ciudad de Cali-Valle del Cauca-Colombia, donde vive actualmente, programas de educación ambiental para colegios y estudiantes universitarios, articulados con una apuesta audiovisual que combinan teatro, música y ciencia para explicar la problemática ambiental. Es autor e intérprete, con su banda de músicos profesionales Los Hijos de Gaia, de 16 canciones que describen las bellezas del planeta Tierra y los problemas ambientales y sociales vinculados a las actividades humanas (canal YouTube: Patrick Lavelle y Los Hijos de Gaia).



Referencias

- [1] Gollin D, Hansen CW, Wingender A. Two blades of grass: The impact of the green revolution. Cambridge, MA: 2018. <https://doi.org/10.3386/w24744>.
- [2] James SW, Csuzdi C, Chang C-H, Aspe NM, Jiménez JJ, Feijoo A, et al. Comment on “Global distribution of earthworm diversity.” Science 2021;371. <https://doi.org/10.1126/science.abe4629>.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis. Washington, DC., USA: 2005. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- [4] Duran-Bautista EH, Armbrrecht I, Serrão Acioli AN, Suárez JC, Romero M, Quintero M, et al. Termites as indicators of soil ecosystem services in transformed amazon landscapes. Ecological Indicators 2020;117. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106550>.
- [5] Tiftonell P, Piñeiro G, Garibaldi LA, Dogliotti S, Olf H, Jobbagy EG. Agroecology in Large Scale Farming—A Research Agenda. Frontiers in Sustainable Food Systems 2020;4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.584605>.
- [6] Velasquez E, Lavelle P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil-based ecosystem services in agricultural landscapes. Acta Oecologica 2019;100. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.103446>.
- [7] Pendleton RL, Jenny H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. Geographical Review 1945;35. <https://doi.org/10.2307/211491>.
- [8] Lavelle P. Ecology and the challenge of a multifunctional use of soil. Pesquisa Agropecuária Brasileira 2009;44. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800003>.
- [9] Lavelle P. Ecological challenges for soil science. Soil Science 2000;165:73–86. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_55-56/010021664.pdf
- [10] Lavelle P, Spain A, Blouin M, Brown G, Decaëns T, Grimaldi M, et al. Ecosystem Engineers in a Self-organized Soil. Soil Science 2016;181. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000155>.
- [11] Perry DA. Self-organizing systems across scales. Trends in Ecology & Evolution 1995;10. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)89074-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)89074-6).
- [12] Odum HT. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making. New York, NY: Wiley; 1996.
- [13] Velasquez E, Lavelle P, Barrios E, Joffre R, Reversat F. Evaluating soil quality in tropical agroecosystems of Colombia

- using NIRS. *Soil Biology and Biochemistry* 2005;37:889–98. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2004.09.009>.
- [14] Hedde M, Lavelle † P, Joffre R, Jiménez JJ, Decaëns T. Specific functional signature in soil macro-invertebrate biostructures. *Functional Ecology* 2005;19:785–93. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01026.x>.
- [15] Chauvel A, Grimaldi M, Barros E, Blanchart E, Desjardins T, Sarrazin M, et al. Pasture damage by an Amazonian earthworm. *Nature* 1999;398. <https://doi.org/10.1038/17946>.
- [16] Gunderson LH, Holling CS. *Panarchy. Understanding transformations in human and natural systems*. Washington, D.C., USA: Island Press; 2002.
- [17] Lavelle P, Spain A, Fonte S, Bedano JC, Blanchart E, Galindo V, et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. *Acta Oecologica* 2020;105:103561. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAO.2020.103561>.
- [18] Orgiazzi A, Singh B, Wall D, Barrios E, Kandeler E, Moreira F, et al. *Global soil biodiversity atlas*. 1st ed. Luxembourg: JRC Publications Repository; 2016. 10.2788/2613
- [19] Lubbers IM, van Groenigen KJ, Fonte SJ, Six J, Brussaard L, van Groenigen JW. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms. *Nature Climate Change* 2013;3. <https://doi.org/10.1038/nclimate1692>.