



**FACULTAD DE FARMACIA**  
**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**TÍTULO:**

**Indicadores de salud del suelo: un reto  
necesario para mantener adecuadamente el  
suelo y proteger nuestra salud**

Autor: María del Carmen Cabanillas Macías

Fecha: Junio 2020

Tutor: María Teresa de la Cruz Caravaca

## Índice

1. Resumen	1
2. Introducción	2
2.1. Antecedentes en la búsqueda de calidad del suelo	3
2.2. Concepto de salud del suelo	4
2.3. Concepto de indicador	5
3. Objetivos	6
4. Metodología	6
5. Resultados y discusión	7
5.1. Indicadores de salud del suelo	7
5.1.1. Indicadores multiparamétricos	8
5.1.2. Métodos de medición	8
5.1.3. Indicadores futuros	9
5.2. Causas de pérdida de salud del suelo	9
5.3. El suelo y su influencia en la salud del ser humano	12
5.4. La emergencia del COVID-19 y su impacto en el suelo y la salud	14
6. Conclusiones	15
7. Bibliografía	16

### 1. Resumen

El suelo es una sinergia de elementos naturales y vivos. Contiene un cuarto de la biodiversidad de la Tierra y brinda una serie de funciones de las cuales depende la vida: proporciona aire y agua más limpios, bosques y cultivos productivos, biodiversidad y belleza salvaje. Esto sólo se puede alcanzar a través de la salud del suelo, que se define como su capacidad para mantener las funciones y cuya forma de evaluación consiste en un monitoreo multidisciplinar y único para cada uso y características del suelo. Los indicadores de calidad son la herramienta mediante la cual se cuantificará el nivel de salud y el impacto de la gestión del suelo, y los hay físicos, químicos y biológicos. Es importante que además de conocer la salud del suelo, distinguir cuáles son los procesos que le restan salud (procesos degradativos) y cómo una gerencia responsable y sostenible nos ayuda a preservar el ecosistema. Estos procesos son aquellos que alteran el ciclo natural del suelo y pertenecen

a ellos la erosión, deforestación, contaminación, salinización, sellado y la pérdida de biodiversidad y materia orgánica.

A lo largo de las siguientes páginas definiremos la salud del suelo y sus indicadores, indagaremos acerca de los problemas degradativos del suelo, estableceremos la relación entre “suelo-enfermedad-ser humano” y reflexionaremos sobre la crisis del COVID-19 (2020) y su impacto en el ecosistema.

## **2. Introducción**

El suelo es una entidad viva formada por minerales, materia orgánica, agua, aire y otros organismos y microorganismos vivos que conviven en él en perfecta armonía. Contiene una cuarta parte de la biodiversidad de todo el planeta, albergando en él desde pequeños vertebrados a nematodos, insectos, hongos, bacterias, ácaros y actinomicetos. Es tal la biodiversidad del suelo que hay más vida en una cucharada de suelo sano que personas en la Tierra (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015a).

Los minerales que constituyen el suelo derivaron del “material parental”, el cual proviene de rocas de la corteza terrestre. Debido a procesos de alteración, que implican altas presiones y temperaturas, de enfriamiento y del imparable paso del tiempo, el material parental va cambiando, aportando gran variedad a los componentes minerales del suelo: silicatos, óxidos, sulfatos, carbonatos y sales. La materia orgánica del suelo comprende elementos en descomposición de diversa índole que, tras ser disgregados por hongos, bacterias y/o actinomicetos, liberan sustancias que favorecen la nutrición de plantas y organismos que viven en él.

Agua y aire son inyectados al suelo de diversas formas. La precipitación atmosférica, el crecimiento de raíces e incluso el movimiento de nematodos que viven allí permite la creación de canalículos que airean, forman depósitos de agua y también posibilitan la expansión de las raíces de las plantas. El equilibrio entre agua y aire en el suelo es fundamental para que éste realice sus funciones de forma adecuada.

Cada uno de estos componentes que forman parte del suelo vivo son esenciales en su funcionamiento (Dinesh R. et al., 2018; López Lafuente A., 2017), e interactúan entre sí, lo que añade una gran complejidad que genera alta diversidad de suelos.

La tasa de formación del suelo varía entre 0,001-1mm/año, lo cual significa que pasarán entorno a 1000 años para que se forme un horizonte A, y en suelos ricos en arcilla oscilará entre 3-8 mil años. Por tanto, suelo es un recurso no renovable que debemos proteger (López Lafuente A., 2017; Solleiro Rebollo E., 2015). La necesidad de su protección se recoge en los siguientes puntos:

- Contribuye a la seguridad alimentaria
- Mitiga el cambio climático
- Alberga la cuarta parte de biodiversidad de la tierra
- Proporciona medios de subsistencia para grupos de población
- Otorga agua más limpia
- Ofrece nuevos medicamentos

Existen instituciones globales de protección del suelo como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), de ámbito europeo como *The European Soil Partnership* (ESP), *European Confederation of Soil Science Societies* (ECSSS) o *The European Soil Data Centre* (ESDAC); y en España como la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SECS).

Sumado a estas organizaciones hay en marcha gran cantidad de proyectos, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para el 2030, la Década Internacional de los Suelos y la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) cuyo objetivo es proteger el mundo vegetal frente a las plagas, promoviendo el comercio seguro, que ha adquirido especial protagonismo en la crisis del COVID-19 (2020).

## **2.1. Antecedentes en la búsqueda de calidad del suelo**

Durante la primera mitad del siglo XIX la química agraria despertó en Europa. La agricultura intensiva de los suelos, debido a una población mundial en crecimiento, dejaba tras de sí un suelo cada vez más pobre. Ante esta falta de nutrientes, el sector químico desarrolló fertilizantes: guano, nitrato de sosa, sulfato amónico, nitrato de Chile y compuestos nitrogenados sintéticos (Mateu Tortosa E., 2013).

Con ello se consiguió aumentar el rendimiento de las cosechas, (desde una perspectiva escasa de lo que significa “calidad del suelo”) cubriendo la demanda de alimentos e impulsando la agricultura industrial. A esta carrera por la super productividad se quiso sumar España, dedicando un gran esfuerzo mediático por parte de asociaciones de agricultores para que los labradores los empleasen en sus campos. El uso de abonos sintéticos aumentó paralelamente la utilización de plaguicidas, y así se ha mantenido como tendencia durante largos años (Sexton SS. et al., 2007).

En aquellos tiempos los agricultores determinaban la salud del suelo de forma más intuitiva, basándose en la experiencia, en el ensayo y error, sin contemplar ningún tipo de índice de calidad. Esto nos muestra la dificultad a la que aún los investigadores se enfrentan para dar respuestas a la medición de parámetros de salud de un ser cambiante y vivo como lo es el suelo.

Así, la evolución de los indicadores comenzó por ser la observación del color, la textura y la productividad, y fue integrando otros parámetros como el estudio de las plantas autóctonas, el contenido en materia orgánica, el análisis de los horizontes y la filtración. Paulatinamente los indicadores físicos y químicos que usaban los agricultores progresaron hasta la introducción de parámetros biológicos, más sensibles a cambios. En la literatura también encontramos indicadores que dejaron de emplearse, como por ejemplo el cociente metabólico, y otros que aún hoy se usan como el índice de carbono proveniente de la biomasa microbiana (Bastida F. et al., 2008a).

Poco a poco, se fue forjando la idea de que la calidad del suelo estaba sensiblemente ligada a dos conceptos: que está determinada por sus propiedades intrínsecas y los procesos dinámicos que tienen lugar en él y que esto queda reflejado en sus características físicas, químicas y biológicas. Como ejemplo de procesos dinámicos encontramos el ciclo de nutrientes y agua o el filtrado y la acumulación de sustancias de diferente índole (Karlen DL. et al., 2003).

## 2.2. Concepto de salud del suelo

Actualmente, la calidad (o salud) del suelo está determinada por la combinación de propiedades químicas, físicas y biológicas que contribuyen a su funcionamiento (Bastida F. et al., 2008a). Un suelo saludable posee la capacidad de conservar su funcionalidad dentro de un ecosistema y, para un uso determinado, mantener su productividad biológica, sosteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de plantas y animales (Doran JW. et al., 1994). Por lo que podemos decir que a día de hoy contemplamos una definición más holística, incluyendo al ecosistema y al medio ambiente en general.

De entre las funciones del suelo encontramos que es hábitat, sustento, regulador del clima, purificador del agua y de los contaminantes, tesorero de carbono, sustentador de alimentos, fibras, combustibles y materiales, base para infraestructuras, fuente de medicina y librerías genéticas y herencia histórica (East National Technology Support Center et al., 2011; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015b). La función del suelo depende directamente del ecosistema que lo sostiene y del uso que se le da. La siguiente imagen (Figura 1) muestra los ejemplos del uso del suelo en la Comunidad de Madrid.

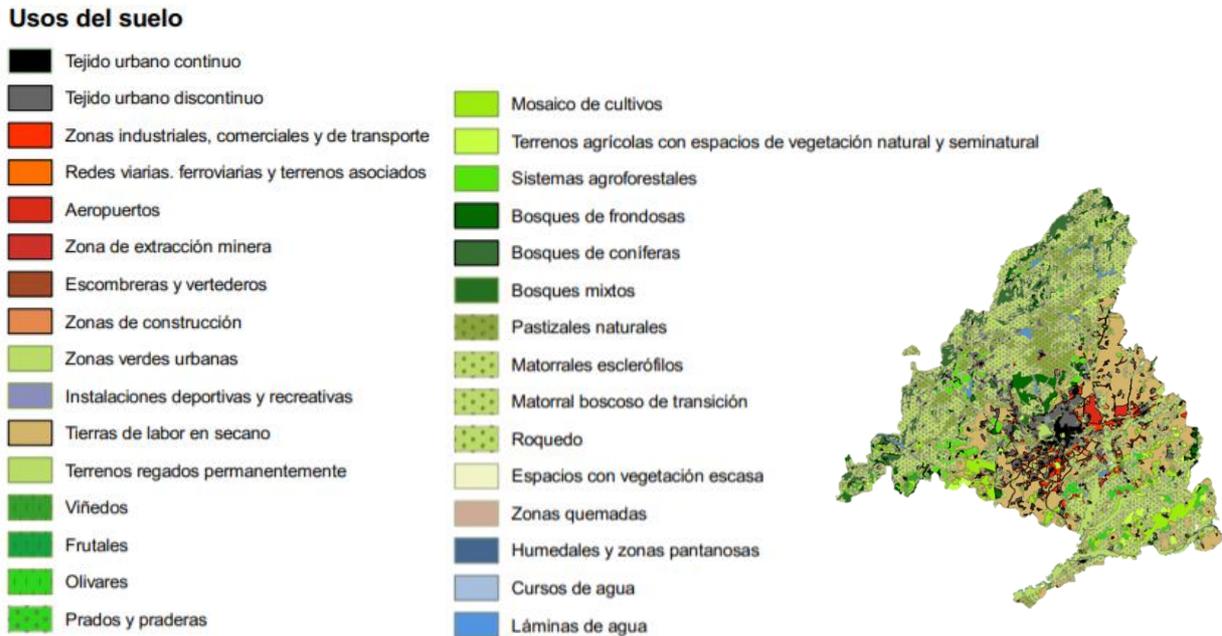


Figura 1. Adaptación de mapa de usos del suelo de la Comunidad de Madrid (Universidad Complutense de Madrid, 2016)

Como podemos ver, el suelo es reservorio de gran parte de la biodiversidad<sup>1</sup> del mundo y está íntimamente relacionada con su salud y, de hecho, se ha estudiado como bioindicador (Brevik EC., 2009; de Neergaard A., 2009; East National Technology Support Center et al., 2011).

<sup>1</sup> La biodiversidad es la heterogeneidad y variedad de los organismos que habitan un ecosistema.

Muchos de los procesos del suelo relacionados con la materia orgánica, con las propiedades físicas, el grado de filtración y de acumulación de agua están influenciados por la biota, especialmente por macrobiota (Cerón Rincón LE. et al., 2005; de Neergaard A., 2009; Verheye W., 2010).

Un ecosistema saludable es aquel que tiene equilibrio entre procesos energéticos y nutritivos, estabilidad y resiliencia. La resiliencia es la habilidad de un suelo para recuperarse de una situación de estrés debida al clima o a un cambio en su uso (Gabriels D. & Cornelis WM., 2009).

La determinación de la salud del suelo es esencial para conocer su calidad y ésta depende del uso al que se destine. Salud y calidad actúan como un sinónimo en cuanto a suelo se refiere (Brevik EC., 2009). Así, la salud del suelo está conectada a la del ser humano, especialmente notable en suelos destinados a la agricultura, donde suelos pobres darán menos cultivos y con menor calidad nutricional. Un suelo saludable es un protector contra la erosión y mejoran la calidad del agua y del aire (Brevik EC. & Burgess L., 2012; Science Communication Unit & University of the West of England, 2013).

### 2.3. Concepto de indicador

Según la Real Academia Española, *indicar* (Real Academia Española) es “mostrar o significar algo con indicios y señales”. Por tanto, un indicador será la herramienta de medida que manifiesta la salud a través de la evaluación de un conjunto de parámetros físicos, químicos y biológicos, con el objetivo de establecer un estándar de calidad holístico para el recurso del suelo (Cerón Rincón LE. et al., 2005; Rayo Estrada-Herrera I. et al., 2017).

Para conocer la salud del suelo es fundamental actuar como un médico actúa con sus pacientes, buscando señales que le guíen hacia la prevención o hacia el diagnóstico de una patología. Y, como el médico, usar una serie de parámetros que le permitan evaluar su estado, los indicadores de salud. Igual que no hay dos personas iguales tampoco hay dos suelos iguales (Cruz AB. et al., 2004; Science Communication Unit & University of the West of England, 2013), y con esta premisa se debe trabajar en el mantenimiento de su salud.

Estos indicadores se comprometen a ser útiles en la definición de los procesos que se dan en un ecosistema, en integrar las diferentes propiedades del suelo y en ser sensibles bajo los cambios climáticos y el tiempo.

El indicador ideal debería ser (Bloem J. et al., 2005; Cruz AB. et al., 2004; East National Technology Support Center et al., 2011; Segueda Navarrete A. et al., 2011):

- I. Sensible
- II. Representativo del ecosistema en concreto
- III. Útil para esclarecer procesos negativos
- IV. Fácil, accesible y reproducible
- V. Económico

Cualquier parámetro que proporcione información importante acerca de la salud del suelo se puede usar como un indicador, y varios indicadores se pueden englobar para dar lugar a un índice. Por ejemplo, el contenido en carbono orgánico es un parámetro

que se correlaciona con el contenido en materia orgánica, su reducción en un periodo de tiempo determinado es un índice de empobrecimiento y puede ser indicador de pérdida de fertilidad y de deterioro (Bloem J. et al., 2005).

### **3. Objetivos**

El objetivo fundamental de este trabajo es revisar qué indicadores de calidad del suelo se pueden emplear para diagnosticar procesos de degradación, con el fin de contribuir a la conservación y protección de los suelos y evitar, a su vez, que su uso pueda afectar a nuestra salud.

Para llegar a su consecución se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Revisar el concepto de salud del suelo y establecer posibles indicadores
- Identificar las causas de pérdida de salud del suelo
- Establecer la relación entre el uso del suelo y la salud humana
- Explorar la relación entre la salud del suelo y la emergencia del COVID-19

### **4. Metodología**

Se realizó una revisión sistemática de bibliografía científica en motores de búsqueda como Google Académico, ScienceDirect, ResearchGate, Scielo, PubMed, Elsevier y Dialnet, siendo la literatura consultada libros, bases de datos, revistas, tesis, material proporcionado por la tutora, etc.

Se seleccionaron preferentemente los artículos que contenían “indicador de calidad del suelo” o “indicador de salud del suelo” en el título. El criterio de inclusión se centró, principalmente, en la fecha de publicación del estudio, desde el año 2000 (exceptuando información de la FAO que no ha sido actualizada) en español, inglés o italiano. Como criterios de exclusión se suprimieron aquellos que no estuvieran relacionados con el tema o que no procedieran de una fuente científica fiable.

Las palabras clave empleadas incluyen “indicador”, “calidad del suelo”, “salud del suelo”, “sostenibilidad”, “biodiversidad”, “degradación”, “resiliencia” y “ecosistema”.

### **5. Resultados y discusión**

#### **5.1. Indicadores de salud del suelo**

Los suelos comparten entre sí una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas, y la determinación de su salud se hará a través de los ya mencionados indicadores de calidad (Brevik EC., 2009). Como cada suelo ha sido formado bajo unas condiciones locales determinadas y tiene un uso concreto, es imposible establecer un único indicador para la evaluación de su salud. La medición de estos parámetros se realiza, por tanto, a través de la combinación de varios indicadores (Tabla 1), agrupándolos en índices de calidad. Los indicadores miden propiedades a corto, medio o largo plazo, y cada una de

las categorías se relaciona con varias funciones del suelo (East National Technology Support Center et al., 2011; García Y. et al., 2012; Rayo Estrada-Herrera I. et al., 2017).

Indicadores físicos	Indicadores químicos	Indicadores biológicos
Estructura	pH	Carbono de la biomasa microbiana
Densidad aparente	Materia orgánica <sup>2</sup>	Respiración basal
Estabilidad de los agregados	Carbono orgánico total	Diversidad de la biota
Infiltración	Nitrógeno total	Diversidad de la fauna y flora
Conductividad	Capacidad de intercambio catiónico	Actividad enzimática
Profundidad del suelo	Disponibilidad de nutrientes	Tasa de descomposición

Tabla 1. Indicadores más comunmente empleados (Bastida F. et al., 2008a; Brevik EC., 2009; García Y. et al., 2012)

- **Indicadores físicos:** se vinculan con la estabilidad, la recepción, retención y absorción de agua, nutrientes y minerales, y el hábitat. La propiedad física más apropiada para su uso como indicador es la relacionada con la estabilidad de los agregados, ya que evidencia la absorción, de agua, minerales y nutrientes de las plantas, y sus limitaciones (Bastida F. et al., 2008b; Cruz AB. et al., 2004).
- **Indicadores químicos:** se asocian con la calidad del agua, la capacidad amortiguadora y la disponibilidad de nutrientes, afectando directamente al vínculo suelo-planta-microorganismos. Estos parámetros dan información acerca de la fertilidad del suelo, el potencial productivo, la actividad y crecimiento de los seres vivos que lo habitan, la disponibilidad de nutrientes y el grado de calidad ambiental. La concentración de carbono orgánico del suelo es el indicador que más información arroja sobre el estado de salud del suelo dentro de esta categoría (García Y. et al., 2012; Rayo Estrada-Herrera I. et al., 2017).

<sup>2</sup> El contenido en **materia orgánica** es el parámetro mas importante, y más utilizado en la medición de salud del suelo, ya que influye directamente en las tres categorías de indicadores (Karlen DL et al., 2019). Las fuentes de obtención son tejido vegetal, animal y material de desecho. Su influencia en las propiedades físicas se relaciona con la formación y estabilidad de los agregados, ya que junto a las secreciones de la biota del suelo se crea una sustancia mucosa que favorece el proceso. Esos agregados mejoran la infiltración y acumulación de agua, y protegen frente a la erosión. Con respecto a las propiedades químicas, la descomposición de la materia orgánica libera nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno o el azufre, actuando como un fertilizante natural que disminuye la demanda de otros suplementos industriales. Esta liberación de sustancias iónicas también influye en la regulación del pH del suelo protegiendo de la acidificación (Brevik EC., 2009).

- **Indicadores biológicos o bioindicadores:** se ven afectados por la biodiversidad, la redistribución de nutrientes y el filtrado. Su uso para evaluar la calidad del suelo ha asumido un papel importante debido a que los microorganismos responden más rápidamente a los cambios en el uso del suelo, la contaminación o el ecosistema en comparación con las otras categorías de indicadores (Bastida F. et al., 2008b; Garbisu C. et al., 2007).

Dentro de esta categoría destaca la **actividad enzimática** como indicador de salud porque mide la actividad microbiana y está ligada a los ciclos de nutrientes, responde rápidamente a cambios naturales y antropogénicos en el suelo y es fácilmente medible (Bloem J. et al., 2005; Puglisi E. et al., 2006). Las enzimas catalizan y son substratos de reacciones químicas en los seres vivos. En el suelo, los organismos liberan enzimas al ambiente que pueden interactuar con componentes orgánicos o minerales, y se detectan actividad de deshidrogenasas, transferasas, hidrolasas, liasas y oxidoreductasas. La velocidad de las reacciones catalizadas por las enzimas, a su vez, se ve afectada por parámetros como el pH, la T<sup>a</sup> o la presencia de inhibidores (Bloem J. et al., 2005; Cerón Rincón LE. et al., 2005).

#### 5.1.1. Indicadores multiparamétricos

Los índices multiparamétricos tratan de cumplir con las premisas de medición de calidad del suelo con el menor número de datos posible o *minimum data set* (MDS). Se basa en resultados de métodos de análisis de compuestos principales del suelo (PCA), por los que se caracteriza el suelo en concreto; en la opinión de expertos (EO), que se compone de consulta de literatura científica; en la experiencia de campo y en el estudio de las relaciones entre suelo-ecosistema (Segueda Navarrete A. et al., 2011; Vasu D. et al., 2016).

Una vez se han seleccionados los MDS los indicadores se transforman en funciones matemáticas (lineales o no) y se acoplan a un sistema adimensional al que pertenece el índice de calidad del suelo (ICS). Se pondera según el valor que tenga en la función del suelo que se estudia y se crea la ecuación correspondiente (Anaya-Gómez ML. & Jaramillo Jaramillo DF., 2017).

#### 5.1.2. Métodos de medición

La medida de la calidad del suelo se puede realizar a través de kits rápidos, análisis de laboratorio, paneles de colores del suelo (Munsell®) o mediante teledetección. Los kits proporcionan resultados rápidamente pero suelen ser poco exactos y, además, sólo son capaces de medir una propiedad concreta (como por ejemplo el pH) (de Paul Obade V. & Rattan L., 2016). Las pruebas de laboratorio requieren una toma de muestra más selectiva, son métodos más lentos y menos económicos, aunque sus resultados suelen ser más indicativos de calidad. Además permiten mapear un terreno y recoger datos para crear modelos geoestadísticos, de aplicación directa en la medición de parámetros químicos como el carbono orgánico. Los diagramas de colores son subjetivos ya que dependen de la percepción del observador, y asumen que los colores oscuros son señal de un mayor porcentaje de materia orgánica. La teledetección incluye técnicas que no dañan el suelo y proporcionan buenos resultados acerca del estado de salud, por ejemplo

con el uso de radiaciones electromagnéticas en el espectro visible y casi en el infrarrojo (McBratney AB. et al., 2003).

El mapeo digital del suelo es una de las herramientas de medida más actuales ya que integra datos del suelo (observaciones de campo y datos de laboratorio), variables del ecosistema y factores predictivos, los llamados *scorpan*. Estos factores engloban: (S) suelo y sus parámetros ; (C) clima y propiedades concretas del medio ambiente; (O) organismos y vegetación; (R) topografía, particularidades del terreno y clase; (P) material parental; (A) edad; (N) posición en el espacio, geografía (Reynolds JF. et al., 2007).

### 5.1.3. Indicadores futuros

La tendencia futura es continuar con el estudio de las relaciones entre biota y salud del suelo y a través de la genómica microbiana y otras técnicas moleculares podremos avanzar en la comprensión de tal íntima conexión. Este entendimiento nos guiará a la protección de la salud del suelo frente a la crisis climática, la degradación o las sequías, e impulsará la agrosostenibilidad.

Otro punto de interés futuro será el desarrollo y uso de sensores *in situ* que den información eficiente y a bajo precio. También se verá impulsado el empleo de la teledetección en el infrarrojo junto a otras mediciones a través de sensores remotos, con el objetivo del mapeo de salud de los suelos (Karlen DL et al., 2019).

El continuo desarrollo de la metaproteómica, el *pool* de proteínas del complejo microbiológico, promete proporcionar indicadores altamente específicos. Su estudio detecta nuevos genes funcionales y revela información relacionada con la biodiversidad de la biota, clave en la salud del suelo, más rápidamente que en comparación con el empleo de técnicas de PCR. Aumentar la base de datos genómica y mejorar las técnicas de secuenciación serán los objetivos futuros en esta materia (Bastida F. et al., 2008b).

## 5.2. Causas de pérdida de salud del suelo

La degradación de los ecosistemas es el mayor problema que presenta la biosfera y es consecuencia de una intervención humana mal gestionada y con escasa planificación, que ha ocasionado el deterioro de los recursos naturales.

Los principales procesos de degradación que afectan a la salud del suelo son: la erosión, la deforestación, la contaminación, la salinización, el sellado del suelo y la pérdida de biodiversidad y de materia orgánica (Barral Muñoz A. et al., 2020; Garbisu C. et al., 2007).

- La **erosión** se categoriza en acelerada y geológica. La erosión geológica es un proceso natural y beneficioso para el ecosistema ya que aporta sedimentos y nutrientes a ríos, lagos y playas, mientras que la erosión acelerada se relaciona con la desertificación y es la parte más negativa de este proceso. La desertificación genera degradación de los suelos, pérdida de biomasa y alteraciones en los compartimentos hídricos. Mientras que la erosión geográfica sí puede regenerarse, la acelerada no. Los factores naturales que contribuyen en la erosión son climáticos, especialmente las precipitaciones, y los artificiales son los relacionados con la actividad humana. Influirá también la capacidad de

resistencia a la erosión de ese suelo, que depende directamente de la estabilidad de sus agregados (Cerdá A., 2001).

Los cambios en el uso del suelo es uno de los puntos centrales de investigación de erosión medio ambiental ya que pone en riesgo la evolución de los ecosistemas. La urbanización del medio natural, sumado a la actividad erosiva de las lluvias, son una de las causas que más erosión generan (Ferrerías L. et al., 2007), así como la agricultura intensiva, el monocultivo o el exceso de fertilizantes químicos (Cecchi G. et al., 2005). La erosión elimina la capa superficial del suelo rica en nutrientes, lo que causa pérdidas en el rendimiento de las cosechas y aumenta la probabilidad de que se contamine el agua de sus canales subterráneos. Estos contaminantes proceden de la descomposición de la materia orgánica del suelo, de los agroquímicos y de los sedimentos minerales. Por tanto, supone también riesgos en la seguridad alimentaria (González Huecas C., 2017).

- El IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) define la **deforestación** como el cambio de tierra forestal a no forestal. Junto a la degradación forestal, cuyo agente causal es la producción de carbón vegetal, contribuye al cambio climático (Doggart N. et al., 2020). La pérdida de bosque tiene un fuerte impacto sobre el ciclo global del carbono debido a la depleción del stock de este elemento y a la emisión de gases de efecto invernadero, que es mayor en suelos propensos a la erosión acelerada. La tala de árboles expone directamente a la erosión de los suelos por procesos climáticos, disminución de agua del suelo y compactación por prácticas ganaderas, y aumenta la temperatura ambiental por falta de masa forestal. Todas estas consecuencias afectan directamente a la biodiversidad de la zona, tanto en flora como fauna, que pierde su hábitat natural (Cañas K. et al., 2020). Entre las causas más comunes de la deforestación encontramos la agricultura, la ganadería, la recolección de leña, la producción de carbón, la construcción de estructuras y vías y los incendios, normalmente provocados por el ser humano para la transformación en tierra cultivable (Doggart N. et al., 2020).
- La **contaminación** es un tipo de degradación química que se produce por el acúmulo de sustancias tóxicas antrópicas, que supera la capacidad amortiguadora del suelo, en concentraciones que suponen un riesgo inaceptable para la salud humana o del ecosistema (BOE número 15 del 18 de enero de 2005). Los contaminantes se dividen en inorgánicos, orgánicos y biológicos, y comprenden fertilizantes, metales pesados, isótopos radiactivos, pesticidas, combustibles, productos farmacéuticos, bifenilos policlorados, dibenzofuranos policlorados, patógenos del sistema gastrointestinal y residuos de la actividad humana. La contaminación del suelo sirve como vector para las contaminaciones del aire y agua. Las sustancias contaminantes pueden volatilizarse hacia la atmósfera, sufrir lixiviación hacia los acuíferos, interactuar con compuestos íntegros del suelo o adsorberse a través de las plantas o de la microbiota (González Huecas C., 2017; Science Communication Unit & University of the West of England, 2013). Los contaminantes del aire, procedentes por ejemplo de los combustibles fósiles, son también vectores de enfermedades y a través de la inhalación pueden llegar a los seres vivos.

- El exceso de **salinidad** es un estresor del suelo e interrumpe el crecimiento de las plantas, disminuye la biodiversidad y afecta a la biota del suelo. Se asocia principalmente a lugares con escasa precipitación y a la gestión inadecuada de los terrenos de cultivo, relacionándose principalmente con las zonas desérticas. Afecta a la salud del suelo y altera varios parámetros biológicos: la biomasa microbiana, la respiración y la actividad enzimática. En los organismos, la alta concentración de sales eleva la osmolaridad extracelular y no todas las especies se adaptan a ello (Zhang K. et al., 2019).
- El **sellado del suelo** consiste en cubrirlo con materiales impermeables, como asfalto u hormigón, para el desarrollo urbanístico o de infraestructuras, constituyendo otra de las causas de degradación del suelo (López Lafuente A., 2017). El sellado implica la desconexión total del medio ambiente con el suelo por lo que, referente a la salud del suelo, sólo aporta aspectos negativos. Implica pérdida de biodiversidad e interrumpe rutas migratorias, aumenta el riesgo de escasez de agua y de inundaciones, aumenta la polución y contaminación acústica, contribuye al aumento de la temperatura en las ciudades y a la crisis climática. Con una población global en crecimiento, supone uno de los problemas más acentuados del mundo moderno (European Commission for Environment, 2019; FAO, 2016). Además, suele acompañarse con la ocupación del suelo, es decir, de suelos anteriormente salvajes, y son procesos irreversibles. El manejo del sellado del suelo incluye limitar su expansión, mitigar y compensar sus efectos con la recuperación de otros suelos dañados, todo ello apoyado sobre decisiones ecológicas en política (Unión Europea, 2013).
- La **compactación del suelo** es derivada del sobrepastoreo, que se genera por un exceso de pisoteo, y del uso de maquinaria pesada. Es un proceso degradativo que comienza por la pérdida de pasto y se va imposibilitando poco a poco la infiltración y absorción de agua, que merma la materia orgánica y en último lugar la biota. El cambio periódico de zonas de pastoreo puede evitarlo (FAO, 1996).
- La **pérdida de diversidad de especies** empobrece la variedad genética en el suelo. Junto a la deforestación, hay una modificación en el ciclo de nutrientes, dando lugar a cambios o destrucción de hábitat y a un aumento en la propagación de enfermedades (Cerón Rincón LE. et al., 2005). Una riqueza en especies establece interacciones de competencia, depredación, parasitismo, etc. Se crea un control natural demográfico que también mantiene a raya a los patógenos. Si el equilibrio entre especies se rompe, si se pierde biodiversidad, es posible que aumente la población de especies portadoras de enfermedades y que, probablemente, lleguen al ser humano. La abundancia de especies también hace que la posible carga viral de un patógeno se diluya, por los procesos de competencia. Aún así hay que tener en cuenta que es la población autóctona la que debemos proteger, ya que la introducción de otras especies, de fauna o flora, en regiones que no son adecuadas para su desarrollo también afecta al resto, estimulando, paradójicamente, pérdida de biodiversidad (FAO, 1996). Otra de las causas de pérdida de biodiversidad actual es el cambio climático, que entre

muchos efectos destuye el hábitat de muchas especies, como sucede con los osos polares (Freitas H., 2009).

- La **pérdida de materia orgánica** se asocia a varios procesos degradativos ya citados. Otro de ellos es la desertificación, lugares donde la escasez de lluvias, la variación de temperaturas y la escasa vegetación generan zonas áridas o semiáridas con suelos poco desarrollados. Si no se aplican medidas protectoras rápidamente termina de mermar sus pocos recursos y da lugar a un desierto (FAO, 1996).

### 5.3. El suelo y su influencia en la salud del ser humano

Hoy en día relacionamos “contaminación” con “daño” o “enfermedad”. Somos conscientes de que la contaminación del aire y del agua afecta a nuestra salud, por lo que la legislación para proteger estos recursos se ha desarrollado ampliamente. Sin embargo la contaminación del suelo y su relación con la enfermedad no está tan clara, probablemente porque el suelo es el único sistema de la biosfera que tiene un cierto poder de amortiguación frente a los impactos, lo que hace que el suelo sea el principal elemento protector de los otros compartimentos ambientales.

La preocupación por el deterioro de la calidad suelo y cómo puede afectar a la salud fue advertida por la Comisaria de Medio Ambiente de la Unión Europea, Margot Wallstrom, en la reunión que mantuvo con los ministros de medio ambiente de los países europeos en 2002, donde les insta a considerar la protección de los suelos al mismo nivel que la conservación de la calidad del agua o del aire.

Según la OMS los contaminantes químicos que más preocupan en materia de salud pública global son, el arsénico, el amianto, el benceno, el cadmio, la dioxina y derivados, el fluoruro (en cantidades tóxicas), el plomo, el mercurio y los pesticidas altamente peligrosos. En este sentido, una herramienta básica desde el punto de vista de protección de la salud es el Real Decreto 9/2005, del 14 enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados (BOE número 15 del 18 de enero de 2005). Este RD tiene en cuenta valores normativos, Niveles Genéricos de Referencia (NGR), que sirven para detectar situaciones anómalas, y si estas anomalías llevan asociadas una situación de riesgo inaceptable, condición *sine qua non* para poder afirmar que el suelo está contaminado, deberá realizarse una valoración de riesgos. Se define “suelo contaminado” como aquel que, debido a la actividad humana, ha adquirido de forma significativa ciertas sustancias que plantean un riesgo para la salud humana o medioambiental, y así se haya declarado mediante resolución expresa.

La gran capacidad de resiliencia que tiene el suelo provoca que el descubrimiento de una sustancia tóxica en él se detecte cuando su presencia ya está bastante avanzada (Agency for Toxic Substances & Disease Registry, 2011a, 2011b; Tóth G. et al., 2016).

En suelos europeos encontramos que los metales pesados (Figura 2), el petróleo y los pesticidas (Reyes YC. et al., 2016) se sitúan en la cúspide. En España el arsénico y el cadmio son los metales pesados más abundantes en nuestras tierras (Cecchi G. et al., 2005; Science Communication Unit & University of the West of England, 2013).

La mayor exposición a estos tóxicos puede darse por causas como la expansión de la agricultura, la deforestación, las actividades mineras y una planificación escasa en el desarrollo de la actividad urbana (Henríquez Hernández LA. et al., 2020). Se cree que dichos contaminantes son responsables de un abanico muy amplio de enfermedades y sus efectos en la salud generan gran gasto público. Problemas como ciertos tipos de cáncer (de cerebro, melanoma, gastrointestinal, leucemia, mieloma múltiple, ...), desórdenes neuronales y menor cociente intelectual, daño hepático, problemas de reproducción y patologías del sistema esquelético y circulatorio se han relacionado con algunos de estos contaminantes (Brevik EC. & Burgess L., 2012). Y ya se ha constatado su presencia en sangre humana, arrojando datos acerca de la relación entre sexo, edad e IMC y la acumulación de metales pesados y tierras raras (Agencia para el Registro de Enfermedades y Sustancias Tóxicas, 2019; Asante-Duah K., 2017). Así mismo, el cultivo en suelos “enfermos” puede dar lugar a alimentos pobres en nutrientes que lleve a un déficit nutricional en la población que los consume, derivando a otras posibles enfermedades (International Agency for Research on Cancer & World Health Organization, 2015).

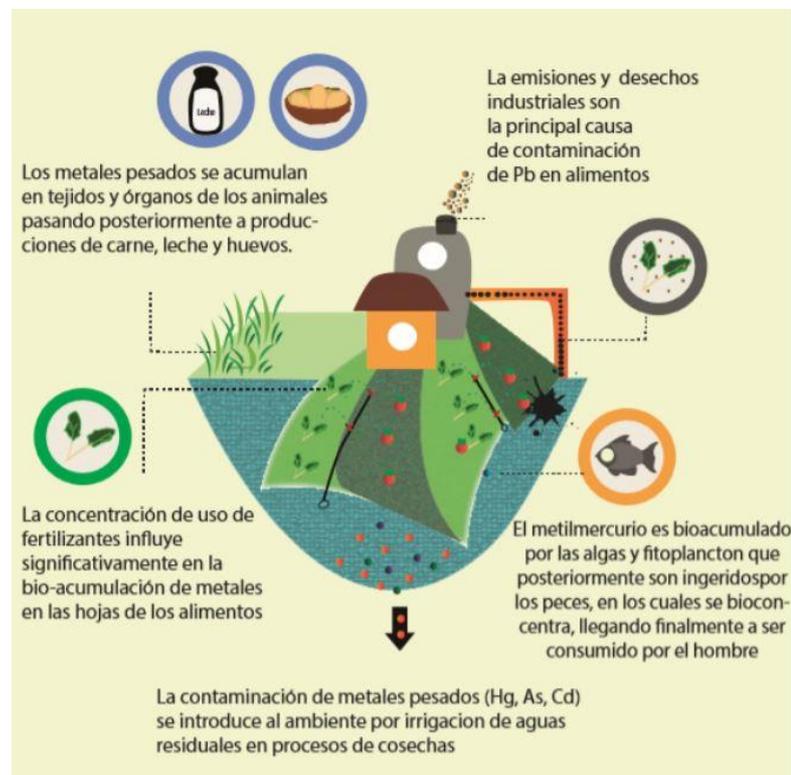


Figura 2. Fuentes de metales pesados y su contaminación (Reyes YC. et al., 2016)

El plaguicida diclorodifenil tricloroetano o DDT, usado en el pasado para el control de plagas en cosechas y actualmente para el control de la malaria en ciertos países, es un componente que sigue estando presente en el medio ambiente. El DDT es capaz de inundar agua, aire y suelo, permaneciendo allí cientos de años mientras se degrada lentamente por la acción de los microorganismos (Asante-Duah K., 2017; Dinesh R. et al., 2018; International Agency for Research on Cancer & World Health Organization, 2015). Su consumo, a través de agua, vegetales o animales que han acumulado DDT, inhalación y/o contacto de la piel con él, afecta especialmente al sistema nervioso del ser humano. Según la OMS y la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer es considerado un carcinógeno en seres humano (Dinesh R. et al., 2018; Science

Communication Unit & University of the West of England, 2013) y como plaguicida también se ha visto que puede causar pérdida de coordinación y de la memoria, menor respuesta a los estímulos y cambios en el humor (Science Communication Unit & University of the West of England, 2013; Visioli G. & Marmiroli N., 2013). El ejemplo del DDT aúna perfectamente el conflicto entre instituciones ambientales-ciencia-salud humana, y deja ver cómo unas naciones u otras priorizan (o no) la salud.

Las vías de entrada de los tóxicos en el ser humano son a través de la boca, las vías respiratorias y la piel (Cecchi G. et al., 2005; Dinesh R. et al., 2018). El consumo de plantas contaminadas, como aquellas que “superacumulan” contaminantes (Dinesh R. et al., 2018; Jeffery S. & van der Putten WH., 2011), la inhalación de polvo con partículas tóxicas y el contacto directo con la piel.

Otro ejemplo de contaminación encontrada fue la consecuente a los cambios en los patrones de lluvia en la que se encontró contaminación por materia fecal en las fuentes de suministro de agua debido a las inundaciones provocadas por la crisis climática. Dicha contaminación finalmente llegó al suelo, a través del uso del agua en el riego del cultivo, pudiendo generar también enfermedad para los seres vivos (Dinesh R. et al., 2018; Saunders SE. et al., 2009). En el suelo encontramos microorganismos que viven y completan su ciclo biológico (edáficos) y aquellos que sobreviven en suelo durante largos períodos de tiempo pero que necesitarán de un hospedador para completar su ciclo biológico. Como microorganismos edáficos, aquellos que atañen exclusivamente al suelo, encontramos bacterias y hongos que son causantes de enfermedades bien conocidas en el hombre, como ántrax, botulismo, listeriosis o aspergilosis (Cerón Rincón LE. et al., 2005). El suelo también es reservorio de priones, estructuras proteínicas infectivas, que pueden permanecer latentes gran cantidad de años y han sido causa de patologías como la enfermedad de Creutzfeld-Jakob (Astier Calderón M. et al., 2002).

#### **5.4. La emergencia de COVID-19 y su impacto en el suelo y la salud**

La pandemia del SARS-CoV-2 ha puesto en jaque la forma de hacer y gestionar la vida en general. Su llegada ha puesto en riesgo la subsistencia de muchas personas y ha traído consigo una crisis alimentaria de gran magnitud con el cierre de fronteras y la paralización de los mercados y la actividad económica. Más de 820 millones de personas pasan hambre en el mundo, y la cifra ha aumentado debido a esta crisis. Los países que ya sufrían inseguridad alimentaria (África, Oriente Medio, Asia y América Latina) son los más vulnerables, especialmente aquellos que dependen de la exportación de materias primas; la agricultura, pesca o ganadería (FAO, 2020).

En este sentido, los vegetales y cereales son el medio de subsistencia de más de la mitad de la población y constituyen la base de nuestra alimentación. El SARS-CoV-2 ha puesto de manifiesto la necesidad de garantizar la seguridad de los alimentos y de mantener libres de patógenos y plagas los cultivos. Como se ha abordado, una de las funciones del suelo es filtrar. Si ese suelo está “enfermo” puede verter dichos contaminantes a sus componentes y al agua, y si más adelante se emplea ese agua contaminada para el riego la contaminación puede pasar a las plantas, animales y al ser humano.

De este coronavirus zoonótico sabemos que se transmite a través del aire, gotas de flügge y fómites contaminados por contacto con boca, nariz u ojos de personas

enfermas, y que el contacto persona-persona es clave para infectarse. ¿Pero podría tener relación con la salud del suelo? Podría, si atendemos a la transmisión vía fecal-oral, que no se descarta ya que se ha detectado ARN del virus en heces (Boehm AB. & Wigginton KR., 2020; Díaz LA. & Espino A., 2020; la Rosa G. et al., 2020). Como en su “versión” anterior, este virus podría estar replicándose en el sistema gastrointestinal de los seres vivos.

En este sentido, desconocemos la supervivencia del SARS-CoV-2 en el suelo (Allende Prieto A. et al., 2020) o agua, pero este descubrimiento pone en alerta la necesidad del análisis y el tratamiento de aguas residuales. Es especialmente importante en las zonas del planeta donde no tienen sistemas de alcantarillado o que emplean el agua residual para riego. Además, se ha observado que las altas temperaturas ayudan a la inactivación del virus en una media de 3 días, siempre que sean superiores a 20°C, que se alcanzan fácilmente en las plantas de tratamiento de aguas. De hecho la temperatura es el factor que más influye sobre la supervivencia viral en el agua (la Rosa G. et al., 2020).

Otro de los enlaces entre el SARS-CoV-2 y el suelo es la influencia de su salud, y la del ecosistema, en la protección frente a enfermedades. Un ecosistema degradado rompe la simbiosis natural entre todos los seres vivos que lo habitan y expone más fácilmente la dispersión de patógenos. La pérdida de biodiversidad, especialmente la disminución de la fauna (que es más cercana al hombre genéticamente hablando), elimina esa “línea de defensa” que mantiene la patogénesis controlada. Además, el cambio climático actúa como un acelerador de las enfermedades; aumenta de la temperatura, debido a la acumulación de gases contaminantes, se intensifican las sequías y la desertización, se acrecentan los incendios, se descongela el permafrost<sup>3</sup> ártico y se magnifican las tormentas, dando lugar a más inundaciones. En definitiva, con la desconexión de la responsabilidad que tenemos por nuestras acciones destructivas, exponemos al mundo a más enfermedades. Y esto es lo que ha sucedido con el coronavirus.

Al margen de esto, no debemos olvidar que como consecuencia de la contención de la pandemia se ha aumentado el uso de material de protección: mascarillas, guantes desechables y botellas de gel hidroalcohólico, todos ellos fabricados a base de plástico. Y es el plástico, como sabemos, uno de los contaminantes que más tiempo tarda en desintegrarse en la naturaleza y, en un alto porcentaje, termina por acabar en los océanos. A pesar de que aún no conocemos si el material infectado por SARS-CoV-2 puede pasar al medio ambiente y cuánto tiempo se mantiene activo, algo que sí se conoce es el impacto que el plástico tiene sobre la Tierra (Mukhopadhyay S., 2020).

## **6. Conclusiones**

El suelo es un recurso no renovable, único y con características diferentes en cada parte de la Tierra. Es nuestro sustento, del que obtenemos alimento, agua de mejor calidad, sobre el que construimos nuestros hogares y quién nos protege frente al resurgimiento de enfermedades. La importancia del mantenimiento de su salud se entrelaza con la salud del ecosistema y de los seres vivos.

---

<sup>3</sup> El permafrost es la capa de hielo permanentemente congelada en los niveles superficiales del suelo en las regiones más frías de la Tierra.

La pérdida de salud del suelo deriva de los procesos de degradación ocasionados por su utilización agrícola, industrial, minera y urbana. El uso de los indicadores de salud sirve para medir la eficacia de la aplicación de técnicas contra la degradación, como la biorremediación o la fitorremediación.

La prevención de la degradación del suelo necesita herramientas de evaluación como los indicadores de calidad. Las técnicas que se apoyan en el monitoreo por satélite y teledetección, otorgan gran cantidad de información específica de un suelo.

No existe un único grupo de indicadores que se puedan emplear de forma generalizada, si bien los indicadores físicos, químicos y biológicos proporcionan información necesaria para diagnosticar la salud del suelo.

El mantenimiento de la salud del suelo debe incluir una gestión responsable para proteger la vida que alberga.

## 7. Bibliografía

- Agencia para el Registro de Enfermedades y Sustancias Tóxicas. (2019). *Resúmenes de Salud Pública - DDT, DDE y DDD*. [https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es\\_phs35.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs35.html)
- Agency for Toxic Substances & Disease Registry. (2011a, March). *Arsenic. Toxic Substances Portal*. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=3>
- Agency for Toxic Substances & Disease Registry. (2011b, March). *Cadmium. Toxic Substances Portal*. <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubstance.asp?toxid=15>
- Allende Prieto A., de Andrés Miguel A., Figueras Huerta A., Gimalt Obrador J., Prieto de Castro C., & Sánchez Moragas G. (2020). *Informe sobre transmisión del SARS-CoV-2 en playas y piscinas*.
- Anaya-Gómez ML., & Jaramillo Jaramillo DF. (2017). Determinación de dos índices de la calidad del suelo en la calidad de la taza de café. *Revista de La Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia*, 6(2), 102–123. <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v6n2.65667>
- Asante-Duah K. (2017). *Public Health Risk Assessment for Human Exposure to Chemicals* (Springer, Ed.; 2nd ed.). [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1039-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1039-6_1)
- Astier Calderón M., Maass Moreno M., & Etchevers Barra J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia*, 36(5), 605–620.
- Barral Muñoz A., Prados Velasco MJ., & Hurtado Rodríguez C. (2020). Evolución de la erosión estimada (USLE) y procesos de Naturbanización en el entorno de los Parques Nacionales de Doñana y Sierra Nevada (España). *Cuadernos Geográficos de La Universidad de Granada*, 59(1), 196–223. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i1.8862>
- Bastida F., Zsolnay A., Hernández T., & García C. (2008a). Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147(3), 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>
- Bloem J., Hopkins DW., & Benedetti A. (2005). *Microbiological Methods for Assessing Soil Quality*. CAB International.
- Boehm AB., & Wigginton KR. (2020). Environmental Engineers and Scientists Have Important Roles to Play in Stemming Outbreaks and Pandemics Caused by Enveloped Viruses. *Environmental Science & Technology*, 54(7). <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01476>

- Brevik EC. (2009). Soil health and productivity. In *Soils, Plant Growth and Crop Production. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)* (In W. Verheye, Vol. 1). <http://www.eolss.net>
- Brevik EC., & Burgess L. (2012). Soils and Human Health. In *Soils and Human Health* (pp. 29–56). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13683-4>
- Cañas K., Zambrano M., & Velázquez M. (2020). Sistemas agroforestales: una visión transdisciplinaria en el proceso de deforestación. *Ambientellania*, 1(1), 128–138.
- Cecchi G., Mancini L., Dipartimento di Ambiente e Connessa Prevenzione Primaria, & Istituto Superiore di Sanità di Roma. (2005). Salute degli ecosistemi e salute umana. *Ann Ist Super Sanità*, 41(3), 271–279.
- Cerdá A. (2001). La erosión del suelo y sus tasas en España. *Ecosistemas: Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, 10(3). <https://doi.org/10.7818/re.2014.10-3.00>
- Cerón Rincón LE., Marina L., & Muñoz M. (2005). Soil enzymes: Health and quality indicators. In *Acta Biológica Colombiana* (Vol. 10, Issue 1).
- Cruz AB., Etchevers Barra J., del Castillo RF., & Gutiérrez C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2), 90–97. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=149>
- de Neergaard A. (2009). Soil biology and microbiology. In *Land use, land cover and soil sciences: Vol. VI* (pp. 184–204).
- de Paul Obade V., & Rattan L. (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>
- Díaz LA., & Espino A. (2020). Manifestaciones gastrointestinales de pacientes infectados con el nuevo Coronavirus SARS-CoV-2 Gastrointestinal manifestations in infected patients with the novel Coronavirus SARS-CoV-2. *Gastroenterol*, 31(1), 35–38.
- Dinesh R., Benbi K., & Reichl FX. (2018). *Soil Components and Human Health* (Springer, Ed.).
- Dogart N., Morgan-Brown T., Lyimo E., Mbilinyi B., Meshack CK., Sallu SM., & Spracklen DV. (2020). Agriculture is the main driver of deforestation in Tanzania. *Environmental Research Letters*, 15(3). <https://doi.org/10.1088/1748-9326>
- Doran JW., Coleman DC., Bezdicek DF., & Stewart BA. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (Vol. 35). Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35>
- East National Technology Support Center, National Soil Survey Center, N. L. for A. and the E. D. of N. R. and E. S., & University of Illinois at Urbana-Champaign. (2011, September 19). *Soil Quality for Environmental Health*. <http://soilquality.org/functions>
- European Commission for Environment. (2019, August 7). *Soil sealing*. [https://ec.europa.eu/environment/soil/sealing\\_guidelines.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/sealing_guidelines.htm)
- FAO. (2020). *Nueva enfermedad por coronavirus (COVID-19)*. <http://www.fao.org/2019-ncov/q-and-a/es/>
- FAO. (1996). La influencia humana. In *Ecología y enseñanza rural*. <http://www.fao.org/3/w1309s/w1309s00.htm#TopOfPage>
- FAO. (2016). *Sellado del suelo*.
- Ferreras L., Magra G., Besson P., Kovalevski E., & García F. (2007). Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. In *ARGENTINA* (Vol. 25, Issue 2).
- Freitas H. (2009). Land-Use, Land-Cover Changes and Biodiversity Loss. In *Land use, land cover and soil science: Vol. I* (pp. 184–191).
- Gabriels D., & Cornelis WM. (2009). Human-induced land degradation. In *Land Use, Land Cover and Soil Sciences: Vol. III* (pp. 131–144).

- Garbisu C., Becerril JM., Epelde L., & Alkorta I. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16(2), 44–49. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=485>
- García Y., Ramírez W., & Sánchez S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2), 125–138.
- González Huecas C. (2017). *Análisis Medio Ambiental*. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia, Química en Ciencias Farmacéuticas.
- Henríquez Hernández LA., Romero D., González Antuña A., Gonzalez Alzaga B., Zumbado M., Boada LD., Hernández AF., López Flores I., Luzardo OP., & Lacasaña M. (2020). Biomonitoring of 45 inorganic elements measured in plasma from Spanish subjects: A cross-sectional study in Andalusian population. *Science of the Total Environment*, 706, 135750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135750>
- International Agency for Research on Cancer, & World Health Organization. (2015). *IARC Monographs evaluate DDT, lindane, and 2,4-D*. <http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/Monographs-Q&A.pdf>
- Jeffery S., & van der Putten WH. (n.d.). *Soil Borne Human Diseases*. <https://doi.org/10.2788/37199>
- Karlen DL., Ditzler CA., & Andrews SS. (2003). Soil quality: Why and how? *Geoderma*, 114(3–4), 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)
- Karlen DL, Veum KS., Sudduth KA., Obrycki JF., & Nunes MR. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, 195, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>
- la Rosa G., Bonadonna L., Lucentini L., Kenmoe S., & Suffredini E. (2020). Coronavirus in water environments: Occurrence, persistence and concentration methods - A scoping review. *Water Research*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115899>
- López Lafuente A. (2017). *Edafología Aplicada*. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Farmacia, Química en Ciencias Farmacéuticas.
- Mateu Tortosa E. (2013). Agricultura y propaganda: el nitrato de Chile en España. *Historia Agraria*, 59, 95–123.
- McBratney AB., Mendonça Santos ML., & Minasny B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1–2), 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Mukhopadhyay S. (2020, March 20). *COVID-19: Unmasking the Environmental Impact*. Earth.Org. <https://earth.org/covid-19-unmasking-the-environmental-impact/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015a). *Año Internacional de los Suelos, infografía*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015b). *Funciones del suelo. Año Internacional del Suelo*.
- Panagos P., Ballabio C., Poesen J., Lugato E., Scarpa S., Montanarella L., & Borrelli P. (2020). A soil erosion indicator for supporting agricultural, environmental and climate policies in the European union. *Remote Sensing*, 12(9), 1365. <https://doi.org/10.3390/RS12091365>
- Puglisi E., del Re AAM., Rao MA., & Gianfreda L. (2006). Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1673–1681. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.11.021>
- Rayo Estrada-Herrera I., Hidalgo Moreno C., Guzmán Plazola R., Almaraz Suárez JJ., Navarro Garza H., & Etchevers Barra JD. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 787–798.
- BOE número 15 del 14 de enero de 2005. Retrieved May 19, 2020, from <https://www.boe.es/buscar/pdf/2005/BOE-A-2005-895-consolidado.pdf>
- Real Academia Española. (n.d.). *Diccionario de la lengua española | Indicar, definición*. Retrieved May 21, 2020, from <https://dle.rae.es/indicar>

- Reyes YC., Vergara I., Torres OE., Díaz M., & González EE. (2016). Heavy metals contamination: implications for health and food safety. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77.
- Reynolds JF., Mark D., Smith S., Lambin EF., Li BLT., Mortimore M., Batterbury SPJ., Downing TE., Dowlatabadi H., Fernández RJ., Herrick JE., Huber Sannwald E., Jiang H., Leemans R., Lynam T., Maestre FT., Ayarza M., & Walker B. (2007). Global Desertification: Building a Science for Dryland Development. *SCIENCE*, 316. [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)
- Saunders SE., Bartz JC., & Bartelt-Hunt SL. (2009). Prion protein adsorption to soil in a competitive matrix is slow and reduced. *Environmental Science and Technology*, 43(20), 7728–7733. <https://doi.org/10.1021/es901385t>
- Science Communication Unit, & University of the West of England. (2013). *Science for Environment Policy In-depth Report: Soil Contamination: Impacts on Human Health* (Vol. 5). <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>
- Segueda Navarrete A., Vela Correa G., López Blanco J., & Rodríguez Gamiño ML. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *ContactoS*, 80, 29–37.
- Sexton SS., Lei Z., & Zilberman D. (2007). The economics of pesticides and pest control. In *International Review of Environmental and Resource Economics* (Vol. 1, Issue 3, pp. 271–326). <https://doi.org/10.1561/101.00000007>
- Solleiro Rebollo E. (2015). *El suelo tarda cientos o miles de años en formarse y se destruye en una generación humana*. Boletín Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015\\_751.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_751.html)
- Tóth G., Hermann T., da Silva MR., & Montanarella L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- Unión Europea. (2013). *Los costes ocultos del sellado del suelo*. <https://doi.org/10.2779/16773>
- Universidad Complutense de Madrid. (2016, April 20). *Mapa de usos del suelo de la Comunidad de Madrid*.
- Vasu D., Singh SK., Ray SK, Duraisami VP., Tiwary P., Chandran P., Nimkar AM., & Anantwar SG. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>
- Verheye W. (2010). Soils and general agronomy. In *Soils, Plant Growth and Crop Production: Vol. I* (pp. 1–40).
- Visioli G., & Marmiroli N. (2013). The proteomics of heavy metal hyperaccumulation by plants. In *Journal of Proteomics* (Vol. 79, pp. 133–145). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2012.12.006>
- Zhang K., Shi Y., Cui X., Yue P., Li K., Liu X., Tripathi BM., & Chu H. (2019). Salinity Is a Key Determinant for Soil Microbial Communities in a Desert Ecosystem. *American Society for Microbiology*, 4(1). <https://doi.org/10.1128/msystems.00225-18>