

Giovanna del Pilar Fuentes Medina

Calidad del suelo, una aproximación histórico-epistemológica como programa de investigación

Resumen: *Este artículo analiza la construcción histórica y epistemológica del concepto de calidad del suelo mediante el marco metodológico de los programas de investigación científica de Imre Lakatos. Se aborda la ambigüedad teórica de este concepto, envuelto históricamente entre enfoques productivistas y paradigmas contemporáneos de sostenibilidad ecológica, lo que ha fragmentado su definición en la edafología y la pedología. A partir de una reconstrucción crítica y discursiva de la literatura especializada, se demuestra que los postulados de la productividad en términos de las funciones del suelo operan como el núcleo firme del programa, mientras que los indicadores físico-químicos, las variables biológicas y las metodologías digitales constituyen un cinturón protector dinámico. Los resultados evidencian que el programa de la calidad del suelo posee una heurística positiva robusta, la cual ha permitido asimilar anomalías empíricas e integrar las demandas críticas de la crisis ambiental global sin neutralizar sus bases epistemológicas. Se concluye que el concepto no representa una herramienta técnica, sino un programa de investigación teórica y heurísticamente progresivo. Su vigencia radica en una notable capacidad de adaptación interdisciplinaria, consolidándose como un eje conceptual vinculante para la formulación de políticas de gobernanza y modelos de sostenibilidad.*

Palabras Clave: *Calidad de suelo, historia interna, cinturón de seguridad, heurísticas, indicadores.*

Abstract: *This article analyzes the historical and epistemological construction of the soil quality concept through the methodological framework of Imre Lakatos's scientific research programs. It addresses the theoretical ambiguity of this concept, which is historically entangled between productivist approaches and contemporary paradigms of ecological sustainability, leading to its fragmented definition within edaphology and pedology. Based on a critical and discursive reconstruction of the specialized literature, it is demonstrated that the postulates of productivity—in terms of soil functions—operate as the program's hard core, whereas physicochemical indicators, biological variables, and digital methodologies constitute a dynamic protective belt. The results evidence that the soil quality program possesses a robust positive heuristic, which has enabled it to assimilate empirical anomalies and integrate the critical demands of the global environmental crisis without neutralizing its epistemological foundations. It is concluded that the concept does not merely represent a technical tool, but rather a theoretically and heuristically progressive research program. Its enduring relevance lies in a remarkable capacity for interdisciplinary adaptation, consolidating itself*



as a binding conceptual axis for the formulation of governance policies and sustainability models.

Keywords: *Soil quality, internal history, protective belt, heuristics, indicators.*

Introducción

En Ciencias Agrarias, *la calidad del suelo* es un concepto reciente con el que se pretende comprender y modelar el comportamiento del suelo para mejorar los planes de manejo de fertilización y plagas, optimizar su productividad y tomar mejores decisiones para los servicios ecosistémicos que presenta y que benefician a la humanidad. En consecuencia, hacer un estudio en el que se incluya un desarrollo histórico y epistemológico, significa poder acceder a marcos conceptuales y metodológicos que expliquen cómo ha sido este proceso de construcción de teorías dentro de la ciencia del suelo desde dos disciplinas íntimamente relacionadas, pero de perspectivas diferentes, como son la edafología y la pedología. Lo anterior permite incidir en el mejoramiento de los procesos de enseñanza-aprendizaje para elaborar una didáctica útil para esta disciplina (Franco et al. 2020, 14).

En el presente artículo se hace una aproximación epistemológica al concepto de calidad de suelo, retomando principalmente la noción de historia de las ciencias formulada por I. Lakatos (1983, 134-158). A través de este lente, se demuestra que la producción de conocimiento edafológico no progresa mediante la acumulación lineal de verdades absolutas e irrefutables, visión estática defendida por el inductivismo ingenuo de raíz baconiana (Chalmers 1999, 11), sino a través de un diálogo crítico de conjeturas y refutaciones institucionales. En este sentido, la reconstrucción histórica del concepto permite comprender la ciencia del suelo como un entramado conceptual regido por una estructura epistémica fuertemente organizada, donde la validación teórica depende de la evaluación crítica intra e interteórica de la comunidad académica, siguiendo la metodología investigativa lakatosiana.

En ese orden de ideas, el concepto de calidad del suelo se estructura a partir de un núcleo firme constituido por los postulados universales de la productividad centrada en las funciones ecosistémicas, el cual se declara metodológicamente infalsable por decisión de sus protagonistas. Este centro teórico se encuentra rodeado por un cinturón protector dinámico, compuesto por hipótesis auxiliares, indicadores físico-químicos y variables biológicas que reciben el impacto directo de las contrastaciones experimentales. Así, el programa asimila las anomalías empíricas no mediante la refutación inmediata del núcleo, sino mediante la modificación heurística de sus componentes periféricos. El avance del programa está regulado por una heurística negativa que prohíbe aplicar el *Modus Tollens* al centro firme, y una heurística positiva que actúa como un conjunto sistemático de pistas e instrumentos —como las metodologías digitales— diseñados para expandir el contenido empírico del cinturón protector ante el desafío de teorías antagonistas (Lakatos 1983, 65, Páez y Samaniego 2021, 112).

Para comenzar esta reconstrucción, es indispensable delimitar la historia externa del programa, es decir, el contexto socioambiental y los factores no conceptuales que han impulsado su desarrollo.

Las transformaciones antrópicas en diversos hábitats, que abarcan desde paisajes vírgenes hasta sistemas agropecuarios bajo un uso intensivo de la tierra, han generado procesos críticos de degradación ambiental y pérdida de biodiversidad (Vogel *et al.* 2018, 83; Lal 2012, 200; Wang et al. 2023, 430). Este impacto antropogénico global ha situado a la calidad del suelo como un componente de análisis indispensable de la calidad ambiental, equiparable a los otros dos componentes de agua y aire (Andrews y Carroll 2001, 1575; Bünemann et al. 2018, 105). Esta urgencia social e histórica es precisamente la fuerza externa que desafía al programa de investigación edafológico, obligándolo a desplegar su heurística para asimilar nuevas anomalías y justificar su progresividad en los debates contemporáneos sobre la sostenibilidad.

En este sentido, se hace necesario establecer el significado que tienen cada uno de los componentes de la calidad ambiental. La comunidad

científica definió, de común acuerdo, que la calidad del agua y el aire estará dada por el grado de contaminación que impacta directamente sobre la salud y el consumo humano y animal, incluyendo los ecosistemas naturales (Carter et al. 1997, 2; Davinson 2000, 343; Bünemann et al. 2018, 106). En contraste, el concepto de calidad del suelo ha sido objeto de continuas reflexiones dado su alcance e implicaciones algunas de las cuales se mostrarán en el proceso de construcción del concepto, como parte de un programa de investigación lakatosiano (Doran y Parkin 1994, 7; Seybold et al. 1998, 388; Andrews et al. 2004, 1945; Millennium Ecosystem Assessment 2005, 92; Adhikari y Hartemink 2016, 262; Vidal et al. 2017, 5503; Thoumazeau et al. 2019, 101; Bünemann et al. 2018, 106).

Historia interna

De acuerdo con Lakatos (1983, 134), se hace una reconstrucción desde su historia interna, la cual consiste en la descripción de los hechos que contribuyeron significativamente a la proposición del concepto que se discute. De este modo, permite mostrar el crecimiento objetivo de un programa de investigación.

Inicialmente, el interés por comprender el suelo tuvo un tinte económico ligado a la producción de alimentos. Sin embargo, en publicaciones datadas antes de 1880, además de considerarlo como el medio de crecimiento para las plantas, se le definió como capas de roca meteorizada, dando lugar a los primeros conceptos de perfiles y horizontes del suelo (Brevik et al. 2016, 112). Posteriormente, estos mismos autores mencionan que los servicios geológicos en Estados Unidos se involucraron en su estudio, lo que llevó a E.W. Hilgard a formular ideas similares a las propuestas por el ruso V.V. Dokuchaev, reconocido hoy en día como el padre de la edafología moderna. Gracias a la influencia de C.F. Marbut, las ideas rusas sobre la génesis y clasificación de los suelos desplazaron en gran medida las orientaciones meramente geológicas iniciales, de modo que a comienzos del siglo XX se fundó el *National Cooperative Soil Survey* (NCSS), llevando a cabo el primer estudio detallado de suelos

organizado a nivel nacional bajo la dirección del M. Whitney.

En consonancia con lo anterior, las investigaciones sobre los problemas de erosión del suelo cobraron sentido durante la década de 1930, cuando Estados Unidos sufrió una gran oleada de polvo, conocida como *Dust Bowl*, causada por el mal manejo del suelo en las grandes plantaciones. Esto impulsó tanto la cantidad de estudiantes en carreras relacionadas a la edafología, como el nacimiento de diversos métodos y sistemas de clasificación de suelos. De modo que, para la década de 1970, científicos como H. Jenny, R.W. Simonson, D.L. Jonson y D. Watson-Stenger complementaron y propusieron importantes modelos de factores de formación del suelo a nivel mundial. Adicionalmente, el uso de la información recabada trascendió el ámbito agrícola para servir de base fundamental en la planificación del uso y la geomorfología del suelo, así como las interacciones entre este y la salud humana (Brevik et al. 2016, 115-119).

Para finales del siglo XX, personas autoras como Bogheim et al. (2005, 26) y Brevik, et al. (2016b, 129), al realizar su revisión histórica, indicaron que los múltiples estudios realizados, tanto en edafología como en pedología, se basaron en el uso de métodos con instrumentación geofísica, sensores remotos, sistemas de información geográfica y sistemas de posicionamiento global (GPS). Con esto, se inició la investigación en mapeo digital de suelos, con el fin de comprender la distribución y variabilidad de los suelos del mundo, poniendo este conocimiento a disposición del público en general. Es de resaltar que dicho conocimiento se expandió a nuevas áreas como la arqueología y la sostenibilidad ambiental. En este sentido, la importancia de los suelos empezó a ser reconocida por varios eventos académicos y políticos internacionales, en los cuales se discutió su concepto, su amplitud y su forma de evaluación, llegando a ser declarado el año 2015 como el *Año Internacional de los Suelos* por las Naciones Unidas.

Si bien se ha hecho un esfuerzo significativo por comprender y dimensionar la importancia del suelo para la humanidad, resulta necesario considerar la evolución histórica de su conceptualización, especialmente en relación con

la sostenibilidad. En este contexto, la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas (1987) estableció que el desarrollo sostenible implica «satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades» (Bossa et al. 2023, 3). Desde esta perspectiva, la evaluación del suelo requiere metodologías cuantitativas que describan con precisión su estado funcional y ecológico, superando los enfoques tradicionales, mayoritariamente descriptivos y basados en observaciones subjetivas, que limitaban la eficacia en la toma de decisiones orientadas a la sostenibilidad ambiental y social.

De acuerdo con Karlen et al. (2003, 146) en los años setenta se sugirió la necesidad de desarrollar un concepto de calidad del suelo consistente con las múltiples funciones que estos pueden proveer. Para la década siguiente, el Comité Permanente del Senado Canadiense sobre Agricultura presentó un reporte sobre la degradación edáfica, permitiendo iniciar la discusión sobre dicho concepto sin dejar de lado la preocupación por la productividad agrícola y la disminución de las áreas erosionadas (Bautista et al. 2004, 92). En este sentido, la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés) (1987), citado por Doran y Parkin (1994, 6), definió por primera vez la calidad del suelo como atributos inherentes a este, inferidos por sus características o por observaciones indirectas.

En la década de los años noventa, varias personas autoras apuntaron a proponer nuevos y/o mejores conceptos como respuesta al aumento del interés global por el manejo sostenible en el uso de la tierra (Karlen et al. 2003, 8; Bautista et al. 2004, 93). Entre ellos, se resalta la definición realizada por Larson y Pierce (1994, 39), quienes indicaron que la calidad del suelo debía definirse como la capacidad que tiene este para funcionar dentro de los límites de un ecosistema e interactuar positivamente con otros circundantes. Con este enfoque se desconectó la calidad del suelo de su productividad (Bünemann et al. 2018, 107).

No obstante, otras perspectivas como la de Budd (1992, 30) ya habían planteado años atrás, que la definición tenía que implicar, de alguna manera, los criterios de sostenibilidad. En este

sentido es que Arshad y Coen (1992, 26) la definieron como «la capacidad para aceptar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano». Años más adelante, Buol (1995, 27), por el contrario, mencionó que la calidad debía estar ligada con el uso del suelo y debía basarse en la «capacidad que tiene para proporcionar elementos esenciales, puesto que son finitos y limitan su productividad; finalmente el suelo es un recurso no renovable». Sin embargo, consideraciones como estas no se hicieron realidad hasta pasados los primeros años del siglo XXI.

Debido a que las definiciones generadas se limitaban únicamente a mencionar la capacidad de funcionar que el suelo debía tener tanto en el presente y en el futuro, no se llegó a un consenso sobre cuáles podrían llegar a ser tales funciones y cómo mantenerlas en el tiempo (Doran y Perkin 1994, 29). Por ello, estos autores propusieron desde comienzos de la década de 1990, que dicho término debía involucrar las funciones establecidas en la Conferencia para la Evaluación y Monitoreo de la Calidad del Suelo de 1991. En este marco, se definió como «la capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema para sustentar la productividad biológica, mantenimiento de la calidad ambiental y promoción de la salud de plantas y animales». Adicionalmente, estos autores indicaron que los suelos tienen varios niveles de calidad definidos por «características inherentes o naturales estables, relacionadas con los factores formadores y los cambios dinámicos inducidos por su manejo». En consecuencia, es fundamental detectar cambios en el componente dinámico para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de gestión del suelo. Es esta última la definición de calidad de este recurso que más se reporta en las investigaciones publicadas en revistas indexadas, de acuerdo con Bünemann et al. (2018, 105) y con Mizuta et al. (2021, 11).

Hacia finales del siglo XX, los marcos conceptuales establecidos permitieron reconocer que la calidad del suelo comprende tanto componentes intrínsecos como relacionados con su uso. No obstante, estos enfoques han evolucionado y se han adaptado progresivamente, en función del creciente conocimiento sobre el suelo como un

elemento clave para evaluar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En efecto, la definición dada por Doran y Perkin (1994, 7) se adaptó, estableciéndose como factor común de las definiciones anteriores así:

La capacidad de una clase específica de suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o intervenido para sostener las plantas y la productividad animal, mantener o mejorar la calidad del aire, el agua y para soportar la salud humana y su hábitat. (Seybold et al. 1998, 388; Karlen et al. 1997, 5)

Esta noción se refiere a la multifuncionalidad del suelo, refleja tanto la complejidad y especificidad de los ecosistemas terrestres, así como la relación entre los servicios ecosistémicos (soporte, provisión, regulación y cultura) y las funciones en los que se basan. Además, es una definición que hasta el día de hoy sigue evolucionando (Singer y Ewing 2000, 272; Andrews et al. 2001, 26; Bautista et al. 2004, 92; Millennium Ecosystem Assessment 2005, 17; Adhikari y Hartemink 2016, 103; de Paul Obade y Lal 2012, 96; Carron et al. 2016, 55; Bünnemann et al. 2018, 106; Thoumazeau et al. 2019, 101; Mizuta et al. 2021, 11).

Construcción del concepto calidad del suelo

A partir de las discusiones teóricas precedentes, el concepto de calidad del suelo se formaliza como la estructura central de un programa de investigación científica de orientación lakatosiana. En este marco, el núcleo firme del programa queda constituido por los postulados axiomáticos que definen las capacidades intrínsecas del recurso. De acuerdo con Doran y Perkin (1994, 7), estas tesis fundamentales decretan de manera irrefutable que un suelo de calidad debe poseer la habilidad para potenciar la productividad biológica, amortiguar los impactos contaminantes, proceso que en los últimos años se ha denominado resiliencia (Jiménez y González 2006, 129; Mizuta et al. 2021, 11), interactuar

simbióticamente con plantas y animales, y contribuir a la salud humana. Adicionalmente, de las bases de este núcleo se deriva que el entramado de evaluación edafológica debe operar bajo criterios de influencia metodológica, observabilidad empírica, capacidad de prueba y una estricta sensibilidad para registrar variaciones espaciotemporales (Karlen et al. 1997, 6).

Para salvaguardar la integridad de este núcleo firme ante eventuales anomalías empíricas, la heurística del programa articula un cinturón protector dinámico compuesto por hipótesis auxiliares y enunciados observacionales. Bajo esta perspectiva, el suelo debe considerarse como un componente indispensable de la biosfera que actúa en la interfaz entre el agua y el aire; al ser un recurso no renovable, sus funciones específicas asumen el rol de amortiguar los impactos del medio (Karlen et al. 1997, 6; Jiménez y González 2006, 129). De este modo, el cinturón protector demuestra su progresividad teórica al detallar los mecanismos reguladores del recurso: sostiene la diversidad ecosistémica proveyendo el sustrato físico, químico y biológico para el flujo energético y de nutrientes; modera la escorrentía e infiltración de solutos críticos como el nitrógeno y el fósforo; y resguarda las matrices del aire y el agua a través de procesos físico-químicos de filtración, degradación, inmovilización y detoxificación de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas (Karlen et al. 1997, 6). Finalmente, esta estructura auxiliar extiende su dominio hacia dimensiones antropogénicas al consolidarse como el soporte material de obras de ingeniería, asentamientos humanos y patrimonios arqueológicos, absorbiendo así las demandas de contrastación experimental sin comprometer los dogmas del núcleo central.

Aunado a lo anterior, la incorporación de los lineamientos de la FAO (2015) permite evidenciar el proceso de actualización, adaptación y progreso diacrónico del cinturón protector en el tiempo. Al establecer que el suelo provee servicios ecosistémicos cruciales como la regulación de inundaciones, la retención de carbono, el suministro de fibras y combustibles, así como la conservación de herencias culturales, recursos genéticos y productos farmacéuticos, el programa expande su contenido empírico para blindar

el núcleo firme contra eventuales anomalías o procesos de falsación. En este sentido, el concepto contemporáneo de salud del suelo se integra de manera vinculante en el paradigma de la calidad del suelo, aportando indicadores dinámicos esenciales para evaluar el estado operativo del recurso. Estos indicadores de medición no solo representan una condición biofísica particular, sino que sintetizan información matemática y empírica sobre las tendencias y cambios de dicha condición, facilitando la toma de decisiones metodológicas dentro del programa (Estrada et al. 2017, 814).

No obstante, la evaluación precisa de estos atributos exige la obtención de datos altamente confiables; una tarea que suele verse obstaculizada por las complejidades geográficas intrínsecas de cada región, así como por los elevados costos y las restricciones técnicas asociadas a su adquisición (Thomazeau et al. 2019b, 431). Para mitigar estas limitaciones metodológicas y asegurar que el cinturón protector funcione como una base experimental sólida, se adoptan los criterios normativos propuestos originalmente por Doran y Parkin (1994, 7). De acuerdo con estas personas autoras, los indicadores edáficos seleccionados deben cumplir con un riguroso perfil técnico: describir con precisión los procesos ecosistémicos; integrar de forma holística las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato; ser accesibles y reproducibles para diversos usuarios en condiciones de campo; demostrar una alta sensibilidad ante las variaciones climáticas o de manejo; y, finalmente, poseer la capacidad de incorporarse de manera armónica en las bases de datos científicas preexistentes.

Posteriormente, personas autoras como Hünemeyer et al. (1997, 22) muestran que los indicadores también deben permitir el análisis de la situación actual, la identificación de puntos críticos respecto al desarrollo sostenible, la caracterización de los posibles impactos antes de una intervención, el monitoreo del impacto de las intervenciones antrópicas y la ayuda para determinar si el uso del recurso es sostenible. Se suma como criterio, la sensibilidad a los cambios positivos o negativos que sufren los suelos. Así, se espera que se construyan índices de calidad, cuyos criterios más importantes sean de utilidad

y accesibilidad para especialistas agrícolas, productores, conservacionistas y formuladores de políticas; además de sensibles a la gestión y variaciones climáticas (Doran y Parkin 1994, 9).

Los anteriores postulados han constituido la base teórica que define, explica y predice el comportamiento y las características de la calidad del suelo. De esta manera, se configura un núcleo firme y consolidado que ha permanecido vigente gracias al apoyo conceptual del cinturón protector, el cual se ha adaptado y ajustado en el tiempo como programa de investigación (Fuentes y Muñoz 2003, 75).

Heurísticas

Las aproximaciones conceptuales previas han permitido a las personas investigadoras adelantar una cantidad significativa de trabajos experimentales destinados a expandir las capacidades predictivas del cinturón protector a través de la articulación de las heurísticas del programa (Páez y Samaniego 2021, 114). En este sentido, la organización metodológica de los indicadores edáficos responde a una planificación heurística que clasifica las propiedades en tres grupos diferenciados según su escala de variación temporal (Vogel et al. 2018, 87). El primer grupo lo constituyen las propiedades inherentes al suelo, tales como la textura y la profundidad, cuyos cambios estructurales solo son perceptibles tras varias décadas de evolución. El segundo grupo comprende las propiedades dinámicas o variables, entre las que destacan el contenido de agua, la temperatura, la actividad microbiológica y el potencial REDOX, parámetros que oscilan en lapsos de minutos a días como respuesta directa a fuerzas externas. Finalmente, el tercer grupo está representado por las características funcionales, las cuales exhiben una tasa de cambio intermedia, de días a meses, ante las intervenciones antrópicas o los procesos internos; en esta categoría se inscriben atributos como la estabilidad estructural, el porcentaje de macroporos, la materia orgánica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), los mesoorganismos y las relaciones hongo-bacteria.

Para sistematizar esta diversidad fáctica y guiar la investigación teórica hacia resultados coherentes, el programa recurre a una heurística positiva orientada a la construcción de índices de evaluación basados en un Conjunto Mínimo de Datos (CMD). Este mecanismo matemático permite establecer una escala numérica estandarizada para valorar con precisión la calidad del suelo. La estrategia de diseño metodológico de dicho conjunto inicia con una preselección de los indicadores más apropiados mediante el juicio de expertos (Doran y Parkin 1994, 14; Thoumazeau et al. 2019b, 431). Posteriormente, este espectro de variables se reduce a través de rigurosos tratamientos estadísticos empíricos, priorizando un encadenamiento progresivo de técnicas analíticas multivariadas.

De este modo, se emplean de forma continua el Análisis de Componentes Principales (ACP), el Análisis de Redundancia (AR), el Análisis Discriminante (AD) y los modelos de regresión lineal múltiple, metodologías que validan la representatividad de la matriz de datos y eliminan la redundancia informativa (Andrews y Carroll 2001, 1574; Lima et al. 2013, 196; Grimaldi et al. 2014, 320; Kosmas et al. 2014, 962; Carron et al. 2016, 57; Caguasango et al. 2016, 572; Peerawat et al. 2018, 99; Thoumazeau et al. 2019b, 433). La consolidación de estos índices no solo optimiza la comprensión de los procesos internos del suelo para proponer manejos agronómicos adecuados, sino que funciona como un instrumento de alto poder heurístico capaz de incidir en la promulgación de políticas públicas vinculadas a la gobernanza y al uso sostenible de la tierra (de Paul Obade y Lal 2016, 430).

Propuestas Alternativas

Aunque la comunidad científica ha consensuado un concepto de calidad del suelo, en algunos estudios este término se utiliza como sinónimo de fertilidad o de salud del suelo. En otros casos, se emplean expresiones como *capacidad del suelo* u otros conceptos relacionados. Esta diversidad en el uso se evidencia en los resultados de Mizuta et al. (2021, 5), quienes realizaron una revisión histórica en revistas

indexadas en *Web of Science*. Sin embargo, para este análisis solamente se tratan los tres de mayor citación y trazabilidad: fertilidad, calidad y salud del suelo. Por tanto, es necesario establecer la diferencia entre fertilidad y salud en relación con la calidad del suelo, así como determinar hasta qué punto, estos pueden constituir programas de investigación en competencia.

La fertilidad de suelo es el primer término en aparecer en publicaciones indexadas (Mizuta et al. 2021, 5). Además, tradicionalmente se ha relacionado con la capacidad de abastecer de nutrientes al cultivo, asegurando su crecimiento y desarrollo, lo cual implica la integración de atributos químicos, físicos y biológicos (Astier et al. 2002, 606). De esta manera, se asocia con la capacidad para producir cosechas sanas y abundantes o sostener una vegetación natural en condiciones cercanas a las óptimas. Estrada et al. (2017, 814), distinguen entre fertilidad química, física y biológica, aspectos que conllevan a definir la fertilidad de una manera más exhaustiva e integral. Bajo este enfoque, un suelo fértil es aquel que conserva las propiedades físicas, químicas y biológicas deseables mientras que se abastece adecuadamente de agua, nutrientes y provee sostén mecánico para las plantas.

Bünemann et al. (2018, 107) indican que la FAO define el suelo desde una concepción de fertilidad, el cual tiene la capacidad para suministrar los nutrientes esenciales y el agua para las plantas en cantidades adecuadas, lo que proporciona su crecimiento y reproducción, en ausencia de sustancias tóxicas que puedan inhibir su desarrollo. Por otra parte, para Mäder (2002, 1695), la fertilidad consiste en proveer nutrientes esenciales para el crecimiento de un cultivo, esto permite sostener una comunidad biótica diversa y activa, así como exhibir una estructura típica inalterada como resultado de la descomposición de la materia orgánica. Estas concepciones, frente a las de calidad de suelo, son química y físicamente limitadas únicamente a la provisión de nutrientes y agua a los cultivos (Bünemann et al. 2018, 108).

Lo anterior lleva a ignorar las demás funciones del suelo y los servicios ecosistémicos. Mizuta et al. (2021, 9) mencionan que este término empieza a tener un cambio descendente

en el número de publicaciones cuarenta años después de su aparición en 1908. Así, el día de hoy se sigue haciendo alusión al mismo concepto en términos productivos, pero este no se puede considerar como programa de investigación en competencia, ya que muchos de sus autores manifiestan que la única forma de medir dicha fertilidad es mediante indicadores de calidad de suelo, de modo que es más factible que se incorpore el término como una extensión al primer postulado planteado anteriormente.

En cuanto a salud del suelo, esta se ha usado como sinónimo de calidad de suelo, a pesar de los amplios contextos en los que se inscribe este último (Acton y Gregorich 1995, 15; Astier et al. 2002, 606; Kibblewhite et al. 2008, 686). Con la finalidad de comprender esta interpretación, Bünemann et al. (2018, 106) reportaron que este intercambio sucedió por primera vez en el reporte del programa para evaluar y monitorear la calidad del suelo en Canadá. Allí, definen la salud o calidad del suelo desde una perspectiva agrícola, como la aptitud del suelo para soportar los cultivos sin llegar a degradarse ni a dañar al ambiente.

Mientras tanto, Kibblewhite et al. (2008, 685) enmarcan su concepto en características esenciales para la sostenibilidad de la agricultura, definiendo a un suelo agrícola saludable como aquel capaz de soportar la producción de alimento y fibras con suficiente calidad. Esto le permite a la humanidad encontrar sus requerimientos, junto con una continua entrega de servicios ecosistémicos esenciales para la calidad de vida y la conservación de la biodiversidad. Para estos autores, el concepto de salud del suelo es integrado porque lo consideran como un sistema que presta servicios, tiene funciones ensambladas a sus procesos, es decir, es un hábitat y tiene factores que lo controlan, como su origen y nivel de evolución, los nutrientes, los organismos y sus funciones.

En el contexto anterior, para encontrar una diferencia clara, Bünemann et al. (2008, 106), establecen que la calidad del suelo se centra más en la capacidad de este para encontrar necesidades humanas definidas como, por ejemplo, el crecimiento de un cultivo en particular; mientras que la salud se enfoca en su capacidad continua

para sostener el crecimiento de plantas y mantener sus funciones. Para Moebius-Clune et al. (2016, 30) la diferencia radica en que la calidad del suelo incluye propiedades inherentes y dinámicas, siendo estas últimas las que corresponden a la salud de este. No obstante, otras personas autoras como Romig et al. (1996, 40) indican que la calidad del suelo es un término usado por los investigadores, mientras que la salud del suelo es preferida por los agricultores.

Por otra parte, algunas personas autoras como Astier et al. (2002, 606) usan indiscriminadamente los términos calidad del suelo y salud del suelo, e incluso afirman que el concepto de calidad del suelo, como se ha definido hasta ahora, incluye tres principios importantes. El primero es la productividad sin que el suelo pierda sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El segundo corresponde a la calidad del ambiente, en la que un suelo atenúa el efecto de los contaminantes y patógenos, evitando el daño hacia el exterior e incluyendo los servicios ecosistémicos. En el tercero, la salud se refiere a la producción de alimentos sanos y nutritivos para los seres humanos y otros organismos. De acuerdo con Mizuta et al. (2021, 13), ambos conceptos comparten objetivos comunes cuando apuntan a la gestión sostenible de los recursos del suelo bajo presiones naturales y antropogénicas. Además, en la revisión realizada, la mayoría de las publicaciones consideran que los términos se han usado indistintamente. De este modo, este concepto tampoco constituye un programa de investigación en competencia.

Estos investigadores mencionan que, en los últimos años, ha ido en aumento el número de publicaciones relacionadas con la sostenibilidad y resiliencia del suelo. Este incremento se puede asumir, no como el surgimiento de nuevos programas en competencia para la calidad del suelo, sino más bien posibilidades de expansión de los postulados del cinturón de seguridad o del mismo núcleo firme. Por lo tanto, estos estudios se enmarcan en la preocupación global por cumplir los objetivos de desarrollo sostenible, asunto que a comienzos de la década de los años setenta, empezó a dar origen a este programa de investigación.

Progresión del programa

Este es un programa que puede considerarse exitoso y progresivo, porque ha logrado mantener sus postulados originales en pie a pesar de las múltiples críticas que ha recibido durante más de cuarenta años de publicaciones en torno al tema. En consonancia con Mizuta et al. (2021, 9), el concepto de calidad del suelo, que tiene una clara historia de ampliación en su definición, orientada a abordar desafíos edáficos y ambientales de elevada complejidad, que han ayudado a consolidar el núcleo firme establecido. De este modo, el campo de acción del programa se delimita rigurosamente en torno a la resolución de problemáticas vinculadas al recurso suelo y su contribución a la sostenibilidad global de la humanidad desde disciplinas como la edafología y la ecología. Aunque el programa margina de su núcleo las tesis ontológicas de la geología y la pedología, estas dos disciplinas no solo operan como herramientas analíticas complementarias para la interpretación de resultados experimentales, sino que constituyen el fundamento fundacional e histórico sobre el cual se erige la concepción contemporánea del recurso edáfico.

Por lo anterior, es que la calidad del suelo no resuelve problemas relacionados con la clasificación taxonómica de este, pero puede justificar la necesidad de adopción de nuevas clases, como los Tecnosoles o Antroposoles. Pero, se pueden llevar a cabo estudios basados en análisis taxonómicos en los que se pueda evaluar la calidad asumiendo, por ejemplo, que el tipo de humus puede ser escalado y correlacionado con datos morfológicos y químicos de perfiles superficiales característicos de los bosques. De modo que, de acuerdo con el grado de descomposición de la hojarasca y el desarrollo de estructura sobre el horizonte A, se pueda establecer un índice de Humus, con el que se monitoree el funcionamiento del bosque a pesar del cambio climático (Ponge, et al., 2002, 1997; Zanella et al. 2018, 57). Asimismo, puede resolver situaciones relacionadas con planes de manejo para mejorar la fertilidad, el uso y vocación de la tierra y, en ese sentido, generar políticas nacionales de gestión. Entre estas iniciativas destacan el índice RMQS en Francia y la herramienta SINDI en Nueva

Zelanda, un evaluador de indicadores basado en datos registrados en línea. También está el índice SQARE de Irlanda, ENVASSO y RECARE en la Unión Europea, MESMIS en México y muchos otros relacionados por Bünemann et al., (2018, 110), cuando hace una revisión crítica sobre los alcances y percepciones de la calidad del suelo en el mundo.

Conclusiones

El análisis histórico y epistemológico del concepto de calidad del suelo evidencia que su construcción ha sido un proceso dinámico, enmarcado en un programa de investigación lakatosiano progresivo. Este concepto, lejos de ser estático, ha evolucionado desde enfoques centrados en la productividad agrícola hacia una visión integral que reconoce la multifuncionalidad del suelo y su papel esencial en la sostenibilidad ambiental. La calidad de este se ha consolidado como un núcleo firme, protegido por postulados que destacan su capacidad para sostener la productividad biológica, atenuar contaminantes y contribuir al bienestar humano, complementados por un cinturón protector que, en el tiempo, se adapta a nuevas demandas científicas y sociales.

Asimismo, las revisiones históricas muestran que, aunque términos como fertilidad y salud del suelo han coexistido y, en ocasiones, se han usado como sinónimos, no constituyen programas de investigación en competencia. Por el contrario, se integran como extensiones o componentes del concepto de calidad, reforzando su carácter holístico. Del mismo modo, la incorporación de indicadores físicos, químicos y biológicos, junto con metodologías cuantitativas, ha permitido avanzar hacia evaluaciones más precisas y comparables, fundamentales para la gestión sostenible del recurso.

Finalmente, la calidad del suelo se proyecta como un concepto vigente y en expansión, capaz de responder a los retos globales relacionados con el cambio climático, la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad. Su progresión confirma la relevancia de mantener enfoques interdisciplinarios que integren ciencia,

tecnología y políticas públicas, garantizando que este recurso no renovable continúe aportando servicios ecosistémicos esenciales para las generaciones presentes y futuras.

Referencias

- Acton, D. F., y L. J. Gregorich, comps. 1995. *The Health of Our Soils: Toward Sustainable Agriculture in Canada*. Ottawa: Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food.
- Adhikari, Krishna, y Alfred E. Hartemink. 2016. «Linking Soils to Ecosystem Services: A Global Review». *Geoderma* 262: 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Andrews, Susan S., y Charles R. Carroll. 2001. «Designing a Soil Quality Assessment Tool for Sustainable Agroecosystem Management» *Ecological Applications* 11, no. 6: 1573–1585. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[1573:DASQAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[1573:DASQAT]2.0.CO;2)
- Andrews, Susan S., Douglas L. Karlen y Cynthia A. Cambardella. 2004. «The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method». *Soil Science Society of America Journal* 68, no. 6: 1945–1962.
- Arshad, Muhammad A. y Geoffrey M. Coen. 1992. «Characterization of Soil Quality: Physical and Chemical Criteria.» *American Journal of Alternative Agriculture* 7 (1-2): 25–31. <https://doi.org/10.1017/S0889189300004410>
- Astier, Marta, Manuel Maass y Jorge Etchevers. 2002. «Derivación de Indicadores de Calidad de Suelos en el Contexto de la Agricultura Sustentable». *Agrociencia* 36, no. 5: 605–620.
- Bautista, A., Jorge Etchevers, Rafael F. del Castillo, y Gutiérrez, C. 2004. «La Calidad del Suelo y sus Indicadores». *Ecosistemas* 13, no. 2: 90–97. <https://www.redalyc.org/pdf/540/54013210.pdf>
- Bogheim, James G., Alexander N., Gennadiyev, David Hammer, y Jhon P. Tandarich. 2005. «Historical Development of Key Concepts in Pedology». *Geoderma* 124, no. 1-2: 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.004>
- Bossa-Benavidez, Juan, Jorge D. Meza, Daniel Ramos-Franco y Harold Cohen-Padilla. 2023. «La Sostenibilidad en Colombia Frente al Desarrollo Sostenible en el Mundo: Una Revisión Bibliométrica para el Análisis del Entorno». *Revista Universidad y Empresa* 25, no. 44: 1–29. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/empresa/a.12770>
- Brevik, Eric C., Thomas E. Fenton y John A. Homburg. 2016. «Historical Highlights in American Soil Science – Prehistory to the 1970s». *Catena* 146: 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.003>
- Brevik, Eric C., John A. Homburg, Bradley A. Miller, Thomas E. Fenton, John A. Doolittle y Stephen J. Indorante. 2016. «Select Highlights in American Soil Science History from the 1980s to the Mid-2010s». *Catena* 146: 128–146. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.021>
- Budd, William W. 1992. «What Capacity the Land?». *Journal of Soil and Water Conservation* 47: 28–31. <https://doi.org/10.1080/00224561.1992.12456668>
- Bünemann, Else K., Giulia Bongiorno, Bai Zhanguo, Rachel E. Creamer, Gerlinde De Deyn, Ron de Goede, Luuk Fleskens, Violette Geissen, Thom.W. Kuiper, Paul Mäder, Mirjam Pulleman, Wijnand Sukkel, Jhan Willem van Groenigen, y Lijbert Brussaard. 2018. «Soil Quality: A Critical Review». *Soil Biology and Biochemistry* 120: 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Buol, Stanley W. 1995. «Sustainability of Soil Use». *Annual Review of Ecology and Systematics* 26: 25–44. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.26.110195.000325>
- Caguasango, S., Yolanda Rubiano y Jaime Bernal. 2016. «Ajuste de un Modelo Autoregresivo para la Producción de Volumen en Plantaciones de Acacia en Colombia». En *Memorias del XXI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*, 24–28 de octubre, Quito, Ecuador.
- Carron, Marc Philippe, Q. Auriac, Didier Snoeck, Cécile Villenave, Érik Blanchart, Fabienne. Ribeyre, Raphaël Marichal, M. Darminto y Jean Pierre Caliman. 2016. «Do Impacts of Organic Residues on Soil Quality Extend Beyond the Deposition Area under Oil Palm?». *European Journal of Soil Biology* 75: 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.04.011>
- Carter, Martin R., Eduard G. Gregorich, Darwin W. Anderson, Jhon Walsh Doran, Henry Henry Janzel y Francis John Pierce. 1997. «Concepts of Soil Quality and Their Significance». *Developments in Soil Science* 25: 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80028-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80028-1)
- Chalmers, Alan F. 1999. *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*. Tercera Edición. Traducido por Pablo Stafforini. Madrid: Siglo XXI Editores.

- Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. 1987. *Nuestro futuro común*. Informe Brundtland. Nueva York: Naciones Unidas.
- Davidson, Donald A. 2000. «Soil Quality Assessment: Recent Advances and Controversies». *Progress in Environmental Science* 2: 342–350.
- de Paul Obade, Vincent, y Rattan Lal. 2016. «A Standardized Soil Quality Index for Diverse Field Conditions». *Science of the Total Environment* 541: 424–434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.096>
- Doran, Jhon Walsh. y Timoth Parkin. 1994. «Defining and Assessing Soil Quality». *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, editado por Jhon Walsh Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicsek, y B. A. Stewart, 3–21. Madison, WI: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.cl>
- Estrada, I. Rayo., Claudia Hidalgo, Remigio Guzmán, Juan José Almaraz, Hermilio Navarro, y Jorge D. Etchevers. 2017. «Indicadores de Calidad de Suelo para Evaluar su Fertilidad». *Agrociencia* 51, no. 8: 813–831.
- FAO. 2015. «Las Funciones del Suelo». Consultado 15 de abril, 2025. <https://www.fao.org/soils-2015/resources/infographics/es/>
- Franco Moreno, Ricardo Andrés, Rómulo Gallego Badillo y Royman Pérez Miranda. 2020. *Investigación en Formación de Profesores de Ciencias Experimentales en Colombia: 25 Años de Aportes*. Bogotá: Editorial de la Universidad Pedagógica Nacional. <http://hdl.handle.net/20.500.12209/12508>
- Fuentes Medina, Giovanna del Pilar y Liz Mayoly Muñoz Albarracín. 2003. «La Teoría de la Aromaticidad: Un Programa de Investigación». *Tecné, Episteme y Didaxis (TED)*, no. 14: 73–87. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Grimaldi, Michel, Johan Oszwald, Sylvain Dole'dec, Maria del Pilar Hurtado, Miranda de Souza, Xavier de Sartre, William Santos de Assis et al. 2014. «Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers». *Landscape Ecology* 29: 311–328. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9981-y>
- Hunnemeyer, Anne Juliane, Ronnie de Camino y Sabine Müller. 1997. *Análisis del desarrollo sostenible en Centroamérica: indicadores para la agricultura y los recursos naturales*. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://hdl.handle.net/11324/7222>
- Jiménez Ballesta, Raimundo y Vanesa González Quiñonez. 2006. «La Calidad del Suelo como Medida para su Conservación». *Edafología* 13, no. 3: 125–138.
- Karlen, Douglas, M.J Mausbach, Jhon Walsh Doran, R.G Cline, R.F Harris y G. E. Shauman. 1997. «Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation». *Soil Science Society of America Journal* 61: 4–10. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>
- Karlen, Douglas, Craig A. Ditzler y Susan Andrews. 2003. «Soil Quality: Why and How?». *Geoderma* 114: 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)Get rights and content
- Kibblewhite, Mark. G., Karl. Ritz, y Mike J. Swift. 2008. «Soil Health in Agricultural Systems» *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363: 685–701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kosmas, C., Or. Kairis, Ch. Karavitis, C. Ritsema, L. Salvati, S. Acikalin, et al. 2014. «Evaluation and Selection of Indicators for Land Degradation and Desertification Monitoring: Methodological Approach». *Environmental Management* 54: 951–970. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0109-6>
- Lakatos, Imre. 1983. *La Metodología de los Programas de Investigación Científica*. Madrid: Alianza Editorial.
- Lal, Rattan. 2012. «Climate Change and Soil Degradation Mitigation by Sustainable Management of Soils and Other Natural Resources». *Agricultural Research* 1: 199–212. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0031-9>
- Larson, William. Earl y Francis J. Pierce. 1994. «The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management». En *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*, editado por Jhon Walsh. Doran, 37–51. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Lima, Ana Claudia Rodríguez, Lijbert Brussaard, Marcos Rogéiro Totola, Willem Hoogmoed, Rom G.M. de Goede. 2013. «A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality». *Applied Soil Ecology* 64: 194–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>
- Mäder, Paul, Andreas Fliessbach, Daniel Dubois, Lucie Gunst, Padruot Fried y Urs Niggli. 2002. «Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming». *Science* 296: 1694–1697.
- Masera, Omar, Marta Astier y Santiago López-Ridaura. 1999. *Sustentabilidad y Manejo de Recursos Naturales: El Marco de Evaluación*

- MESMIS. México: GIRA, Mundi-Prensa e Instituto de Ecología UNAM.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Mizuta, Katsutoshi, Sabine Grunwald, Wendell P., Cropper Jr y Allan Bacon. 2021. «Developmental History of Soil Concepts from a Scientific Perspective». *Applied Sciences* 11, no. 9: 4275. <https://doi.org/10.3390/app11094275>
- Moebius-Clune, Bianca N., Daniel Moebius-Clune, J.B.K. Gugino, O. J. Idowu, Robert R. Schindelbeck, Aaron J. Ristow, Harold M. Van Es. 2016. *Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework Manual*. Tercera Edición. Geneva, NY: Cornell University.
- Páez Coello, Ximena, y Rubén Samaniego Garrido. 2021. «Imre Lakatos: Los Programas de Investigación Científica». *Revista Honoris Causa* 13, no. 1: 109–116. <https://revista.uny.edu.ve/ojs/index.php/honoris-causa/article/view/47>
- Peerawat, Monrawee, Aimeric Blaud, Jean Trap, Tiphaine Chevallier, Pascal Alonso, Frederic Gay, Philippe Thaler, Ayme Spor, David Sebag, Chutinan Choosai, Noopmanee Suvannang, Kannika Sajjaphan, Alain Brauma. 2018. «Rubber Plantation Ageing Soil Biodiversity after Land Conversion from Cassava». *Agriculture, Ecosystems and Environment* 257: 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.034>
- Ponge, Jean-François, Richard Chevalier y Philippe Loussot. 2002. «Humus Index: An Integrate Tool for the Assessment of Forest Floor and Topsoil Properties». *Soil Science Society of America Journal* 66, no. 6: 1996–2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1996>
- Romig, Donald E., Jason Garlynd, y Robin F. Harris. 1996. «Farmer-Based Assessment of Soil Quality: A Soil Health Scorecard». *Methods for Assessing Soil Quality*, editado por Jhon Walsh Doran, 39–60. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- Seybold, Cathy, M. J. Mausbach, Douglas Karlen y Henry Henry Rogers. 1998. «Quantification of Soil Quality». En *Soil Processes and the Carbon Cycle*, editado por Rattan Lal et al., 387–404. Boca Ratón, FL: CRC Press LLC.
- Singer, Michael. J., y Stephanie Ewing. 2000. «Soil Quality». *Handbook of Soil Science*, editado por Malcom. E. Sumner, 271–298. Boca Ratón, FL: CRC Press.
- Thoumazeau, Alexis, Cécile Bessou, Marie Sophie Renevier, Jean Trap, Raphaël Marichal, Louis Mareschal, Thibaud Decaëns et al. 2019. «Biofunctool: A New Framework to Assess the Impact of Land Management on Soil Quality. Part A: Concept and Validation of the Set of Indicators» *Ecological Indicators* 97: 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.09.023>
- Thoumazeau, Alexis, Cécile Bessou, Marie Sophie Renevier, Phatip Phanklang, Porntip Puttasu, Monrawee Peerawat, Pusanisa Heepngoen et al. 2019. «Biofunctool: A New Framework to Assess the Impact of Land Management on Soil Quality. Part B: Investigating the Impact of Land Management of Rubber Plantations on Soil Quality with the Biofunctool Index». *Ecological Indicators* 97: 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.028>
- Vidal Legaz, Beatriz, Danielle Maia de Souza, Ricardo Teixeira, Assumpcio Anton, Ben Putman y Serenella Sala. 2017. «Soil Quality, Properties, and Functions in Life Cycle Assessment: An Evaluation of Models». *Journal of Cleaner Production* 140: 502–515.
- Vogel, Hans-Jörg, Stephan Bartke, Katrin Daedlow, Katharina Helming, Ingrid Kögel-Knabner, Birgit Lang, Eva Rabot, David Russell, Bastian Stöbel, Ulrich Weller, Martin Wiesmeier y Ute Wollschläger. 2018. «A Systematic Approach for Modelling Soil Functions». *Soil* 4: 83–92. <https://doi.org/10.5194/soil-4-83-2018>
- Wang, Jingzhen, Jianing Zhen, Weifang Hu, Songchao Chen, Ivan Lizaga, Mojtaba Zeraatpisheh y Xiaodong Yang. 2023. «Remote Sensing of Soil Degradation: Progress and Perspective». *International Soil and Water Conservation Research* 11, no. 3: 429–454. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.03.002>
- Zanella, Augusto, Jean-François Ponge, Bernan Jabiol, Giacomo Sartori, Eckart Kolb, Jean-Michel Gobat, Renée-Claire Le Bayon et al. 2018. «Humusica 1, Article 4: Terrestrial Humus Systems and Forms—Specific Terms and Diagnostic Horizons». *Applied Soil Ecology* 122, no. 1: 56–74. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.07.005>

Giovanna del Pilar Fuentes Medina (fuentes.giovanna@uniagraria.edu.co) es docente del Departamento de Ciencias Básicas, Fundación Universitaria Agraria, Bogotá, Colombia. Forma parte del Grupo de Investigación: Educación en Ciencias y Formación Ambiental. Licenciada en Química. Universidad Pedagógica Nacional (UPN). Especialista en Análisis Químico Instrumental, Pontificia Universidad Javeriana. Magister en Docencia de la Química, UPN. Estudiante del Doctorado en Ciencias para el Desarrollo, DOCINADE, Costa Rica, Cohorte 2025.

Recibido: 10 de noviembre, 2025

Aprobado: 24 de enero, 2026.

DOI: 10.15517/revfil.2026.6923

