

# VIDA CIENTÍFICA

En este número, dentro del apartado de *Colaboraciones*, contamos con el segundo trabajo de la Serie dedicada a los «Problemas del Medio Ambiente». En esta ocasión, el profesor Zapardiel nos expone los diferentes tipos de contaminación de los suelos y su impacto medioambiental. Así mismo, podemos encontrar referencias a la legislación española y europea de protección de los suelos, así como a los programas internacionales para el uso racional de los recursos. El desarrollo sostenible debe ser el reto solidario de los países ricos en beneficio de toda la Humanidad.

En el área de Física, contamos con una descripción de la «Paradoja de Parrondo» por su propio autor, que tiene interés en campos tan diversos como la dinámica de poblaciones, la probabilidad de supervivencia en especies biológicas o en Economía.

El profesor Costa nos presenta «La Conjetura de Poincaré», uno de los retos matemáticos desde que fue establecida por Poincaré en 1904. Su influencia en la Geometría y en la Topología ha permitido el desarrollo de nuevos métodos tanto dentro como fuera de estos campos científicos.

Y, por último, la profesora García-Fernández describe la capacidad de algunas especies químicas para existir en más de una forma cristalina, fenómeno conocido como polimorfismo. Como ejemplos para explicar esta propiedad acude a sustancias tan dispares como el diamante, el hielo, algunos fármacos y el delicioso chocolate que a todos nos deleita.

Nuestras secciones habituales, *Novedades científicas*, *Semblanzas de los Premios Nobel* y *Efemérides*, tienen cada vez más colaboradores, lo que esperamos que aporte mayor información a nuestros lectores.

Finalizamos con el apartado dedicado a *Las mujeres y la Ciencia*, y en esta ocasión los profesores del Departamento de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas han hecho un pequeño homenaje a la figura de Marie Anne Pierrette Paulze, conocida como Mme. Lavoisier de Rumford. Esta mujer, de la que ya hemos hablado en otros números de la revista, fue además de una gran científica, una magnífica dibujante. La lectura de este trabajo así lo pone de manifiesto.

## COLABORACIONES

### Ciencias de la Naturaleza

#### Serie: Problemas del Medio Ambiente Parte II: Contaminación e impacto ambiental de suelos

##### INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso valioso sometido a una presión de demanda creciente por el aumento demográfico, por la demanda de alimentos y por su proyección sobre la salud de la población. El suelo soporta la mayoría de la actividad humana y buena parte de la actividad de la biosfera. El Consejo de Europa promulgó en 1972 la Carta Europea de Suelos en la que se reconoce que el suelo es un bien muy valioso para la humanidad, es un recurso limitado fácilmente destruible y que debe ser protegido contra la erosión y frente a la contaminación. Diez años más tarde, se formulan por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Carta Mundial de Suelos, y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el Documento sobre Política Mundial, tra-

tando de fomentar la cooperación internacional para el uso racional de los recursos edáficos.

Entre las cinco estrategias prioritarias propuestas en el VI Programa de Acción Medioambiental de la Comunidad Europea, siempre con un enfoque hacia la salud, hay una dedicada al suelo, para prevenir la erosión, el deterioro, la contaminación y la desertización.

Al escribir estos párrafos, se celebra en Madrid la octava Conferencia de la ONU contra la desertización, reúne a los 191 países firmantes de la Convención para la Lucha contra la Desertización (UNCED), adoptada en París en junio de 1994. El problema de la desertización afecta directa o indirectamente a un tercio de la población del planeta (2500 millones) que habita en el 41,3% de la superficie terrestre afectada por la desertización.

Las variadas características físicas, químicas y biológicas de los suelos son las que determinan sus usos; por ello, hasta para su definición, coexisten diversos criterios en los que concurren intereses económicos y sociales contrapuestos.

Así, al suelo se le considera un sistema abierto, complejo, autoorganizativo, estructural y polifuncional; se comporta como un filtro a través del cual se producen y regulan los flujos de energía y materia y es susceptible de contaminarse por los aportes humanos, pudiendo degradarse y no cumplir adecuadamente sus funciones.

Basado en la Comunicación de la Estrategia Temática para la Protección del Suelo de la Comisión Europea, el Real Decreto 9/2005 de 14 de enero (BOE núm. 15, de 18 de enero de 2005) entiende por suelo la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, el aire y el agua, lo que le confiere capacidad de desempeñar tanto funciones naturales como de uso. Esta definición no se limita al denominado suelo edáfico, sino que también incluye el material que se encuentra en la subsuperficie a través de la cual los contaminantes pueden llegar hasta las aguas subterráneas. Desde un punto de vista técnico, no puede hablarse del estudio de la contaminación de un suelo sin considerar la contaminación de las aguas, en particular de las subterráneas, pero desde el punto de vista jurídico, la protección y posible afección a las aguas continentales viene regulado por el Real Decreto 1/2001 de 20 de julio (texto refundido de la Ley de Aguas y Directiva Marco del Agua) y la Directiva para la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (2006/118/CE, de 12 de diciembre, DOCE n.º 372.27.2006). Ambas normativas se complementan.

Los suelos permanentemente cubiertos por una lámina de agua superficial quedan excluidos del objeto del Real Decreto 9/2005, aunque una vez drenados o excavados puedan estar sometidos a la Ley de Residuos y, en consecuencia, gestionados como tal.

Además, este Real Decreto aporta la lista de 104 actividades potencialmente contaminantes y refiere criterios y estándares para la declaración de un suelo contaminado y forma y plazos para llevar a cabo las labores de limpieza y recuperación.

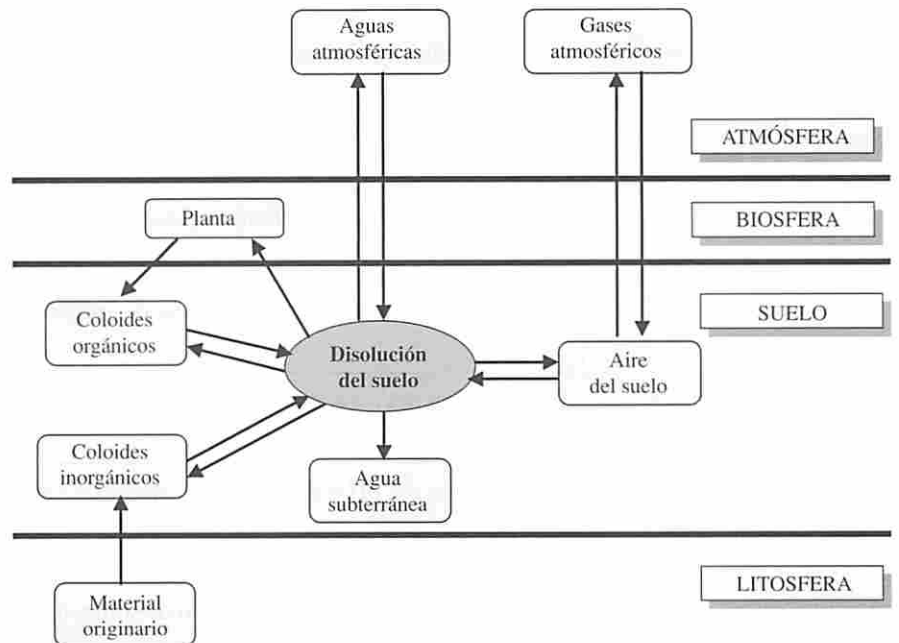
En principio y al margen del Real Decreto, pueden establecerse tres tipos de suelos o de terrenos: a) *El suelo pasivo* (no interviene de forma activa en un proceso productivo y sirve de soporte a diversas actividades, como: urbanismo, infraestructura, áreas protegidas, etc.), b) *el productivo o agrario*, y c) *el improductivo* (es

un recurso potencial que puede llegar a utilizarse si se remedian sus carencias). El suelo productivo tiene un espesor de 30-40 cm, se forma a un ritmo de 1 cm de espesor cada 100 a 400 años. Los tres pueden ser considerados recursos no renovables en un horizonte temporal por la extensión de su uso y destrucción.

El suelo, formado a través de un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos sobre el medio rocoso original, mediante fenómenos de meteorización (mecánica, química), constituye el soporte material para el desarrollo de organismos vivos. Del suelo se ha dicho que es un sistema abierto porque pierde y recibe materiales y energía de su entorno y está subdividido en subsistemas independientes de diferente complejidad. Posee la capacidad de regular los aportes y salidas de materia y energía, de reaccionar ante cambios externos, dentro de unos intervalos relativamente estrechos sin riesgo de degradación, y además, es muy sensible a las acciones contaminantes.

Hoy en día la funcionalidad del suelo es diversa, no sólo sirve para producir biomasa vegetal, que además de soporte físico aporta nutrientes y agua, comportándose como un reactor bioquímico que autosumministra una parte de los reactantes, también realiza otras funciones básicas de carácter económico, ambiental, social y cultural.

El suelo es un medio receptivo, interacciona químicamente con la litosfera, la hidrosfera y la atmósfera y, fundamentalmente, recibe el impacto directo o indirecto de los seres vivos que pueden romper el equilibrio químico establecido en su seno. A pesar de ello, el medio edáfico posee una capacidad de autodepuración, principalmente en sus horizontes más superficiales que le permite asimilar una cierta cantidad de contaminantes. La capacidad de autodepuración del suelo se basa en su: a) *actividad biológica*, que hace posible la descomposición parcial o total de la materia orgánica. Los procesos bioquímicos llevados a cabo por los numerosos microorga-



Interrelaciones de la disolución del suelo con el medio

nismos que el suelo posee son cuantitativamente los más importantes en la degradación de los contaminantes orgánicos. Se estima que un suelo poco contaminado posee una población del orden de  $10^7$  a  $10^9$  de bacterias, hongos, etc., que actúan mayoritariamente como catalizadores en las reacciones de oxidación-reducción; *b) actividad química*, que desencadena un conjunto de reacciones químicas de oxidación-reducción, hidrólisis, precipitación, etc.; y *c) capacidad de filtración* que retiene contaminantes por procesos de adsorción e intercambio iónico.

La posibilidad que tiene el suelo de almacenar sustancias químicas, cationes e incluso contaminantes, está vinculada a su capacidad de intercambio iónico (fundamental en los mecanismos de nutrición vegetal), a la de adsorción-desorción, a la de complejación y a la de precipitación de sales inorgánicas, propiedades todas ellas derivadas del complejo arcilloso-húmico; asociación que se realiza a través de un puente catiónico (con frecuencia participa el  $\text{Ca}^{2+}$ ) y su estabilidad es tanto mayor cuanto más ácido sea el catión. Esto explica que el  $\text{Na}^+$  destruya el complejo arcillo-húmico y disminuya la capacidad de cambio.

## ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Existe una contaminación de origen natural y otra de origen antrópico o inducido. Los primeros agresores, y quienes más modificaciones le han producido, han sido los agentes naturales como son la sequía, el agua, el viento, las tormentas, los volcanes, los seísmos, etc. Ha sido la Naturaleza, el clima, quien con más intensidad que el hombre ha destruido o modificado el suelo; el problema de la contaminación ha sobrevenido después.

La consecuencia inmediata de la acción de los agentes naturales sobre el suelo es su erosión y desertificación, que es la disgregación, segregación y arrastre de la superficie del suelo, con pérdidas físicas de los elementos indispensables para el crecimiento de los cultivos. La Tabla 1 presenta brevemente los distintos procesos de degradación y sus indicadores.

Puede considerarse que la contaminación del suelo es un proceso o conjunto de procesos que disminuyen su capacidad actual y potencial de producir bienes. Un suelo contaminado no tiene un buen comportamiento como componente ambiental. En general, el término contaminación indica la existencia en el sistema suelo de un agente o agentes químicos externos (o nivel inusual de uno propio) en una concentración tal que genera un efecto fisiológico desfavorable en los organismos, o es susceptible de transmitirse a otros sistemas.

Cuando un contaminante llega o irrumpe en el suelo puede ser neutralizado, degradado, adsorbido, complejoado o precipitado. Su abandono o salida del suelo puede realizarse por volatilización, extracción en las cosechas, drenaje o erosión. Obviamente la vía por la que circula el contaminante depende de la naturaleza de los constituyentes activos, distribución y tipos de poros, composición de las fases fluidas, etc., junto a parámetros tales como: pH, potencial redox (Eh), temperatura, etc.

Para evaluar y predecir cuál es el comportamiento del suelo frente a diversos tipos de contaminación es preciso saber las interacciones de los contaminantes (metales pesados, pesticidas, fertilizantes, etc.) con los componentes edáficos, orgánicos o inorgánicos. En este sentido pueden intervenir reacciones afectadas por procesos: ácido-base, complejación con ligandos orgánicos e inorgánicos, precipitación-disolución, oxidación-reducción, adsorción y cambio iónico.

Tabla 1. *Procesos de degradación e indicadores.*

Procesos de degradación	Indicadores de degradación de suelos
Erosión	Profundidad del suelo, carbono orgánico, capacidad de almacenamiento de agua, textura y nutrientes
Compactación	Porosidad, resistencia mecánica, tasa de infiltración, conductividad hidráulica, textura y nutrientes
Degradación química	Disminución del contenido de nutrientes y de la capacidad de cambio catiónico. Incremento en la concentración de contaminantes
Acidificación	Disminución del pH y del grado de saturación en bases
Salinización	Incremento en sales solubles y en la conductividad eléctrica
Alcalinización	Aumento en la razón de la adsorción de sodio, disminución de la infiltración y cambios de color
Degradación biológica	Reducción en el contenido de la materia orgánica y de biodiversidad

Como se ha indicado puede existir: *a) una contaminación natural*, normalmente endógena, por ejemplo, los aportes de cenizas, metales pesados, sulfato y acidez de un volcán activo, los aportes de elementos metálicos de rocas, aparición de una forma tóxica en alta concentración, por evoluciones edáficas en determinadas condiciones e influencias ambientales, etc., y *b) una contaminación antrópica*, siempre exógena. Sin embargo, la contaminación se considera fundamentalmente debida a actuaciones antrópicas que producen un cambio negativo de las propiedades del suelo.

La contaminación tiene un origen muy diverso: las prácticas agrícolas, la explotación minera y el procesado, los procesos industriales, la contaminación por automoción, y otros.

**Contaminación natural**

La primera causa de contaminación natural es la propia alteración mineral que da origen al suelo. Hay rocas cuyo contenido en determinados elementos es especialmente alto y los suelos que sobre ellas se desarrollan reciben esa elevada concentración. La alteración de minerales por lluvias puede provocar concentraciones altas de elementos residuales habituales (como aluminio, hierro, manganeso...).

La actividad volcánica (en la actualidad hay más de 600 volcanes activos) produce aportes de diversos compuestos oxidados de azufre que generan una fuerte acidez en el suelo y puede producir la solubilidad de algún elemento preexistente.

Existen otras numerosas causas como el viento que puede aportar partículas sólidas o, en zonas costeras, diminutas gotas de agua (aerosoles) que pueden alterar la composición de los suelos.

**Contaminación antrópica**

La contaminación antrópica proporciona: *a) contaminantes sólidos* (residuos) que se acumulan en espacios relativamente reducidos y con persistencia en el tiempo; *b) contaminantes líquidos* de efectos más extendidos (pueden incorporarse a las aguas superficiales); y *c) contaminantes de emisiones gaseosas* (mezcla partículas-gases) cuyos efectos son distribuidos por el viento.

Las *actividades mineras* provocan contaminación en las zonas cercanas en las que se depositan los residuos. Se afecta a una gran superficie por el efecto de la dispersión del polvo generado por el aire, pudiendo alcanzar a las aguas subterráneas en función

de las condiciones climáticas y la permeabilidad de los suelos.

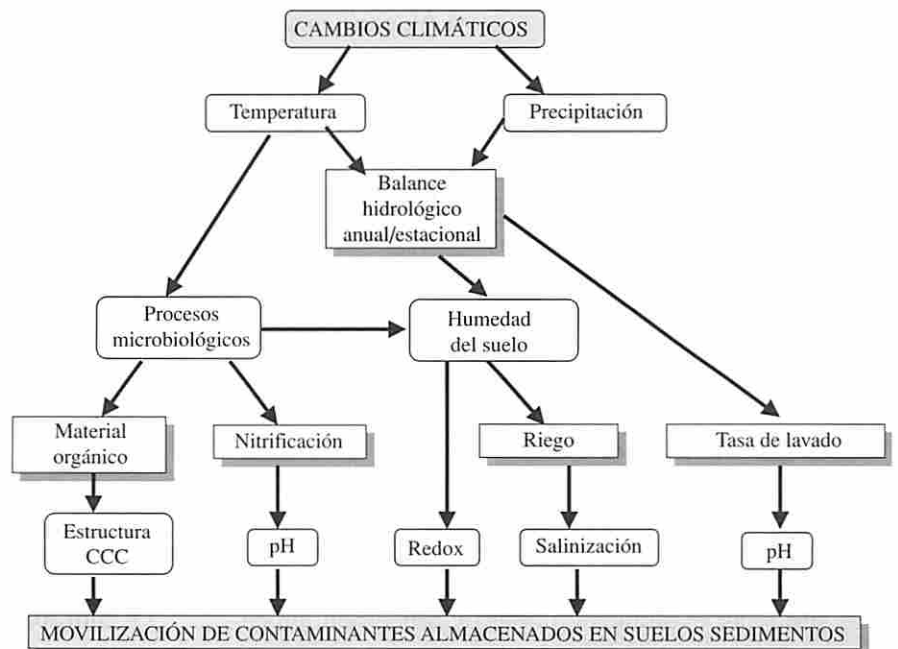
La *agricultura* es una actividad muy contaminante para el suelo ya que afecta a grandes superficies del mismo y es la actividad principal que se desarrolla sobre él. La contaminación del suelo se efectúa tanto en el manejo como en el uso de fertilizantes y fitosanitarios.

Existen *otras actividades* contaminantes importantes, como son la generación de residuos por las áreas urbanas e industriales, los gases y residuos que desprenden los automóviles y aviones, los metales y otros compuestos producidos por ejemplo por la caza, etc.

En los estudios de contaminación, además de detectar la presencia de contaminantes, hay que definir los máximos niveles admisibles y analizar los posibles factores que pueden influir en la respuesta del suelo a los agentes contaminantes y que pueden modificar los denominados «umbrales generales de la toxicidad». Debe efectuarse la estimación de los impactos potenciales y la planificación de las actividades permitidas y prohibidas en cada tipo de medio.

En el análisis de la contaminación del suelo se ha de tener en cuenta, en principio, dos aspectos importantes:

- a) La *vulnerabilidad*, que representa el grado de sensibilidad del suelo frente a la agresión de los agentes contaminantes. El grado de vulnerabilidad depende de la intensidad de afectación, del tiempo y de la velocidad con que se producen los cambios en las propiedades de los suelos. Está relacionado con la capacidad de amortiguación, a mayor capacidad de amortiguación, menor vulnerabilidad del suelo. Esta propiedad permite diferenciar los riesgos potenciales de diferentes actividades o predecir las consecuencias de la contaminación en las condiciones actuales.



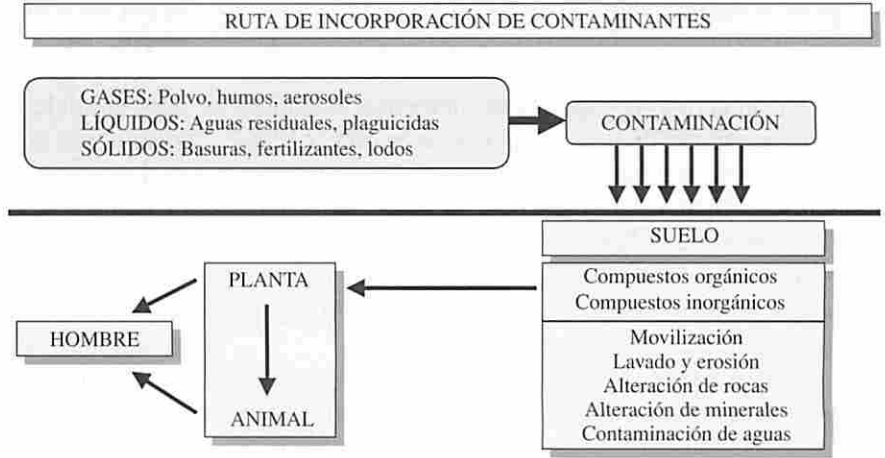
b) La *carga crítica*, que representa la cantidad máxima de un determinado componente que puede ser aportado a un suelo sin que se produzcan efectos nocivos.

Otros factores importantes que influyen en el efecto de la contaminación, bien por las características del suelo o de los propios contaminantes, son:

- a) *El poder de amortiguación*, referido al conjunto de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que lo hacen capaz de realizar funciones de filtración, descomposición, neutralización, inactivación, almacenamiento, etc.
- b) *La biodisponibilidad*, es la asimilación del contaminante por los organismos y, en consecuencia, la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo.
- c) *La movilidad*, es la que regula la distribución del contaminante y, por lo tanto, su posible transporte a otros sistemas.
- d) *La persistencia*, regula el periodo de actividad de la sustancia y, por lo tanto, es otra medida de su peligrosidad.

**AGENTES CONTAMINANTES, PROCEDENCIA Y EFECTOS**

Los agentes contaminantes son muy numerosos y la procedencia de los mismos es muy diversa (quema de



combustibles fósiles, emisiones ácidas atmosféricas, utilización de agua de riego salina, utilización de fitosanitarios, explotaciones mineras, fundición y refino, residuos domésticos e industriales, etc.). En la siguiente figura se esquematizan las rutas de la contaminación.

La contaminación del suelo es un proceso influido por una serie de agentes contaminantes, cada uno se comporta de forma diferente y ejerce un efecto distinto, tanto por su naturaleza como por la del agente receptor; pudiéndose agrupar por su efecto o por su origen.

La tabla siguiente muestra los principales contaminantes presentes en el suelo en función del tipo de industrias que los generan.

Tabla 2. Tipos de industria y contaminantes.

Tipo de industria	Principales contaminantes del suelo
Estaciones de servicio	Hidrocarburos y derivados del petróleo
Fábricas de gas	Alquitrán, benceno, fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, cianuros
Industria textil	Hidrocarburos y metales pesados
Industrias químicas	Gran diversidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos
Maquinaria	Disolventes clorados
Metalurgia/Galvánica	Hidrocarburos aromáticos, metales pesados y cianuros
Petróleo y aceite	Hidrocarburos aromáticos y alifáticos
Pinturas, barnices, colas y pegamentos	Disolventes y metales pesados

**TIPOS DE CONTAMINACIÓN**

Una de las posibles clasificaciones de la procedencia de contaminantes y, por lo tanto, de los tipos de contaminación, puede ser la siguiente: fuentes naturales, prácticas agrícolas, explotación minera y procesado, procesos industriales, automoción y otros.

Las fuentes de contaminación pueden originar: contaminación atmosférica, residuos de la construcción y domésticos, residuos de fertilizantes y fitosanitarios, metales pesados, compuestos orgánicos: hidrocarburos, dioxinas, furanos, ..., y radionucleidos.

La **contaminación atmosférica** está íntimamente vinculada a todas las actividades del hombre y su reducción

repercutirá en la conservación del suelo y en la salud de la biosfera.

La lluvia ácida, de la que son responsables las emisiones atmosféricas, se relaciona con las actividades industriales, principalmente con las emisiones de las centrales térmicas y con las producidas por la combustión de hidrocarburos que llevan S, N, Cl, etc. También, en este fenómeno influye el consumo de combustibles fósiles de los vehículos terrestres y aéreos, así como los procesos de desnitrificación de fertilizantes añadidos a los suelos en dosis excesiva y los procesos naturales (volcanes). Como consecuencia de esta contaminación disminuye el pH del suelo.

Los **residuos de la construcción y domésticos** proporcionan diversos tipos de agentes contaminantes. No todos son activos sino que existen otros pasivos cuyo papel principal es provocar una dilución de los elementos que proporcionan la fertilidad del suelo. Éste es el caso de las sustancias inertes.

Los **fertilizantes**, además de contener metales pesados, producen contaminación fundamentalmente por fosfatos y nitratos.

Los **fitosanitarios y los plaguicidas** son, generalmente, productos químicos de síntesis y sus efectos dependen tanto de las características de las moléculas orgánicas como de las características del suelo. Prácticamente todos los fitosanitarios se acumulan (adsorben) en el suelo, aunque puedan tener una cierta movilidad y pueden desplazarse reversiblemente entre el agua y el suelo.

Los **contaminantes orgánicos** incluyen, además de una gran variedad de plaguicidas, productos de degradación fotoquímicos, derivados alifáticos y aromáticos del petróleo y plásticos, solventes orgánicos, surfactantes y detergentes, etc.

En general, los compuestos orgánicos pueden clasificarse en dos grupos, dependiendo de sus interacciones con los componentes del suelo: (1) polares, hidrofílicos, iónicos o ionizables, que disueltos dan reacción básica o ácida; y (2) no polares, hidrofóbicos, no iónicos.

Los **compuestos orgánicos volátiles (VOC<sub>s</sub>)** son los contaminantes más móviles y comunes en zonas de máxima contaminación potencial (por ejemplo, en basureros). Pueden ser tóxicos, mutagénicos o carcinogénicos. Se presentan de diversas formas (gas, solución acuosa, adsorbido, etc.). Muchos son relativamente no polares, contaminantes no iónicos orgánicos que se distribuyen en la materia orgánica del suelo debido a la naturaleza hidrofóbica de los mismos.

Los suelos contaminados por VOC<sub>s</sub> son potenciales reservorios, a largo plazo, de contaminación de niveles freáticos. Los no polares son adsorbidos por la materia orgánica en suelos húmedos o secos. Cuando la proporción de materia orgánica es baja, la carga superficial de especies minerales individuales afecta su adsorción. El agua del suelo retiene VOC<sub>s</sub> en determinadas proporciones. Las superficies de los minerales pueden servir para

catalizar y provocar la degradación de los VOC<sub>s</sub>, con reacciones de hidrólisis, oxidación-reducción, polimerización, etc.

También, a través de las partículas, se depositan los compuestos orgánicos persistentes, como los policlorobifenilos (PCB) y las dioxinas y furanos, procedentes de diversos productos y procesos industriales (pinturas, plásticos, etc.) y de las emisiones gaseosas de la incineración de residuos.

La contaminación por **metales pesados** sólo se produce cuando el contenido de éstos excede los valores habituales en el tipo de suelo, por lo tanto, antes de establecer la existencia de contaminación antrópica del suelo, debe considerarse el nivel geoquímico respecto de los elementos considerados. En la corteza terrestre los metales pesados están en proporción inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%.

En el proceso natural de transformación de las rocas para originar los suelos suelen concentrarse los metales pesados, en general, no rebasan los umbrales de toxicidad y, además, están presentes en las rocas en formas muy poco asimilables para los organismos.

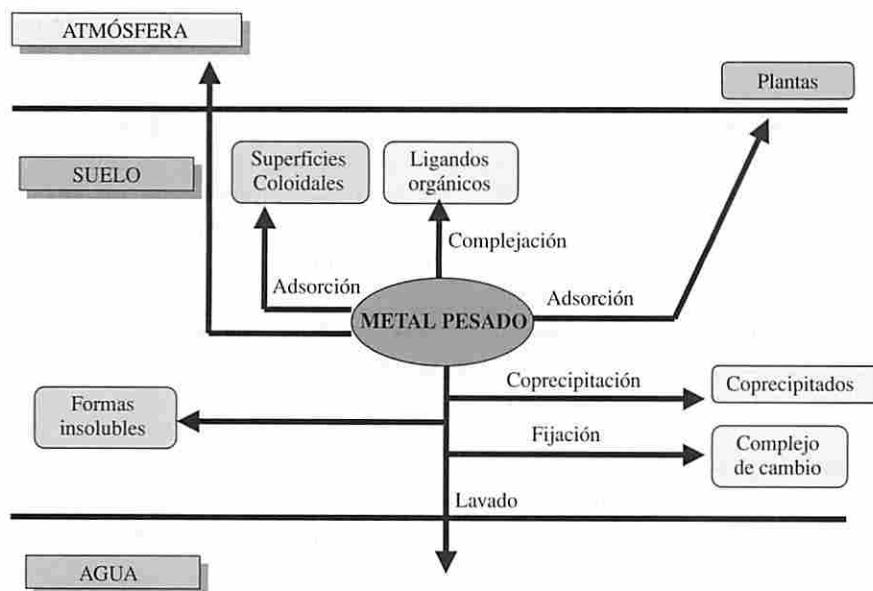
Por lo tanto, dentro de los metales pesados hay dos grupos:

1. *Oligoelementos o micronutrientes*: son los requeridos en cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasado cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están: As, B, Cr, Co, Cu, Ni, Mo, Mn, Se y Zn.
2. *Metales pesados sin función biológica conocida*, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos resulta altamente tóxica y se acumulan en los organismos vivos. Son, principalmente: Hg, Cd, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

De la diversidad de contenido de metales en las rocas se deriva que exista una gran variación en el contenido de los metales en los suelos. Los orígenes antropogénicos de metales son muy diversos, aunque los más importantes están recogidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Fuentes de los contenidos de los metales y sus contribuciones

Fuente	Contribución
Cenizas de combustión	74%
Desechos urbanos	9%
Turba	6%
Residuos de metalurgia	6%
Residuos materia orgánica	3%
Fertilizantes	2%
Otros (residuos alimenticios, agrícolas, de industria maderera, etc.)	< 1%



Los metales pesados presentes en los materiales de partida de los suelos son liberados durante la alteración, pueden seguir diversas vías, ingreso en las cadenas tróficas mediante absorción en las plantas o a través de las aguas freáticas, volatilización (caso de As y Hg), fijación del complejo de cambio, etc. La siguiente figura muestra un esquema de las vías que puede seguir un metal pesado. El destino final del metal pesado depende de la naturaleza de los factores edáficos, tales como: pH, Eh, coloides del suelo, así como, del clima, la erosión y las prácticas de uso. La Tabla 4 informa de las formas de retención en el suelo de los metales y su disponibilidad relativa.

Tabla 4. Formas de retención de metales en el suelo y disponibilidad relativa.

Forma de retención en el suelo	Disponibilidad relativa
Iones en solución del suelo	Fácilmente disponible
Ión en complejo de cambio	Relativamente disponibles pues estos metales, por su pequeño tamaño y altas cargas, quedan fuertemente adsorbidos
Metales quelados por compuestos orgánicos	Menos disponibles
Metal precipitado o coprecipitado	Disponible sólo si ocurre alguna alteración química
Metal incorporado a la matriz biológica	Disponible después de la descomposición
Metal en la estructura mineral	Disponible después de la meteorización

### INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA

Entre los recursos no renovables que el hombre ha utilizado y utiliza están los minerales que se obtienen, lógicamente, en las explotaciones mineras.

La **actividad minera** representa un impacto socio-económico y ambiental importante en la zona donde se lleva a cabo. Las actividades mineras causan intensas modificaciones en los suelos que conllevan frecuentemente a su total destrucción, dejando los materiales con unas limitaciones tan severas que generalmente se han de tomar medidas correctoras para recuperar, por lo menos en parte, la capacidad productiva.

Los impactos producidos por las explotaciones mineras han sido clasificados por algunos autores en: atmosféricos, paisajísticos, hidrológicos, edáficos, faunísticos y florísticos.

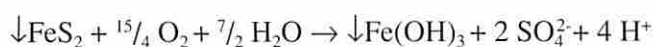
Los impactos sobre los suelos o edáficos modificados profundamente por la explotación, tienen las características siguientes: a) clase textural desequilibrada,

b) ausencia o baja presencia de estructura edáfica, c) propiedades químicas muy anómalas (ha sufrido una oxidación intensa y abundante liberación de protones), d) escasez o desequilibrio en el contenido de los nutrientes fundamentales, e) ruptura de los ciclos biogeoquímicos, f) baja profundidad efectiva, g) dificultad de enraizamiento, h) baja capacidad de cambio, i) Baja retención de agua, y j) presencia de compuestos tóxicos.

Las actividades mineras tiene efectos ambientales importantes en sus cercanías, el procesamiento del mineral produce aguas de lavado que deben almacenarse en condiciones que no afecten el drenaje local y no haya escapes o filtración de sustancias perjudiciales.

En las escombreras se depositan fragmentos gruesos, con mineralizaciones marginales, pero con la suficiente cantidad para provocar un aumento considerable del fondo geoquímico de los suelos en metales pesados si se trata de mineralizaciones metálicas y sobre todo de sulfuros.

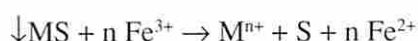
Las aguas ácidas de drenaje generadas por la minería se originan al estar en escombreras los sulfuros expuestos (minerales sulfurados, principalmente piritita) a una oxidación simultánea del sistema agua-aire ( $O_2$ ) y las bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*). En la piritita se produce la oxidación del  $FeS_2$ , la liberación de protones dando una disminución del pH y el aumento de los sulfatos de hierro y de otros metales en disolución (Cu - Pb - Zn - As - Co - Hg - Ni - Mo - Sb), produciéndose soluciones que llevan elementos tóxicos al ambiente, decoloración local de suelos y drenajes con precipitación de los óxidos de hierro, produciendo una extensa contaminación de los ríos y las tierras de cultivo.



En esta reacción se liberan 16 moles de protones por mol de piritita, alcanzándose un pH de 1,5 - 2. El  $Fe^{3+}$  depende de la velocidad de oxidación del  $Fe^{2+}$ , que es controlada por *Thiobacillus ferrooxidans* (éste cataliza la reacción e incrementa su velocidad en 5 ó 6 órdenes de magnitud).

Además, se produce la lixiviación de otros metales, si además de sulfuros de hierro hay otros sulfuros metálicos en la paragénesis, como  $PbS$ ,  $FeS$ ,  $CuS$ ,  $ZnS$ , etc.

En ausencia de  $Fe^{3+}$ , a pH 2,5 - 3, el ácido sulfúrico puede disolver algunos carbonatos metálicos, pero tiene muy poco poder de disolución sobre los sulfuros metálicos. Sin embargo, el ión  $Fe^{3+}$ , es capaz de oxidar estos últimos:



Esta reacción es la que proporciona cantidades significativas en disolución de metales pesados.

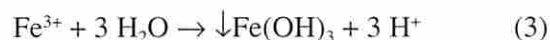
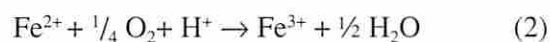
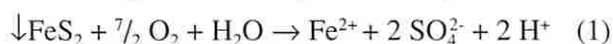
El cadmio, el mercurio, el antimonio y el arsénico son comunes y altamente tóxicos, aún en pequeñas cantidades, especialmente en formas solubles, ya que pueden ser absorbidas por los organismos vivos.

## DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS

Cuando ha ocurrido la contaminación del suelo se debe proceder a la recuperación del mismo, seleccionando la técnica o técnicas más adecuadas.

El primer problema a resolver junto con la selección de la técnica de recuperación es el lugar de realización. Las técnicas se pueden clasificar atendiendo al lugar en el que se lleva a cabo la aplicación, en: *a) técnicas «in situ»*, son aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado en el mismo lugar en el que se encuentra y sin que sea necesaria la excavación del terreno; *b) técnicas «ex situ»*, la realización de este tipo de tecnologías requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su trata-

De forma esquemática los procesos implicados, son:



La reacción (1) aporta el catión de hierro (II) disuelto y genera ácido sulfúrico como producto intermedio. El pH decrece rápidamente a valores cercanos a 3. Si el medio es suficientemente oxidante (2) el  $Fe^{2+}$  se oxida a  $Fe^{3+}$  y éste puede hidrolizarse formando el hidróxido correspondiente,  $Fe(OH)_3$ , precipitando, disminuyendo el hierro soluble y aportando protones que aumentan la acidez:

miento, que puede realizarse en el mismo lugar «on site» o en otro lugar lejos «off site».

Las estrategias para la recuperación de un suelo contaminado, desde el punto de vista técnico, pueden agruparse en: *a) destrucción o modificación de los contaminantes*. Este tipo de técnicas busca alterar la estructura química del contaminante para transformarlo en otro u otros que no supongan un peligro; *b) extracción o separación*. En estos procedimientos los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica). El contaminante se retira del suelo pero pasa a otro medio que tendrá que ser tratado y/o gestionado; y *c) aislamiento o inmovilización del contaminante*. Los contaminantes se estabilizan, solidifican o inmovilizan en el propio suelo con procedimientos químicos o físicos. Los contaminantes siguen en el suelo, por lo que se requiere control y vigilancia posterior.

Las técnicas de descontaminación son aquellas que persiguen que los contaminantes dejen de estar presentes en el suelo, mediante destrucción, cambio a otras sustancias no tóxicas o extracción, y suelen proporcionar soluciones permanentes.

Las técnicas de contención son aquellas que buscan impedir la migración de los contaminantes mediante aislamiento, inmovilización o traslado al vertedero; no proporcionan soluciones permanentes y tienen un plazo máximo de validez.

Entre los sistemas «in-situ» están: *a) el lavado con agua*, *b) la extracción en fase vapor*, y *c) la extracción múltiple*.

El proceso de lavado con agua depende de la solubilidad de los contaminantes y suele ir seguido de una depresión del nivel freático hasta que los contaminantes se eliminan por drenaje. La extracción en fase vapor se utiliza cuando los contaminantes son volátiles (como las gasolinas), se introducen tubos en el suelo y se inyecta vapor de aire caliente para volatilizar y recoger en la superficie los contaminantes. Son necesarios trata-



mientos prolongados y suelos con porosidad y permeabilidad adecuadas. Otros sistemas que transfieren los contaminantes de un subsistema natural a otro (del suelo al aire) y de eficacia limitada, son los de multifase. Éstos son complementarios a los sistemas anteriores y se utilizan con objeto de aumentar la limpieza, combinan la extracción en fase líquida (agua, mezcla con extractante, disolventes) con otra en fase vapor que arrastra los disolventes.

Los sistemas «ex-situ» suelen ser de costosa aplicación y están limitados a tratamiento de masas relativamente pequeñas, entre estos sistemas están: a) la desorción térmica a baja temperatura en hornos que no superan los 350 °C, pudiendo recuperarse los contaminantes a la salida del horno o destruirlos por combustión; b) la aireación; c) el lavado con agua o con disolventes.

Las técnicas «in-situ» son las más adecuadas y las que menos perturbaciones suelen ocasionar.

Entre los tratamientos microbiológicos, está la **biorrecuperación** o biorremediación, generalmente «in-situ» (aunque a veces es necesario trasladar el suelo a unos tanques donde se realiza el tratamiento y la extracción de los productos transformados). La biorrecuperación consiste en propiciar la biodegradación de los contaminantes orgánicos del suelo mediante la estimulación de las poblaciones microbianas del suelo (autóctonas) o externas (alóctonas). Basándose en la capacidad que presentan todos los seres vivos (microorganismos), especialmente bacterias, pero también la microflora del suelo y plantas en general, para metabolizar sustancias orgánicas (sintéticas o no), incluso xenobióticos de origen antrópico. En la biorremediación se mineralizan las sustancias carbonadas, bajo condiciones aerobias o anaerobias, siempre mediante mecanismos químicos de naturaleza redox.

Los contaminantes actúan como donadores de electrones, en medio aerobio es el oxígeno quien los capta y en medio anaerobio el aceptor puede ser el CO<sub>2</sub> o también los nitratos o sulfatos presentes en el suelo.

La estimulación de las poblaciones microbianas se realiza con inyección de nutrientes (nitrógeno y fósforo), ventilación con aire o aplicación de ciertos reactivos químicos (como el peróxido de hidrógeno) para proporcionar el oxígeno.

Si la limpieza de la contaminación del suelo es inviable o innecesaria, la actuación se limita a reducir o prevenir los riesgos. Normalmente se previene la migración y el contacto, utilizando barreras mediante recubrimientos de la zona afectada con plásticos, asfaltos, arcillas, etc.

La **fitorremediación** es un procedimiento que elimina los contaminantes orgánicos o inorgánicos de los suelos y/o de las aguas empleando plantas. Los metales,

al no poder ser degradados, simplemente se acumulan (por absorción, quelación, etc.) y los contaminantes orgánicos se metabolizan en la raíz o en tallos y hojas.

La Dirección General de Medio Ambiente de la Unión Europea entiende que «las mejores técnicas disponibles (Ley 16/2002 EU, de prevención y control integrados de la contaminación)» son aquellas técnicas de recuperación, técnica y económicamente viables, más eficaces para el fin propuesto, las que puede utilizar en condiciones razonables el responsable de la recuperación y que no introduzcan en lo posible efectos secundarios en su aplicación.

El Real Decreto 9/2005 establece que prioritariamente se ha de utilizar un tratamiento de descontaminación en el que se destruyan o extraigan los contaminantes del suelo y que no requiera de la excavación del mismo. No se especifica si se deben priorizar las técnicas de aislamiento o inmovilización de los contaminantes frente a su traslado a vertedero. En el caso de que no sea posible aplicar soluciones permanentes, no descarta que puedan aplicarse técnicas de inmovilización o contención de descontaminantes. La elección de la tecnología de descontaminación será por razones técnicas, económicas o medioambientales.

## BIBLIOGRAFÍA

1. López, F. y Ayala, F.J.: *Contaminación y depuración de suelos*. Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, 1995.
2. Jiménez Ballesta, R.: *Comportamiento del suelo ante los procesos de contaminación*. Documentación del IV Curso de Verano «Geoquímica Ambiental Aplicada», UNED, 2007.
3. Gutiérrez Maroto, A.: *Contaminación de suelos en áreas mineras*. Documentación del IV Curso de Verano «Geoquímica Ambiental Aplicada», UNED, 2007.
4. Jiménez, S.: *La conservación del suelo, base de su sostenibilidad y soporte de la salud*. Discurso leído en la Inauguración del Curso 2004. Real Academia de Farmacia. Madrid.
5. Bohn, H., Meneal, B. y O'Connor, G.: *Química del suelo*. Limusa, 1993.
6. <http://edafologia.ugr.es/conta/tema11/concep.htm>
7. <http://www.unex.es/edafo/GCSP/GCSL4ContEsp.htm>
8. Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005, de 14 de enero (versión mayo de 2007). Ministerio de Medio Ambiente.
9. Sposito G.: *The chemistry of soils*. Oxford University Press, New York, 1989.

Antonio Zapardiel Palenzuela  
Dpto. de Ciencias Analíticas