

Síntesis de la evolución del conocimiento en Edafología

Roque Ortiz Silla

Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología (Edafología), Universidad de Murcia.
rortiz@um.es

INTRODUCCIÓN

La Edafología (del griego edafos, suelo, y logia, ciencia), englobada dentro de las Ciencias Naturales, tiene como objeto el estudio del suelo y utiliza las leyes del conocimiento científico para su análisis. El suelo, la capa más superficial de la corteza terrestre, constituye uno de los recursos naturales más importantes con que contamos al ser el substrato que sustenta la vida en el planeta. Desde el punto de vista científico, un suelo es un cuerpo natural tridimensional formado por la progresiva alteración física y química de un material original o roca madre a lo largo del tiempo, bajo unas condiciones climáticas y topográficas determinadas y sometido a la actividad de organismos vivos. A lo largo de su evolución o edafogénesis, en el suelo se van diferenciando capas verticales de material generalmente no consolidado llamados horizontes, formados por constituyentes minerales y orgánicos, agua y gases, y caracterizados por propiedades físicas (estructura, textura, porosidad, capacidad de retención de agua...), químicas y físico-químicas (pH, potencial redox, capacidad de intercambio catiónico...) que los diferencian entre sí y del material original. El conjunto de horizontes constituye el perfil del suelo y su estudio permite dilucidar los procesos de formación sufridos durante su evolución y llevar a cabo su clasificación dentro de las distintas unidades de suelos.

La importancia del suelo radica en que es un elemento natural dinámico y vivo que constituye la interfaz entre la atmósfera, la litosfera, la biosfera y la hidrosfera, sistemas con los que mantiene un continuo intercambio de materia y energía. Esto lo convierte en una pieza clave del desarrollo de los ciclos biogeoquímicos superficiales y le confiere la capacidad para desarrollar una serie de funciones esenciales en la naturaleza de carácter medioambiental, ecológico, económico, social y cultural.

El suelo es un elemento frágil del medio ambiente, un recurso natural no renovable puesto que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son mucho más rápidos. Por ello es de suma importancia establecer medidas ambientales y políticas de actuación que garanticen la protección y conservación de los suelos.

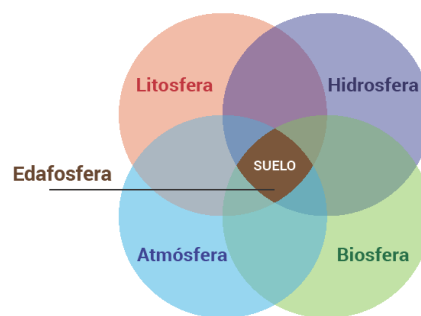


Figura 1. El suelo en los ecosistemas.

El objeto de la Edafología es el suelo y su estudio desde el punto de vista científico. Sin embargo, es conveniente matizar de qué concepto de suelo hablamos ya que hay otras ciencias que también estudian el suelo de forma más o menos particular. De acuerdo con Simonson (1968), el suelo puede ser considerado desde diferentes puntos de vista: el agronómico, el geológico, el ingenieril y el edafológico. El concepto agronómico considera al suelo esencialmente como medio de desarrollo de las plantas. Es la concepción más antigua y extendida que comenzó a desarrollarse con el nacimiento de la agricultura. La concepción agronómica de suelo puede matizarse con dos enfoques distintos: el físico y el fisicoquímico. El primero considera al suelo como un medio poroso, incluso inerte, por el que circulan soluciones y aire y donde las plantas tienen su soporte físico. Según el enfoque fisicoquímico, el suelo es el medio de nutrición de las plantas. El concepto geológico considera al suelo como un manto superficial de material rocoso disgregado, producto de la acción de los agentes de meteorización. El concepto ingenieril trata al suelo como aquel material superficial no consolidado, removible con las excavaciones, que sustenta o alberga construcciones. Finalmente, desde un punto de vista edafológico, se considera al suelo como un cuerpo natural e independiente, originado por la acción conjunta de una serie de factores de formación: clima, roca madre, organismos, relieve y tiempo. Por tanto, el suelo posee unos constituyentes, morfología, propiedades y génesis propias

que le hacen acreedor de una ciencia que lo estudie, la Edafología o Ciencia del Suelo.

El hombre siempre ha tenido una íntima e intensa relación con el suelo. Antes de que empezase la agricultura sedentaria, hace aproximadamente 11 000 años, los suelos fueron reconocidos como fuente para el crecimiento de alimentos, fibras y combustibles. Cuando comenzó el cultivo de cosechas, se encontraron diferencias en las propiedades y tipos de suelos que influyeron en gran medida en la forma de tratamiento del suelo y las plantas que se cultivaban. De estas diferencias en la percepción y el desarrollo del pensamiento surge muy posteriormente la Ciencia del Suelo como disciplina científica. Inicialmente siguió los criterios de otras ciencias básicas como geología, biología, física y química, pero en la última parte del siglo XIX se convirtió en una ciencia por sí misma.

La historia de la Ciencia del Suelo ha sido bastante bien documentada en varios libros y monografías (Boulaine, 1989; Krupenikov, 1992; Yaalon y Berkowicz, 1997; Warketi, 2006; Brevit y Hartemink, 2010). Estas publicaciones han explicado detalladamente el importante progreso en el desarrollo del conocimiento de la disciplina de Edafología a lo largo del tiempo. Debido a las limitaciones de espacio de este trabajo en una revista, la discusión de estos aspectos históricos en este artículo es obviamente breve y deja fuera significativos detalles que pueden ser consultados, por las personas interesadas en el tema, en dichas publicaciones.

ANTECEDENTES Y COMIENZOS DE LA EDAFOLOGÍA

El hombre, ya desde épocas muy remotas, ha estado muy preocupado por conocer el suelo, fundamentalmente como consecuencia del nacimiento de la agricultura. Desde que el hombre se volvió sedentario y comenzó a cultivar sus propias cosechas tuvo necesidad de conocer las propiedades, el funcionamiento y el comportamiento del suelo, aunque en aquéllos primeros momentos sólo fuese desde un punto de vista utilitario, como soporte de los productos vegetales. Los primeros agricultores preferían asentarse sobre suelos bien drenados y fáciles de trabajar y hace diez mil años, los principales núcleos culturales se asociaban a los valles fértiles de los ríos, como el valle del Nilo y el valle del Indo.

Es con la civilización griega con la que se comienza a ver el suelo con una visión más amplia. Empédocles (482-430 a.C.) y Aristóteles (384-322 a.C.) generalizaron la experiencia de la utilización de la tierra en Grecia y además recogieron información adicional de otros lugares como Egipto y Mesopotamia, entre otros. Veían el perfil del suelo desde un punto de vista agronómico, diferenciando un horizonte superficial aceptable para ser arado y un horizonte subsuperficial que servía como alimento a las raíces. Por otro

lado, la concepción filosófica de Aristóteles, según la cual la tierra o el suelo es un elemento básico del Universo junto con el fuego, el agua y el aire, se puede considerar como el inicio de la preocupación con base científica de los problemas asociados a la naturaleza. Así, Teofrasto (372-287 a.C.), discípulo de Aristóteles y primer botánico del antiguo mundo, fue también el primero en utilizar el término edafos para distinguir el suelo de la tierra, diferenciando dentro de él una capa superficial, con contenido variable en humus; una capa subsuperficial, que suministraba nutrientes al sistema radicular herbáceo; un substrato, que alimentaba las raíces de los árboles; y el dominio del reino de la oscuridad. Describió numerosas propiedades de los suelos y diferenció distintos tipos de suelos (arcillosos y arenosos, pedregosos, salinos, pesados y ligeros, blandos y compactos, etc.) de acuerdo con su adecuación a los diferentes cultivos, de forma que, según él, estas características pesaban más en la distribución de las plantas. No obstante, fueron diversos escritores romanos los que comenzaron a obtener datos empíricos para mejorar el uso y el manejo de los suelos, con lo que se incrementó considerablemente la producción de alimentos y fibras. Entre ellos, Catón (234-149 a.C.), Varrón (116-27 a.C.), Plinio el Viejo (23-79) y Columela (4-70) se convirtieron en importantes pilares del estudio del suelo, estableciendo cuatro tendencias que se convirtieron eventualmente en escuelas. Durante el esplendor del Imperio de Bizancio llegaron numerosos manuscritos romanos a Constantinopla y la influencia de Varrón o Columela se puso de manifiesto en la obra *Geponics*, que expone cómo se puede determinar las propiedades de los suelos. Por su parte, el mundo islámico dio un gran impulso a la agricultura, introduciendo importantes medios técnicos y mejoras de las prácticas agrícolas. El freno en el desarrollo de las ciencias que supuso la Edad Media en Europa contrasta con el enorme desarrollo impulsado con el Renacimiento y siglos posteriores. Muchos científicos famosos como Leonardo da Vinci (1452-1519), Bacon (1561-1626), Boyle (1627-1691) y Darwin (1809-1882) trabajaron en temas de suelos desde diferentes puntos de vista relacionados, principalmente, con la observación de la naturaleza.

Hasta el siglo XIX no empieza a estudiarse el suelo de forma racional y al principio se aplica a su estudio principios, métodos y técnicas propias de otras disciplinas científicas más desarrolladas (Química, Geología, Biología, etc.), con el enfoque de cada ciencia respectiva y, con frecuencia, desde un punto de vista utilitario. Porque la capacidad de un suelo para soportar una cobertura vegetal, para producir cosechas, es una de las características del suelo que siempre ha llamado la atención del hombre. Así, Berzelius (1779-1848) llamó al suelo el laboratorio químico de la naturaleza en el cual tienen lugar reacciones de descomposición y síntesis de una manera determinada. Este punto de vista químico con un enfoque más utilitario es compartido por Liebig (1803-1873) que lo

considera como una especie de tubo de ensayo en el que se pueden introducir nutrientes para las plantas. El alemán Sprengel (1787-1859) veía al suelo como una masa de material, formada de minerales, que contenía los productos de descomposición de plantas y animales y publicó en 1837 el primer libro que trata de la Ciencia del Suelo bajo el título de *Bodenkunde*. Sprengel fue uno de los primeros científicos en ocuparse de los procesos genéticos al afirmar que “las fuerzas que rompen las rocas nativas y las convierten en suelo son el agua, oxígeno, anhídrido carbónico, calor y frío”, al tiempo que le daba una importancia fundamental al clima, en relación con la materia orgánica y la productividad. Así, fue uno de los pioneros en considerar que el suelo es un cuerpo independiente ya que sus condiciones de fertilidad pueden cambiar según el clima. No obstante, aunque tuvo presente la importancia de este factor en el comportamiento del suelo, no parece que se diera cuenta de su valor genético ni del hecho de que el suelo es un objeto de equilibrio con el clima, sino que aparece como algo externo. Para Fallou (1794-1877) el suelo es una roca descompuesta, más o menos desintegrada, con una adición de materiales orgánicos; la roca ha cambiado en este sentido y el suelo como tal no pertenece ya a la roca anterior, sino que es una formación (geológica) por sí mismo. Aunque con un marcado carácter geológico, tal vez como reacción al excesivo concepto químico de su tiempo, llegó a tener una concepción científica del suelo como cuerpo natural. Estas ideas fueron compartidas por otros científicos de la época.

Hasta entonces, la Ciencia del Suelo había estado dominada por el concepto químico o geológico junto con la preocupación de mejorar las técnicas agrícolas. La concepción del suelo como cuerpo natural acreedor, por sí mismo, de una ciencia especial se produjo a finales del siglo XIX. El reconocimiento de los suelos como entes naturales organizados, semejantes a las rocas, la fauna o la flora, surgió primero de forma incipiente y siguió su desarrollo posterior en Rusia y Estados Unidos, junto con algunos países europeos como Alemania.

El impulso definitivo para constituir el estudio del suelo en un cuerpo de doctrina autónoma fue dado en Rusia por Dokuchaev (1846-1903) y, posteriormente, por sus discípulos Sibirtzev, Glinka, etc. Este autor puso las bases científicas sobre las que se apoyaría el futuro desarrollo de la Edafología. Dokuchaev descubrió que las diferentes unidades paisajísticas del territorio ruso, definidas por cierto clima y vegetación, estaban correlacionadas con diferentes tipos de suelos individualizados por características diversas. Es decir, cada suelo está constituido por varias capas distintas, formando un todo con características y propiedades particulares relacionadas con la naturaleza del medio geográfico en que se encuentra integrado. A partir de entonces el suelo comienza a ser considerado como un

cuerpo natural independiente con morfología propia, producto de la acción conjunta del clima, la vegetación y seres vivos sobre una roca, durante un cierto periodo de tiempo.



Figura 2. Vassili V. Dokuchaev (1846-1903).

Marbut (1863-1935) en Estados Unidos y Ranmann (1851-1926) en Europa, junto a otros científicos, fueron los encargados de difundir y ampliar las nuevas ideas de la escuela rusa sobre la edafogénesis, que consideraba al suelo como producto de la interacción de todos los factores del medio natural. La primera reunión internacional de los científicos dedicados al estudio de los suelos se celebró en Budapest en el año 1909 organizada por la Comisión Agrogeológica Internacional. Después de varios congresos, en el celebrado en Roma en 1924 se crea la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS) y se propone sustituir el término Agrogeología por el de Edafología. El primer congreso de la ISSS se celebró en 1927 en Washington y en el quedaron establecidas diversas comisiones de trabajo: Física de suelos, Química de suelos, Biología de suelos, Fertilidad de suelos, Clasificación y cartografía de suelos y Tecnología de suelos. Estas comisiones, con las oportunas adiciones y cambios que el tiempo impuso han servido para presentar las principales aportaciones conceptuales y metodológicas que se han ido desarrollando en la historia de la Ciencia del Suelo. Desde entonces, se han venido celebrando con periodicidad cuatrienal, salvo contadas excepciones, estas reuniones internacionales en las que los edafólogos presentan trabajos, informan de sus novedades, intercambian ideas, contrastan sus métodos y, sobre todo, evalúan el estado de la Ciencia del Suelo en el mundo en ese momento. En 1998, la ISSS pasó a denominarse Unión Internacional de la Ciencia del Suelo (IUSS).

ASPECTOS CONCEPTUALES IMPORTANTES SOBRE EL SUELO

El análisis de los contenidos y tendencias propuestos en los congresos de la ISSS, desde el primero en Washington (1927) hasta el último, el número veinte, celebrado en Seúl (2014), puede dar una idea de la evolución vertiginosa del concepto de suelo, desde su concepción puramente utilitaria, pasando por las respuestas a preguntas tales como de dónde procede el suelo, cómo se forma, qué contiene, cómo funciona y evoluciona o cómo se integra en el contexto global de la Tierra. A la vez, se tiene que atender a la necesidad de generar clasificaciones y evaluaciones que, desde una base científica correcta, puedan atender a las necesidades de todo tipo que se plantea el hombre cuando observa, estudia o usa el suelo.

Así, con la expansión y desarrollo de la cartografía de suelos a mediados del siglo XX, el suelo comienza a ser considerado como un cuerpo tridimensional debido a que el edafólogo lleva inherente las dos dimensiones de la superficie del terreno, representadas en los mapas, y a la vez tiene en cuenta la tercera dimensión al examinar en calicatas los perfiles de suelos. Con este concepto tridimensional del suelo se reconoce la variabilidad de las propiedades edáficas lateralmente y en profundidad. Estas reflexiones llevaron a la definición del término pedón (Soil Survey Staff, 1975) como volumen o parte más pequeña del suelo que recoge sus propiedades para su descripción, muestreo y estudio. El área del pedón en superficie varía entre 1 y 10 metros cuadrados, dependiendo de su variabilidad, y su extensión vertical comprende desde la superficie hasta la aparición del material original, teniendo una forma aproximada de prisma hexagonal. Los suelos presentan una variabilidad espacial significativa con cambios laterales graduales. Pedones cuyas características varían dentro de intervalos estrechos de unos a otros pueden agruparse en una misma unidad. Se trata de isopedones o conjunto de pedones contiguos que constituyen un polipedón y se puede imaginar ocupando un lugar en el paisaje y representado en un mapa. Así, mientras que el pedón constituye la unidad para el muestreo, estudio y clasificación de un suelo, el polipedón constituye la unidad cartográfica.

Actualmente coexisten diferentes interpretaciones que configuran el concepto de suelo y que aúnan los diversos criterios e interpretaciones históricas que han sobrevivido de acuerdo con los planteamientos científicos de cada época y lugar y las tesis actuales más elaboradas desde el punto de vista conceptual y experimental. A continuación, se van a comentar algunas de estas interpretaciones más importantes.

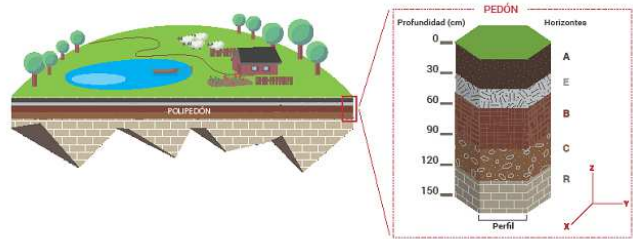


Figura 3. Organización del suelo.

• EL SUELO COMO PRODUCTO DE LA INTERACCIÓN DE LOS FACTORES Y PROCESOS DE FORMACIÓN

La teoría de los factores de la edafogénesis nace, como se ha comentado, con la escuela rusa. Jenny (1945) añade a estos factores, clima, roca madre, organismos y edad relativa, la topografía y trata al suelo como un sistema, en un contexto similar a un sistema abierto. Según Buol *et al.* (1980) un factor de formación del suelo es un agente, fuerza o condición que influye, ha influido o puede influir en el material de partida del suelo con la potencialidad de cambiarlo. La acción de estos factores ambientales origina, orientan y controlan los procesos que dan lugar a la formación de los suelos. La combinación de factores y su diferente intensidad permite explicar la gran diversidad de suelos presentes en la superficie terrestre, es decir, la edafodiversidad. No obstante, dado que una misma combinación de factores se pueden dar en distintos lugares del mundo, es posible encontrar en ellos un mismo tipo de suelo. Recientemente se ha reconocido la influencia del hombre como factor de formación del suelo.

Los procesos de edafogénesis son una compleja secuencia de reacciones químicas y mecanismos físicos y biológicos que conducen a la diferenciación de distintos tipos de horizontes, caracterizados por unas propiedades, que dan lugar a la formación del suelo. Según Simonson (1978), el suelo puede considerarse como el producto del efecto de un flujo de materia que combina diversas acciones y, en ese sentido, los procesos edafogénicos se pueden clasificar en cuatro grupos en función del tipo de acción: adición de materiales orgánicos e inorgánicos (sólidos, líquidos o gaseosos), pérdida, transformaciones y translocaciones de estos materiales, que tienen lugar en una escala de tiempo, en general, muy prolongada. En definitiva, un suelo es el resultado del efecto integrado de diferentes procesos, teniendo en cuenta, además, que los procesos pueden interactuar entre sí.



Figura 4. Factores de formación del suelo.

• EL SUELO COMO SISTEMA TERMODINÁMICO ABIERTO

Se trata de un concepto que permite integrar tanto la evolución temporal como las relaciones espaciales dentro de la Biosfera, dando lugar a un enfoque global y totalizante. Implica que el suelo es un ente natural independiente y con dinámica propia. En el suelo se describen fenómenos de conversión y transformación de materia y energía, de manera que se puede considerar una entidad que evoluciona, formada por un flujo de materiales geológicos, biológicos y meteorológicos.

El suelo se considera (Buol *et al.*, 1980) como un sistema dinámico abierto perturbable de manera constante por fuerzas internas y externas, un balance de entradas y salidas que perdura en un medio de procesos complejos y perpetuamente dinámicos que incluyen: intercambio entre el suelo y el medio ambiente de materiales tales como agua, oxígeno o dióxido de carbono, respuestas de control automático (contracciones y dilataciones, congelación y descongelación, etc.) y producción y consumo de nuevos materiales orgánicos e inorgánicos.

En este esquema dinámico, el clima juega un papel muy activo al ser el control de la fuente energética. La formación del suelo es básicamente un proceso consumidor de energía, por tanto, incapaz de ocurrir espontáneamente en ausencia de aportes externos. Los flujos de energía externa, capaces de dirigir los procesos de edafogénesis, provienen de la radiación solar y de la gravedad. Estos factores, por otra parte, tienden a actuar en direcciones opuestas: la radiación solar concentra los constituyentes en la superficie, mientras que la gravedad lleva a los constituyentes hacia los horizontes de profundidad en forma soluble o mecánicamente en suspensión. El agua es el otro gran transportador de energía, con un papel muy activo a lo largo del perfil del suelo, no solo debido a sus movimientos dentro del perfil sino también como motor y medio de las reacciones químicas y fisicoquímicas.

En este sistema no puede hablarse de equilibrio, en sentido estricto, ya que gran parte de los procesos que se producen en el suelo son irreversibles, pero sí que hay que aceptar una estabilización de las características del suelo por una compensación entre las ganancias y las pérdidas de sustancias, la meteorización y la erosión, la formación y la destrucción, etc.

• EL SUELO CON MORFOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN PROPIA

Las propiedades morfológicas son las que primero se advierten cuando observamos un suelo en un corte del terreno en el campo. La morfología del suelo puede ser interpretada y explicada en función de los procesos que se han desarrollado o se desarrollan en él, generándolo y manteniéndolo como tal. La expansión de la cartografía y la clasificación de suelos, en las que su morfología es esencial e imprescindible, ha hecho necesario que haya que definir, sistematizar y evaluar con gran precisión los rasgos morfológicos que deben ser estimados para hacer comparables las descripciones morfológicas de los diferentes científicos que estudian el suelo en distintos lugares del mundo. Por esta razón, fueron creadas guías de descripción de suelos por FAO (2009), Soil Survey Staff (1951, 1978, 1993) y diversos manuales en gran parte de países, muchos de ellos informatizados en la actualidad.

La morfología de suelos estudia todos los aspectos morfológicos del suelo, sus constituyentes y sus propiedades en diversos niveles de tamaño y abstracción: Polipedón (paisaje)- Pedón (lugar)- Perfil (calicata)- Horizontes- Micromorfología óptica- Micromorfología electrónica. Los cuatro primeros niveles estarían englobados en la Macromorfología y los dos últimos en la Micromorfología del suelo. Los rasgos morfológicos, que serán observados y estudiados en cada caso, variarán de acuerdo con los niveles de tamaño y las técnicas que se apliquen en el estudio.

Así, en el primer nivel, el polipedón, serán interesantes determinar la forma, tamaño y rasgos geográficos como pendiente, orientación y situación en el paisaje, así como los datos litológicos y botánicos del entorno, entre otros. Las técnicas empleadas serán esencialmente de campo y cartografía, sirviendo de gran ayuda la fotografía aérea. En el nivel de descripción de horizontes se aplicarán todos los criterios recogidos en las guías y manuales existentes, tales como profundidad, color, textura, estructura, consistencia, presencia de nódulos, fragmentos rocosos, raíces, etc. Los niveles, microscópico óptico (transmisión, reflexión) y electrónico (transmisión y barrido) se pueden dividir en dos ámbitos diferenciados: la micromorfología de los constituyentes y la micromorfología de la masa de suelo inalterada. La primera hace referencia a estudios de arcillas,

limos y arenas para conocer su naturaleza mineralógica, forma y abundancia para explicar procesos de alteración, translocación, recrecimientos, etc. También se pueden incluir biolitos y artefactos humanos, así como componentes orgánicos (Babel, 1985). El estudio de la micromorfología de la masa inalterada ha desarrollado diferentes sistemas de evaluación que han ido evolucionando con el tiempo, desde los estudios primitivos y más desarrollados de la fábrica del suelo (Kubierna, 1953; Brewer, 1964), a los de microestructura electrónica (Smart, 1979; Eswaran y Shova, 1983) o los más recientes análisis de imágenes con sistemas procesales y captación digital automática e interactiva de imagen.

Se trata de un concepto clásico en el que el suelo es producto de la interacción de la litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera y, como tal, presenta una gran complejidad en los procesos que lo han formado y siguen operando y, en consecuencia, en los elementos que lo componen y su organización. En este sentido, el suelo se puede considerar como un sistema disperso en donde se reconoce una fase sólida (inorgánica y orgánica), una líquida (agua y solución del suelo) y otra gaseosa (atmósfera edáfica). Según White (1979), la parte sólida inorgánica o mineral del suelo representa en proporción un 50 % del volumen del suelo, la parte orgánica un 5 %, la parte líquida un 25 % y la parte gaseosa un 20 %. Esta división del suelo en fases es un esquema de trabajo muy antiguo en Edafología y útil para estudiar los constituyentes del suelo, aunque se trata de una abstracción debido a la compleja génesis y organización de los materiales edáficos y las importantes interrelaciones entre las diferentes partes.

La fase sólida orgánica interacciona con la inorgánica formando compuestos intermedios estableciendo uniones orgánico-minerales, lo que favorece la destrucción de los minerales primarios, el desarrollo del proceso de humificación, etc. Los huecos que deja la fase sólida al agregarse sus partículas son ocupados por las fases líquida y gaseosa. Estas últimas se interrelacionan a través de la superficie de las partículas coloidales, arcillas y humus, mediante el complejo de cambio de iones y la adsorción de moléculas polares y no polares. La atmósfera del suelo es parecida, cualitativamente, a la atmósfera terrestre aunque difieren cuantitativamente en su composición. Se nutre de esta última y de la respiración de la biomasa que vive en el suelo. Las raíces y los microorganismos en el proceso de respiración, consumen oxígeno y desprenden dióxido de carbono y si los niveles de oxígeno son insuficientes porque la aireación no es la adecuada, se producen retrasos o paralización en el desarrollo de las plantas, toxicidad ligada a procesos de reducción, etc.

La disolución del suelo está constituida por agua, gases disueltos y otros solutos y partículas orgánicas e inorgánicas

en suspensión procedentes de las otras fases. En relación con la atmósfera edáfica, es necesario resaltar la gran importancia que tiene la aireación en la fertilidad y productividad del suelo.

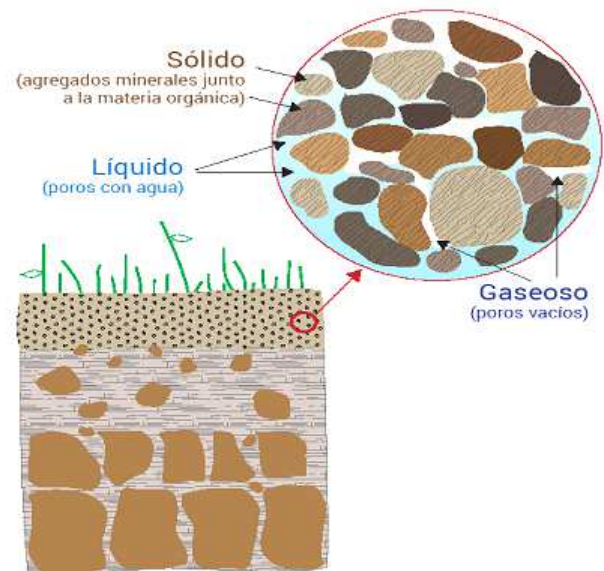


Figura 5. Constituyentes del suelo.

• EL SUELO COMO MEDIO DE CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS Y DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

Representa la razón más antigua y básica que justifica la mayor parte de los estudios que se han realizado sobre el suelo hasta épocas recientes, ya que incide de forma directa en unos de los problemas que más ha preocupado al hombre desde siempre, obtener alimentos. Los suelos permiten el enraizamiento de las plantas, a la vez que actúan como fuente de elementos nutritivos y agua que son necesarios para su crecimiento. La contribución del suelo al desarrollo de las plantas se denomina fertilidad, término más aplicado a las plantas cultivadas pero que también se puede aplicar a la totalidad de los vegetales.

Sobre la fertilidad del suelo influyen multitud de factores de tipo físico, químico y biológico. Desde el punto de vista físico, las principales propiedades del suelo que afectan a la fertilidad son la textura, la estructura, la aireación, la temperatura, la porosidad, la retención de humedad y el régimen hídrico. Así, como ejemplo, el agua es uno de los factores esenciales para el desarrollo de las plantas y, por tanto, son esenciales parámetros relacionados con este recurso tales como su retención en el suelo, su contenido, su dinámica en el suelo, los potenciales hídricos, el balance hídrico, etc. El conocimiento de estos parámetros permite,

entre otras cuestiones, planificar el riego de los suelos, algo fundamental en regiones semiáridas como el sureste español.

El aspecto químico de la fertilidad es también muy importante. El suelo se puede considerar como un reservorio de nutrientes esenciales y, en ocasiones, de elementos tóxicos, ya sea por causas naturales o por contaminación. La disponibilidad de nutrientes (C, N, P...) y sus ciclos, la fijación e inmovilización de sustancias y elementos químicos, el pH, la capacidad de cambio catiónico, la salinidad, etc., son aspectos imprescindibles que hay que conocer.

La biología del suelo influye mucho sobre su fertilidad. Los microorganismos y la fauna presentes en el suelo participan en la transformación de muchas sustancias a través de los ciclos biogeoquímicos y realizan diversas actividades relacionadas con ello: competencia de nutrientes con las plantas, exudado de sustancias tóxicas, incremento de los niveles de nutrientes asimilables, etc. En este sentido son esenciales el ciclo del nitrógeno desarrollado por bacterias, ciertos hongos que afectan a la exploración radicular y los microorganismos y mesofauna patógena como bacterias, actinomicetos, nemátodos, insectos, etc.

La comunidad suelo-planta en un cultivo es un sistema abierto en donde los nutrientes se pueden perder a través de la escorrentía superficial, el lavado y diversos procesos biogeoquímicos. Como ganancias hay que citar la descomposición del material original, la fijación microbiana y diversos influjos de otras comunidades. De tal forma que si el resultado neto ganancias-perdidas es negativo o inferior a los requerimientos del siguiente cultivo, serán precisos suplementos a través de fertilizantes. Por otro lado, en las relaciones suelo-planta también se está avanzando sobre compuestos químicos de los vegetales que influyen, directa o indirectamente, en sus procesos fundamentales y que a su vez se relacionan con el soporte edáfico, de forma que se pueden calificar como bioindicadores de fertilidad.

• EL SUELO COMO OBJETO QUE HAY QUE CLASIFICAR

Las clasificaciones son artificios creados por el hombre para sistematizar y ordenar sus conocimientos en cualquier rama de la ciencia. La clasificación de los suelos presenta, si la comparamos con otros entes naturales como los minerales, los animales o las plantas, ciertos caracteres muy particulares. Se aproxima más a las agrupaciones vegetales y, hasta cierto punto, a las rocas. La separación entre las unidades a clasificar es gradual, la mayor parte de las veces, y los suelos no derivan los unos de los otros, en el sentido de que lo hacen los animales y los vegetales. Por tanto, es necesario definir previamente las unidades a clasificar, atendiendo a propiedades y a características seleccionadas según la finalidad a alcanzar.

En general, una clasificación refleja el nivel de conocimientos en un momento determinado, por lo que a medida que se van conociendo mejor los objetos a clasificar, las nuevas aportaciones se deben incorporar al sistema de clasificación. Por tanto, una clasificación de suelos se debe considerar como un sistema dinámico que cambia necesariamente con el tiempo, con sucesivas nuevas versiones, lo que en ocasiones puede desconcertar a personas no especializadas en Edafología, aunque lo mismo ocurre con otras ciencias de la naturaleza.

Desde el primer tercio del siglo XX las clasificaciones de suelos se han elaborado siguiendo criterios fundamentalmente genéticos y criterios basados en la morfología del suelo. Conocer la génesis tiene gran interés científico, si bien no siempre resulta fácil establecerla, lo que dificulta basar la clasificación en este tipo de criterios. Por el contrario, las propiedades morfológicas de los horizontes de un perfil de suelo resultan más sencillas de reconocer y evaluar en una prospección de campo.

Durante el desarrollo de la Ciencia del Suelo se han propuesto diversos sistemas de clasificación de suelos de aplicación nacional: clasificación francesa, rusa, alemana, canadiense, brasileña, entre otras muchas, basadas fundamentalmente en factores y procesos de formación del suelo. A pesar de ello, en la actualidad, aunque se mantienen algunas de estas clasificaciones, dos son las que han conseguido un reconocimiento generalizado e internacional, basadas en la morfología del suelo, que han tenido diversas ediciones, y que son utilizadas como referentes mundiales: Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) y, sobre todo, World Reference Base for Soil Resources (WRB) (IUSS-WRB, 2015).

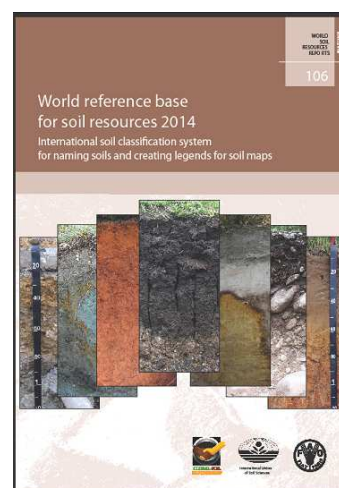


Figura 6. Base de Referencia Mundial de los Recursos del Suelo (WRB, 2015).

• EL SUELO COMO CUERPO NATURAL, A VECES MODIFICADO O CONSTRUIDO POR EL HOMBRE

Al considerar al suelo como un cuerpo natural se le dota de una extensión limitada. El calificativo de natural actualmente plantea discusiones en contraposición con la acción antrópica. Hay regiones y zonas usadas y modificadas por el hombre desde tiempos remotos y con el desarrollo de la tecnología en el siglo pasado, la acción del hombre se ha dejado sentir intensamente en, relativamente, poco tiempo en numerosas áreas inexploradas hasta ese momento. De hecho, el hombre ya es considerado por muchos científicos (Fanning y Fanning, 1989) que estudian el suelo como un factor formador más y sus principales efectos sobre el suelo pueden ser físicos (destrucción y creador de suelo, mezcla de horizontes, descenso del nivel freático, etc.), químicos (encalado, pérdida de carbono orgánico, incremento de sales y/o metales pesados, acidificación del suelo, adición de pesticidas, fertilizantes, etc.) y biológicos, como efectos indirectos originados por las prácticas anteriormente mencionadas.

Pero, además, hay suelos en los que la acción del hombre no puede considerarse un factor más sino la causa principal de su génesis, como es el caso, por ejemplo, de los suelos construidos en zonas mineras, ciudades, jardines, etc. En suelos de esta naturaleza, las clasificaciones se aplican con dificultad aunque parte de ellas, sobre todo las más modernas, reconocen su existencia y los incluyen, bien sean en propiedades taxonómicas o en taxones propios. Así, la *Soil Taxonomy* considera los suelos muy influenciados por el hombre como objetos de estudio cuando contienen materia viva y pueden soportar plantas, definiendo horizontes de diagnóstico como epipedón plágen, antrópico, horizonte ágrico, etc., pero sin dedicar un orden o nivel superior de clasificación especial para este tipo de suelos. Sin embargo, la clasificación WRB da un paso adelante a este respecto e incluye dos grupos de suelos de referencia con fuerte influencia humana: Antrosoles, suelos con un uso agrícola intensivo y prolongado, y Tecnosoles, suelos artificiales con una proporción elevada de artefactos de origen antrópico. En ambos casos se caracterizan por tener determinados horizontes y/o propiedades de diagnóstico.

Por tanto, es importante resaltar que, si bien la mayor parte de los suelos objeto de estudio son naturales, cada día se reconoce y admite más el papel del hombre como factor formador y se consideran como suelos aquellos artificiales o profundamente modificados por la acción humana, aunque deben cumplir caracteres diferenciadores perfectamente definidos.

• EL SUELO COMO RECURSO QUE PUEDE SER EVALUADO

El suelo es un recurso que puede ser evaluado por el hombre para su uso con muy diferentes fines: agronómicos, forestales, urbanos, industriales, catastrales, etc. La evaluación de suelos es una rama técnico-científica de la Edafología de suma importancia para la ordenación y planificación de un territorio. Generalmente se habla de evaluación de tierras (land evaluation) o del terreno, puesto que además del suelo se tienen en cuenta factores del lugar (topografía, clima, vegetación, hidrología, etc.) y factores socioeconómicos (uso y manejo del suelo, comunicaciones, etc.). La evaluación de tierras se emplea para predecir usos potenciales de un territorio a partir de los atributos que tiene y la aptitud para evitar riesgos y problemas cuando se asignen usos a dicho territorio.

Se han desarrollado muy diversos sistemas de evaluación de tierras que permiten combinar el efecto de diversos parámetros edáficos: granulometría, estabilidad estructural, drenaje, pH, salinidad, capacidad de intercambio catiónico y carbono orgánico, entre otros. Estos métodos de evaluación son muy diversos. Algunos de ellos se pueden agrupar en sistemas no cuantitativos, basados en el establecimiento de clases, como el Esquema de evaluación de tierras de FAO y el Sistema de clases de capacidad agrológicas, y sistemas cuantitativos en los que se establecen índices numéricos por la combinación de los parámetros evaluados. Una ventaja de estos últimos sistemas es que proporcionan una escala continua de evaluación.

La concepción inicial de estos sistemas de evaluación estaba relacionada, principalmente, con la productividad agrícola y a minimizar los riesgos de erosión. En la actualidad los objetivos son mucho más amplios, relacionando la calidad de un suelo con la aptitud para realizar diversas funciones y con el grado de adecuación a una función determinada.

• EL SUELO COMO RESERVA ECOLÓGICA Y RESERVA GENÉTICA

El concepto de suelo como reserva ecológica expresa el múltiple papel clave del suelo en los ecosistemas terrestres, fuente de alimentos, soporte de masas forestales, posible almacén de residuos y basuras y reservorio del carbono orgánico del planeta (Tinkel, 1985; Wild, 1989). En los ecosistemas terrestres o biogeosfera, el suelo ocupa una posición privilegiada que resume el papel de la fauna, la flora, la atmósfera, la hidrosfera y el medio físico en general. Las modificaciones en cualquiera de ellos afectan de una forma relativamente rápida al suelo y en él quedan impresos los cambios.

Desde el punto de vista de reserva genética, el suelo es un medio que contiene y protege vida y, por tanto, constituye un banco de genes. Al contrario de lo que pudiera parecer, viviendo en el suelo o entre el suelo y la superficie existe un gran número de animales que cubren una parte importante del espectro de la escala zoológica. Asimismo, el mundo microscópico del suelo está lleno de organismos vegetales y animales y, por supuesto, la mayor parte de las plantas superiores crecen en el medio superficial entre el suelo y el aire atmosférico. Los organismos son un factor importante en la definición de suelo como medio dinámico, sin vida no hay suelo. Estos no sólo habitan en el suelo, produciendo y modificando sus fases, ciclos y propiedades sino que también confieren al medio edáfico algunas propiedades que lo hacen similar a un ser vivo. Como organismos del suelo se pueden citar los virus, la macroflora, la microflora (bacterias, actinomicetos, hongos, líquenes y algas), la microfauna, mesofauna, macrofauna y megafauna.

Los Tecnosoles, suelos construidos por el hombre, no contendrán la variedad de formas de vida que se pueden encontrar en un suelo natural, pero, como generalmente contienen restos de otros suelos o de materiales superficiales, la presencia de algunos organismos está garantizada en ellos.

• EL SUELO COMO COMPONENTE MULTIFUNCIONAL DE LOS ECOSISTEMAS

El suelo es un elemento dinámico y vivo que desempeña múltiples funciones y papeles clave en los ecosistemas por lo que es componente fundamental de la biosfera. Entre las principales funciones se pueden destacar las siguientes:

* Proporciona los nutrientes esenciales, el agua y el soporte mecánico necesarios para la producción de la biomasa en general: cultivos, forrajes, fibras, biocombustibles, masas forestales, etc., lo que se debe conseguir sin que el suelo pierda sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Es decir, debe tener una productividad biológica sostenible.

* Es un componente esencial del ciclo hidrológico en la naturaleza, puesto que el medio edáfico distribuye las aguas superficiales y contribuye al almacenamiento de las aguas subterráneas y a la recarga de acuíferos.

* Gracias a su poder de amortiguación o desactivación natural de la contaminación, el suelo filtra, degrada, neutraliza e inmoviliza sustancias orgánicas e inorgánicas tóxicas, impidiendo que alcancen las aguas y el aire o que entren en la cadena alimenticia.

* Proporciona al hombre materias primas: arcillas, arenas, gravas, caliza, yeso, turba, hierro, aluminio, etc. que se pueden extraer.

* Sirve de soporte físico de actividades humanas: viviendas, industrias, urbanizaciones, infraestructuras de transporte, etc.

* Regula el microclima de un lugar al absorber la radiación solar e intervenir en evapotranspiración del agua en la naturaleza.

* Fija gases de efecto invernadero, secuestrando carbono atmosférico que queda retenido en el suelo como materia orgánica recalcitrante durante mucho tiempo y hace disminuir los efectos del cambio climático global de nuestro planeta.

* Proporciona argumentos de evidencias arqueológicas y climáticas en lo que se refiere al conocimiento sobre la evolución de la población humana y de los paleoclimas.

* Es fundamental para el desarrollo de las actividades humanas como soporte de la estructura socioeconómica, forma parte del paisaje, que viene determinado por los suelos que existen en cada ámbito geográfico, y del patrimonio cultural.

En definitiva, hay que considerar al suelo como un elemento frágil del medio ambiente, un recurso degradable y no renovable a corto plazo puesto que su velocidad de formación y regeneración es muy lenta mientras que los procesos antrópicos que contribuyen a su degradación, deterioro y destrucción son mucho más rápidos.

• CALIDAD Y SALUD DEL SUELO

Los términos calidad y salud del suelo se utilizan, a veces, como sinónimos, como términos equivalentes o bien como complementarios, según desde que especialidad o campo de trabajo se aborde el tema. Así, para un agricultor un suelo de calidad es aquel que proporciona elevadas producciones y rentabilidades, manteniendo su capacidad productiva para generaciones futuras. Para los consumidores es el que suministra buenos alimentos, abundantes y baratos (percepción de la calidad agroalimentaria). Para un naturalista, un suelo de calidad es el que se encuentra en armonía y equilibrio con el paisaje y su entorno. Para el ambientalista, es aquel que funciona adecuadamente en un ecosistema dado, manteniendo o mejorando la biodiversidad, la calidad del agua, los ciclos de los nutrientes y la producción de la biomasa. Por tanto, el concepto de calidad del suelo es muy variable dependiendo de las necesidades, las apetencias o la capacidad de percepción de los usuarios del suelo.

Por estas razones, en la década de los años 90 del pasado siglo se dieron infinidad de definiciones del concepto de calidad del suelo. La propuesta por Doran y Parkin (1995), por su amplitud y sobre todo por ligar de una manera explícita la calidad a las funciones del suelo, ha sido y es ampliamente utilizada y es la que dio lugar, con ligeras matizaciones, a la definición oficial de la Soil Science Society of America (SSSA, 1995), retomada más tarde por Karlen *et al.* (1997): "La calidad del suelo es la capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de los límites de ecosistemas naturales o manejados, en el sostenimiento de la productividad vegetal y animal, en el mantenimiento o mejora de la calidad del aire y del agua y en el soporte de la salud humana y el hábitat".

Diferentes autores distinguen entre calidad del suelo heredada y dinámica. La calidad heredada es la que deriva de los factores formadores y los procesos edafogénicos que han actuado en la formación del suelo y, por consiguiente, es el resultado de procesos de larga duración. Por el contrario, la calidad dinámica, que ha sido inducida por el uso y manejo del suelo por el hombre, responde a cambios a corto y medio plazo. En este sentido, apareció el nuevo concepto de salud del suelo (Roming *et al.*, 1995) o calidad dinámica que hace referencia al estado de las propiedades dinámicas del suelo en un momento determinado. Las propiedades dinámicas son aquellas que cambian a corto plazo como, entre otras muchas, contenido en materia orgánica, salinidad, diversidad de organismos y productos microbianos.

El estudio de la calidad del suelo se puede abordar con distintos enfoques, ya sea atendiendo a las propiedades intrínsecas del suelo (observadas, medidas, inferidas o calculadas por medio de funciones de edafotransferencia) o bien teniendo en cuenta la aptitud del suelo para realizar determinadas funciones.

La evaluación de la calidad del suelo ha de efectuarse de manera segura, objetiva y cuantitativa, mediante una compleja integración de factores estáticos y dinámicos, físicos, químicos, biológicos y ecológicos que definen el estado ideal del suelo para un gran número de escenarios ambientales, de uso y manejo. El objetivo final de la evaluación es establecer un índice de calidad, útil para todos los suelos, en diferentes escenarios y de acuerdo con su multifuncionalidad. No obstante, esta misión es complicada ya que las funciones del suelo derivan de una serie de procesos biogeoquímicos relacionados con numerosas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que, a su vez, interaccionan entre sí y con factores ambientales y de manejo y, además, pueden ser muy variables en el espacio y en el tiempo. Según Doran *et al.* (1996), los indicadores de la calidad del suelo deben ser propiedades y características del suelo cuyas medidas resulten útiles para interpretar y analizar

los criterios de calidad en un cierto contexto, en el que ha de quedar delimitada la importancia de las diferentes funciones del suelo.

Del análisis de las series de indicadores propuestas por diferentes autores (Larson y Pierce, 1991; Pierzinsky *et al.*, 2000) ya sean visuales, físicos, químicos y/o biológicos, hay que resaltar la importancia que se le da en todas ellas a tres parámetros:

- * El carbono orgánico, en referencia al papel del suelo en el ciclo biogeoquímico del carbono como uno de los temas emergentes dentro de la Ciencia del Suelo en relación con el cambio climático global.

- * La actividad biológica y enzimática del suelo, en relación con la capacidad degradativa del suelo y el reciclado de nutrientes en el medio edáfico de los ecosistemas.

- * Las propiedades físicas, a las que se les considera en general más relevantes que las propiedades químicas a la hora de evaluar la calidad de los suelos, contrariamente a lo que hasta entonces se había propugnado, en relación con la capacidad productiva del suelo.

EL HOY Y EL MAÑANA DE LA EDAFOLOGÍA

Los rápidos cambios sufridos en las últimas décadas, especialmente en el ámbito tecnológico, están produciendo nuevas demandas tanto en la sociedad como en la comunidad científica. La Edafología no es ajena a estos cambios y su futuro, si se atiende al número de investigadores que dedican su labor científica a esta disciplina y al número de trabajos publicados, parece prometedor. Sin embargo, como indica Macías (2015), el esquema integrado del estudio y comprensión del suelo, seguido por muchos autores clásicos, que va de los factores de formación, a los componentes, propiedades, estructura u organización, procesos edafogénicos, tipos de suelos, su distribución en el paisaje, evolución en el tiempo, usos del suelo, y efectos degradativos y rehabilitadores de las acciones antrópicas, en la actualidad, es raramente seguido en todas sus etapas. Es mucho más frecuente el estudio inconexo y muy parcial de algunas de ellas. Esto ha conducido al incremento puntual de conocimiento de algunos aspectos del suelo, como los grupos funcionales de la materia orgánica, los sistemas enzimáticos o los procesos de adsorción de los coloides de carga variable, entre otros muchos aspectos parciales que se han desarrollado en los últimos años.

Es preciso reconocer la importancia que han tenido y tienen en la Ciencia del Suelo los nuevos enfoques que han supuesto la aplicación de los métodos de estudio de otras ciencias en la comprensión del suelo. Como ciencia de tercera

generación, la Edafología es deudora tanto de la visión aportada por las ciencias básicas, como de las que fueron derivándose de ellas y de los nuevos avances en métodos y técnicas de estudio de tipo químico, físico, biológico, etc. Reconociendo la importancia de estos nuevos enfoques y desarrollos, que deben de ser integrados, no por ello se debe perder de vista el objetivo central del estudio de la Edafología, que es el suelo en sí mismo. En este sentido la situación no es muy satisfactoria.

Cada vez se estudia menos el desarrollo completo del suelo, su génesis, su evolución dentro del contexto biogeoquímico, añadiendo los matices que introduce la influencia humana, lo que da lugar a una pérdida de la visión holística del suelo y de todo lo que supone de incremento de la capacidad de comprensión de su estado en un momento determinado y de la capacidad para intervenir positivamente en su futuro, para aprovechar de manera más eficaz y racional todas sus funciones y posibilidades.

Tampoco son buenas las perspectivas sobre la evolución de las enseñanzas de la Ciencia del Suelo en las universidades o la continua desaparición de la palabra suelo de numerosos departamentos universitarios y centros de investigación europeos y españoles, dentro de una línea de integración del suelo en conceptos más amplios, tales como producción agraria, medio ambiente, ecosistemas, etc., pero que, en la práctica difuminan la importancia y la necesidad de conocer el suelo. Así, se ha llegado a la situación actual donde los suelos aparecen en numerosos artículos científicos, incluso en revistas de especialización de suelo, sin conocer su tipología muestrándolos por criterios de profundidad, o incluso considerándolos como una especie de material inerte cuando se le añade algún residuo orgánico para regenerarlo, pero sin tener en cuenta su organización y sin tener ningún interés en comprender su composición química y mineralógica, sus propiedades físicas y químicas, o sus procesos y dinámica evolutiva dentro de un marco definido por sus factores y procesos de formación (Macías, 2015).

En frecuentes ocasiones se aplican multitud de técnicas analíticas, algunas de ellas sofisticadas y caras, en el estudio de suelos, se determinan los elementos y sustancias contaminantes, se proponen soluciones de mejora y técnicas de recuperación de los suelos por profesionales que ignoran, o no se interesan lo más mínimo, por los fundamentos básicos de la Edafología en aras de una superespecialización que, aunque facilita la realización rápida de artículos y curriculum investigador para su carrera profesional, no permite alcanzar una visión holística del suelo. No permite comprender la totalidad del suelo, sino aspectos muy parciales del mismo, desagregados y sin conexión. El resultado de todo ello es que, junto a la comprensión, se pierde gran parte de la eficiencia para actuar sobre él de forma coherente y racional.

Por otra parte, aunque se han realizado importantes trabajos de caracterización, clasificación y cartografía de suelos en parte de las naciones científicamente desarrolladas, el suelo en muchas regiones pertenecientes a países emergentes y del tercer mundo todavía no se encuentra estudiado e inventariado, circunstancia que suele coincidir con la escasez de recursos de la zona en cuestión. Es por esta razón que una línea importante de futuro de la Edafología sea el estudio de la cubierta edáfica de los países en vías de desarrollo. Mermut y Eswaran (2001) presentan una recopilación con los principales avances conseguidos por la Ciencia del Suelo e indican la importancia que están teniendo para un próximo futuro subdisciplinas, entre otras, como la calidad de los suelos, la degradación de suelos y la desertificación, los estudios sobre los ciclos biogeoquímicos, y la evaluación y control de los suelos contaminados.

En este sentido, los últimos congresos de la ISSS son buenos indicadores para conocer las líneas de investigación que más interesan a los científicos actualmente, que parecen estar más preocupados por los problemas de recuperación y conservación de suelos que por los de su productividad. Así, en relación al número de trabajos presentados, se pueden destacar líneas como: biotecnología de suelos; degradación, erosión, recuperación y conservación de suelos; contaminación y rehabilitación de suelos contaminados por metales pesados, plaguicidas y compuestos orgánicos; inventario y evaluación de suelos; papel del suelo en el cambio climático; el agua en el suelo y riesgos de salinización; elaboración de modelos matemáticos aplicados al comportamiento del suelo; aplicación de nuevas tecnologías al estudio de suelos (SIG, tratamientos de imágenes de satélites, análisis de imagen, microscopía electrónica y técnicas derivadas, etc.); y ordenación del territorio y planificación de usos del suelo.

Hartemink (2006) recoge en un libro la visión sobre el futuro de la Ciencia del Suelo de cincuenta y cinco edafólogos pertenecientes a veintiocho países diferentes. Muchos de ellos se muestran de acuerdo en que la Edafología debe convertirse en una ciencia multidisciplinar, aumentar su difusión entre las administraciones responsables y la sociedad, y resaltar la importancia del suelo en grandes cuestiones globales, tales como la producción de alimentos, el cambio climático y los impactos medioambientales, así como reconocen la importancia de su docencia en todos los niveles de enseñanza. Algunos muestran su preocupación por el giro que la Ciencia del Suelo está tomando en detrimento de conceptos más básicos, al tiempo que parecen divididos ante el beneficio que la revolución digital puede tener en el futuro de esta ciencia. Sin embargo, para Petersen (2006) el futuro de esta disciplina se revela más excitante y desafiante que nunca, con muchos temas diferentes por ser aún investigados

y con la suerte de contar con la ayuda de las nuevas tecnologías disponibles.

Hay que recordar que la Edafología es una ciencia aplicada que ha sido dirigida tradicionalmente a suministrar soluciones a las numerosas demandas de la sociedad. Por consiguiente, su futuro éxito dependerá en buena medida de lo oportuno y apropiado de las respuestas a estas necesidades. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, 2010) ha identificado los principales retos que se enfrenta en un futuro la Ciencia del Suelo resumiéndolos en cuatro áreas problemáticas: la salud humana y de los suelos; el tratamiento de los residuos y la calidad del agua; seguridad de los alimentos y energía; y el cambio climático. Las líneas fundamentales de estudio fueron definidas para estas áreas a corto, medio y largo plazo.

También hay que considerar que la sociedad en que vivimos es cada vez más dependiente de la comunicación y mucha gente es solo consciente de los tópicos que aparecen en los medios informativos. Para que la Ciencia del Suelo logre un buen nivel de reconocimiento y aceptación, los edafólogos deben considerar que aunque un artículo científico represente el primer eslabón en la cadena de comunicación científica, esto no es lo único en la actualidad. Artículos publicados en las más prestigiosas revistas internacionales, como *Science* o *Nature*, son utilizados para crear comunicados informativos que, enviados por agencia, son difundidos por prensa, televisión, radio, magazines populares, etc. Las comunicaciones científicas que llegan al público y a los centros de decisiones políticas y económicas no suelen ser artículos de investigación si no artículos fácilmente entendibles por la sociedad, por lo que los científicos del suelo deben hacer esfuerzos para aparecer en los medios informativos si desean recibir un apropiado reconocimiento a su trabajo de investigación (Díaz-Fierros, 2015).

Por otro lado, para que el suelo pueda desempeñar sus numerosas funciones es necesario mantenerlo en buen estado. Sin embargo hay pruebas evidentes de que el suelo está cada vez más amenazado por una serie de actividades humanas que contribuyen a su degradación. El suelo se enfrenta, entre otras, a las siguientes amenazas: disminución de materia orgánica, erosión, pérdida de biodiversidad, contaminación, compactación, salinización y sellado. Si bien estas amenazas no afectan a todos los países por igual, todo apunta a que estos procesos de degradación se están agravando en todo el mundo y es muy probable que esta situación empeore dentro del marco de cambio climático. La fase final de la degradación del suelo es la desertificación del territorio, fenómeno que ocurre cuando el suelo pierde su capacidad para realizar sus funciones. Muchos científicos están aplicando nuevas tecnologías para la recuperación de

estos suelos degradados, tratándose de unas líneas de trabajo con gran futuro en la actualidad.

FAO considera, actualmente, que debemos conocer el suelo para aprovechar al máximo los recursos edáficos y climáticos que nos permiten producir alimentos, garantizando la sostenibilidad de las condiciones y equilibrios ambientales que lo hacen posible. Al pilar básico de la visión agronómica y utilitaria del suelo debe integrarse la visión ambiental, algo que en Europa viene realizándose desde las últimas décadas, pero que no ocurre de manera satisfactoria en EE. UU. y los países latinoamericanos, claramente dominados por el paradigma productivo. No obstante, se están haciendo grandes avances en esta acción integradora de las visiones agronómicas y ambientales del suelo. Se admite que gran parte de las actividades humanas se realizan sobre el suelo y que éste, además de producir alimentos y fibras, tiene un papel clave en aspectos tan importantes como el suministro de agua de calidad, el control de contaminantes o ser el mayor sumidero de carbono atmosférico de acción relativamente rápida contra el cambio climático que tanto puede influir en la pérdida de biodiversidad en nuestro planeta (Lal, 2004).

Actualmente, se abren multitud de oportunidades a la Ciencia del Suelo en un camino integrador de producción de alimentos, gestión de residuos, conservación y elaboración de suelos cuando sean necesarios para la sostenibilidad ambiental, utilizando suelos como adsorbentes y como reactores que eliminan contaminantes o los inertizan, reduciendo su movilidad y biodisponibilidad. Conceptos como los "Tecnosoles a la carta" (Macías *et al.*, 2007) van en este sentido, de lo que puede ser un ejemplo el desarrollo del triángulo Gestión de residuos-Sumidero de carbono-Lucha contra la contaminación y desertificación, que ha sido utilizado como fundamento de los procesos de recuperación de suelos con Tecnosoles, sin olvidar el importante papel de los organismos vivos, como plantas, bacterias, hongos, etc., en los procesos de recuperación ambiental.

La trascendencia del suelo se reconoce en la actualidad. La FAO ha creado el Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos (GTIS), con miembros representativos de los diferentes continentes, para asesorar científica y técnicamente a la "Alianza Mundial por el Suelo" que centra sus objetivos en aspectos tales como:

1. Promocionar el manejo sostenible del recurso suelo para promover su protección, conservación y productividad sostenible.
2. Fomentar la inversión, la cooperación técnica, las políticas, la concienzación, educación, capacitación y la extensión sobre los suelos.

3. Establecer una plataforma común para guiar los estudios e investigaciones sobre el suelo, abordando aspectos esenciales del suelo relacionados con la demanda de alimentos y la adaptación y mitigación del cambio climático.

4. Mejorar la cantidad y calidad de los datos e información edafológica: recolección de datos (generación), análisis, validación, presentación de informes, monitoreo y su integración con otras disciplinas.

5. Armonizar los métodos, medidas y los indicadores para el manejo sostenible y la protección del recurso suelo.

6. Establecer redes de conocimiento y colaboración para estudios integrales sobre el suelo y desarrollar directrices para establecer una gestión del suelo a nivel global.

En este mismo sentido, el 12 de diciembre de 2013 la Asamblea General de la ONU decidió declarar 2015 Año Internacional de los Suelos y el 5 de diciembre Día Mundial del Suelo (A/RES/68/232). Estas fechas tienen como objetivo fundamental aumentar la concienciación y la comprensión de la importancia del suelo para la seguridad de los alimentos y las funciones esenciales de los ecosistemas. Se considera que el suelo es tan esencial para la vida de los organismos de nuestro planeta y la sociedad como el aire o el agua y es un recurso limitado que necesita medidas de evaluación y protección, por lo que se debe de garantizar su uso racional. Los objetivos específicos del Año Internacional de los suelos son los siguientes:

- Conseguir la plena concienciación de la sociedad civil y los responsables de la toma de decisiones sobre la gran importancia del suelo para la vida humana.

- Educar al público sobre el papel crucial que desempeña el suelo en la seguridad alimentaria, la adaptación y la mitigación al cambio climático, los servicios ecosistémicos esenciales, la mitigación de la pobreza y el desarrollo sostenible.

- Apoyar políticas y acciones eficaces para el manejo sostenible y la protección de los recursos del suelo.

- Promover inversiones en actividades de manejo sostenible del terreno para desarrollar y mantener suelos saludables para los diferentes usuarios y grupos de población.

- Fortalecer iniciativas en relación con el proceso de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Agenda post-2015.

- Promover una mejora rápida de la capacidad para la recopilación de información sobre el suelo y la supervisión a todos los niveles (mundial, nacional y regional).

Los científicos del suelo deben demostrar a la sociedad, y especialmente a sus dirigentes, que la Ciencia del Suelo es necesaria y que puede dar pautas de aplicación y soluciones innovadoras y sostenibles para los retos crecientes de suministros de alimentos y fibras, así como mejorar la calidad ambiental que necesita la población mundial en crecimiento. Según Macías (2015), este es el reto y la oportunidad para los edafólogos de hoy y mañana. Este debe ser el reto para seguir aprendiendo de los suelos y haciendo Ciencia del Suelo.

REFERENCIAS

- Babel, U. (1985). Basic organic components. En: Bullock *et al.* (Eds), Handbook for soil thin section description. Waine Research Publ., Chap. 7, pp. 74-87.
- Brewer, R. (1964). Fabric and mineral analysis of soil. John Wiley & Sons, Sidney, pp. 470.
- Brevik, E.C. y Hartemink, A. E. (2010). Early soil knowledge and the birth and development of soil science. *Catena*, 83: 23-33.
- Buol, S. W., F. D. Hole, y R. J. McRacken. (1980). Soil genesis and classification. Iowa University Press, pp. 404.
- Boulaine, J. (1989). Histoire des Pédologues et de la Science des Sols. INRA. Paris.
- Doran, J.B.; Sarrantonio, M. y Liebig, M. (1996). Soil health and sustainability. In: Spark, D. L. (Ed.). *Advances in Agronomy*. Vol.56. pp. 1-54. Academic Press, San Diego, CA.
- Díaz-Fierros, F. (2015). What does the future hold for soil science? *Spanish Journal of Soil Science*, 1 (1): 54-59.
- Doran, J. W., y Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing quality. En: Doran *et al.* (Eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*, pp. 3-22. SSSA Spec. Publi., 35. SSSA and ASA, Madison, WI.
- Eswaran, H., y Shoba, S. A. (1983). Scanning electron microscopy in soil research. En: Bullock, P., y C. P. Murphy (Eds), *Soil Micromorphology*, Vol. 1. Techniques and application. AB Acad. Publi. Pp. 19-52.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, pp. 99.
- Fanning, D. S, y Fanning, M.C.B. (1989). *Soil Morphology, Genesis, and Classification*. Wiley & Sons, New York, pp. 395.
- Hartemink, A. E. (Editor). (2006). *The future of soil science*. IUSS International Union of Soil Science. Wageningen, The Netherlands, pp. 165.
- IUSS-WRB.(2015). *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legend for soil maps*. World Soil Resources Reports, N° 106. FAO. Rome.

- Jenny, H. (1941). Factors of soil formation. A System of Quantitative Pedology. Ed McGraw-Hill. New York.
- Krupenikov, I.A. (1992). History of Soil Science From its Inception to the Present. Oxonian Press. New Delhi.
- Kubiena, W. L. (1953). Claves sistemáticas de suelos. Inst. Edafol. CSIC, Madrid, pp. 388.
- Lal, R. (2004). Soil Carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1627.
- Larson, W.E., y Pierce, F. J. (1991). Conservation and enhancement of soil quality. En: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Vol. 2, 175-203. IBSRAM Proc. 12 (2) Bangkok., Thailand. Int. Board Soil Res. Manage.
- Macías, F., Bao, M., Macías-García, F. y Camps Arbestain, M. (2007). Valorización biogeoquímica de residuos por medio de la elaboración de Tecnosoles con diferentes aplicaciones ambientales. *Aguas & Residuos*, 5: 12-25.
- Macías, F. (2015). Retos y oportunidades de la Ciencia del Suelo: aprendiendo de la naturaleza, aprendiendo de los suelos. *Spanish Journal of Soil Science*, 1 (1): 1-11.
- Mermut, A. R. y Eswaran, E. (2001). Some major developments in soil science since the mid-1960s. *Geoderma*, 100: 403-426.
- Petersen, G. W. (2006). Soil science: multiple scales and multiple opportunities. En: Hartemink, A. E. (Ed.) The future of soil science. IUSS. Wageningen, The Netherlands, pp. 108-112.
- Pierzynski, G. M., Sims, J. T., y Vance, G. R. (2000). Soils and Environmental Quality. 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 459.
- Simonson, R. W. (1968). Concept of soil. *Adv. Agron.*, 21: 1-47.
- Simonson, R. W. (1978). A multiple-process model of soil genesis. En: Mahaney, W.C. (Ed), Quaternary Soils. Geo-Abstract. England.
- Simonson, R.W. (1986). Historical aspects of soil survey and classification. Part. 1. 1899-1910. *Soil Survey Horizons* 27: 3-11.
- Smart, P. (1979). Manipulation. En: Fairbridge, R.D., and Ch. Finki (Eds), The Encyclopedia of soil Science. Part 1. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc, pp. 300-306.
- Soil Science Society of America. (1995). Statement of soil quality. *Agronomy News*. June 7. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- Soil Survey Staff. (1951). Soil Survey Manual. Soil Survey Staff, nº 18. USDA. Pp. 503.
- Soil Survey Staff. (1975). Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. *Agricultural Handbook* nº 436. USDA, Washington DC.
- Soil Survey Staff. (1978). Application of Soil Survey Information. Soil Survey Staff, Notice 24. USDA.
- Soil Survey Staff. (1993). Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. USDA Handbook 18.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC.
- Tinker, P.B. (1985). Soil Science in a Changing World. *Journal of Soil Science*, 36: 1-8.
- USDA-NRCS. (1999). A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. 2nd edition. *Agriculture Handbook* nº 436. USDA. Washington, DC.
- Warkentin, B.P. (Ed), (2006). Footprints in the soil: People and Ideas in Soil History. Elsevier Amsterdam.
- White, R.E. (1979). Introduction to the principles and practice of soil science. Blackwell Sci. Publ., Oxford, pp. 198.
- Wild, A. (1989). Soil Scientists as members of Scientific Community. *Journal of Soil Science*, 40: 209-221.
- Yaalon, D.H. y Berkowicz, S. (Eds), (1997). History of Soil Science-International Perspectives. Catena Verlag. Reiskirchen, pp. 438.