

El suelo en la biosfera y su repercusión en la Salud Ambiental *

ANTONIO LÓPEZ LAFUENTE Y
CONCEPCIÓN GONZÁLEZ HUECAS

*Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia.
Universidad Complutense de Madrid.*

RESUMEN

Se analiza en este trabajo el papel que juega el suelo en el desarrollo de los ecosistemas terrestres y su influencia en la salud ambiental. No siempre que se han estudiado los factores que intervienen en la evolución del medioambiente se ha tenido en cuenta la edafosfera como el sistema donde agua, aire, materia orgánica y materia mineral se entremezclan para formar la epidermis del planeta. Tratamos, a partir de entender el suelo como un sistema sin el cual la vida no existiría, de encontrar algunas respuestas que ayuden a los indicadores ambientales a detectar los procesos que tienen lugar en la naturaleza. El crecimiento de la población y la aceleración del desarrollo están llevando a una situación en la que no se podrá aplicar el concepto de «sostenibilidad». Estudiar el suelo para entender su funcionamiento y su relación con la salud de los habitantes es un reto que debe ser asumido con urgencia por los científicos que estudian el suelo.

Palabras clave: Suelo.— Contaminación.— Salud ambiental.

ABSTRACT

Soil in the biosphere and its impact on Environmental Health

In this work, we examine the role of soil in the development of terrestrial ecosystems and its influence on environmental health. Not all studies on the fac-

* Trabajo de investigación del que se ha extraído el discurso que pronunció Antonio López Lafuente con motivo de la toma de posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia Nacional de Farmacia, el 13 de marzo de 2003.

tors involved in environmental evolution have considered the edaphosphere as the system where water, air, organic matter and minerals blend to form our planet's skin. By dealing with soil as a system without which no life could ever exist, we aim to find some answers that may help environmental indicators identify natural processes. Population growth and the increasingly accelerated development are leading to a situation where the «sustainability» concept may no longer be applicable. Studying soil with a view to understanding the way it acts and how it relates to human health is a challenge to be urgently met by all soil scientists.

Key words: Soil.— Contamination.— Environmental health.

Extensive abstract

In this work, we examine the role of soil in environmental studies. Traditionally, soil has been overlooked in analysing the parameters involved in the development of nature; one could easily wonder why, if soil is an indispensable element of ecosystems, it has been so rarely addressed in these studies. The answer may lie in the concept that has developed around it. Its exceedingly utilitarian management, with studies focusing on its properties as a substrate for plant development, has led to the fact that it is in itself a complex, multistructural, multifunctional system with its own organizational laws being ignored. Such concepts as «*quality*» and «*uses*» have led to the widespread adoption of an excessively anthropomorphic approach that has precluded the emergence of a broader conception of this system.

Based on these premises, the pedology of the next millennium should undertake the challenge of managing the *resource* soil in every aspect (technical, legal, social, health-related and economic) if problems such as the climatic change, the destruction of the ozone layer, the increasing atmospheric emissions, waste management, eutrophication or desertization are to be solved with a global approach where soil is assigned a prominent role.

Let us comment now on two of the major topics in relation to pedological development, namely: soil as an element of the ecosystem that must be known and identified, and the impact of its contamination on environmental health.

So far, studies on soil have relied on traditional definitions such as «*a surface portion of the earth's crust that constitutes a complex organo-mineral system which cannot be renewed in the short run and is capable of supporting life and the existence of all terrestrial ecosystems and their associated activities*».

Based on the previous definition, soil, as a natural resource, evolves in space and time. In this context, the concept of edaphosphere emerges as the portion of the earth's surface that constitutes the interface between the lower atmosphere, the plant and the underlying geological layer. From this standpoint, the edaphosphere can be characterized in terms of spread, volume, and physical, chemical and biological properties, all of which are influenced by formation or degradation processes. Also, whether through natural evolution or by effect of human activities, the edaphosphere can expand, contract, increase or decrease in size, and undergo qualitative and/or quantitative changes in its properties.

Let us examine some of these characteristics by focusing on a specific type of site of a high environmental interest, *viz.* the diapir. Diapirs are saline geofoms rarely encountered in the Mediterranean basin that were exploited by successive civilizations. Salt, as an indispensable substance for human health, turned diapirs into natural factories for their production. Pedologically, these formations give rise to ecosystems with specific characteristics as the wide variety of original materials in them fold completely randomly to produce mineralogically complex soils.

One other aspect to be considered in studying soil is its impact on environmental health and, especially, the effects of its contamination. Because it is an open system that exchanges mass and energy with the atmosphere, lithosphere and biosphere, soil is a key medium in the control of the biogeochemical cycles that occur on the earth's surface, where it acts as an intricate receptor capable of filtering, destroying, neutralizing, storing or controlling some substances. As such, soil can be both a source of hazardous substances and a protective barrier for other, more sensitive systems such as water or vegetation.

When a contaminant reaches soil, it can be neutralized, biodegraded, adsorbed, bound or precipitated. Soil is unselective, so it can act simultaneously on organic and inorganic compounds, anions and cations, acids and bases, oxidants and reductants, metals, salts, colloids, microbes, etc. The contaminant can leave the system by volatilization, leaching, adsorption or exchange, or be extracted by vegetation and microorganisms. The end result is the retention of the contaminant or its mobilization, either within the soil or, via leaching, to the water table.

Unlike other media, contaminated soil rarely exhibits immediately appreciable effects; rather, the effects tend to go unnoticed over long periods owing to the ability of soil to accommodate them. This poses a serious problem since, when the damage becomes apparent, recovery is much costlier in terms of time and money—or may even be impossible. In response to this challenge, the scientific community, and environmental and health officials, should cooperate with a view to developing specific approaches to abating soil contamination and lessening or avoiding its impact on our quality of life.

INTRODUCCIÓN

«La Ciencia evoluciona y al tiempo se diversifica. Los conocimientos en que se basa la Ciencia son cada vez mayores y permiten afrontar nuevos campos de investigación que a su vez son origen de nuevos conocimientos. El engranaje funciona de tal manera que ejerce un efecto multiplicador, y al mismo tiempo específico» (1).

Es indudable, que hoy no se puede entender la ciencia sin ese carácter autorregenerador que le hace multidisciplinar y al mismo tiempo le imprime la condición de globalizadora. El desarrollo científico está relacionado directamente con la capacidad de integrar

todos los elementos que intervienen en los procesos, y con la posibilidad de que los resultados obtenidos afecten al conjunto del planeta. No podemos entender la ciencia desde una óptica compartimentalizada y sin conexión entre disciplinas, porque los límites son cada vez más difusos, Murray Gell Mann, Premio Nobel de Física en 1969, afirma: «*En la actualidad, la red de interrelaciones que conecta el género humano consigo mismo y con el resto de la biosfera es tan complejo que todos los aspectos se influyen mutuamente en grado extremo*» (2).

Cuando aplicamos estas premisas al estudio de los recursos naturales nos encontramos que son la base del conocimiento. No se puede afrontar el problema que supone la falta de agua, o la utilización de combustibles fósiles, desde una ciencia particular. Tampoco se pueden analizar hoy los temas medioambientales desde aspectos puramente tecnológicos sin tener en cuenta que el primer involucrado es el hombre, por ello, el estudio de indicadores sociales, económicos y sanitarios, son imprescindibles para tener una visión más próxima a la realidad. Hemos pasado de una percepción del medio a escala local, a considerar la biosfera como un sistema global, debiendo armonizar desarrollo y bienestar con protección, conservación y salud.

Esta globalización de los planteamientos alcanza también a todos los habitantes del planeta, los países en los últimos años, han tomado medidas para amortiguar los efectos negativos de una mala utilización del desarrollo. Aparecen conceptos como «*Desarrollo sostenible*», o «*Indicadores ambientales*» para definir los problemas y buscar soluciones. Es preciso profundizar en el estudio de los mecanismos y las causas de tales problemas, pero todavía se está lejos de poder cuantificar todos los parámetros que intervienen y mucho más de aportar todas las soluciones.

Un ejemplo de la dificultad que entraña el concepto de «*Desarrollo sostenible*» lo encontramos si analizamos el informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente basado en indicadores, que se publicó en abril de 2001 (3). En él se puede leer: *el crecimiento económico sigue demandando un consumo adicional de energía y los países desarrollados continúan dependiendo de la energía producida por combustibles fósiles y de energía nuclear*. Cuando en la Cumbre de Johan-

nesburgo del pasado año 2002 se propone aumentar los recursos para potenciar la utilización de energías renovables, aparecen discrepancias, y no todos los países están de acuerdo en los planes para llevarlo a cabo.

Pero el ecosistema terrestre no es ilimitado y solo es capaz de suministrar una determinada cantidad de energía. El crecimiento de la población y la aceleración del desarrollo están llevando a una situación «no sostenible». Se están agotando las fuentes que son la base del bienestar humano, y si en el futuro no llegamos a cuadrar una ecuación que diga: Aumento energético producido por la mayor población y desarrollo tecnológico, igual a generar un efecto cero en los recursos no renovables, y un efecto equivalente en los renovables, el hombre, en los países desarrollados, no podrá seguir manteniendo su nivel de comodidad.

Ahora bien, los problemas medioambientales no afectan solo al desarrollo económico de los países, también afectan, y de forma perentoria a la estabilidad de los ecosistemas y a la forma de vida de sus especies. El cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, o la contaminación de aguas, suelos y plantas, tienen una repercusión directa en la supervivencia animal y vegetal, además de una incidencia notable en la salud de la población. Aparecen aquí dos términos, salud y medioambiente que están íntimamente relacionados y desde hace unos años su conexión ha dado lugar al concepto de salud ambiental.

1. MEDIOAMBIENTE Y SALUD AMBIENTAL

«La salud ambiental comprende aquellos aspectos de la salud humana, incluyendo la calidad de vida, que son determinados por factores físicos, químicos, biológicos, sociales y psicológicos en el medio ambiente. También se refiere a la teoría y práctica de valorar, corregir, controlar y evitar aquellos factores en el medio ambiente que potencialmente puedan perjudicar la salud de generaciones actuales y futuras» (4).

Definición elaborada por la Organización Mundial de la Salud en el año 1991, que incluye el efecto del impacto ambiental en la salud humana. Para determinar las relaciones de mayor importancia entre la Salud Pública y el entorno se eligen los llamados «indicadores

ambientales», parámetros que dan información clara y nítida sobre los fenómenos de mayor transcendencia, o bien parámetros, que hacen perceptible la tendencia de un proceso no detectable en el momento actual.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) definió en este mismo año, como indicador de Salud ambiental: *aquel factor que brinda datos en el área de la calidad del medioambiente, tanto en el agua como en el aire o el suelo y su impacto en relación con la salud pública* (4).

El análisis de estos factores se hace imprescindible para afrontar el estudio de la calidad ambiental. El agua es la base de la supervivencia y según las Naciones Unidas, actualmente 1.100 millones de personas viven sin agua potable y 2.400 millones sin red de saneamiento. Las emisiones de dióxido de carbono, por su efecto invernadero o de los óxidos de nitrógeno como precursores del ozono, junto a la deposición de azufre y nitrógeno que contribuyen a la acidificación de suelo y agua son algunos de los indicadores que tienen una repercusión directa en la salud.

En el VI Programa Marco Europeo de Medioambiente, publicado en noviembre de 2002, se puede leer: *«en las últimas décadas ha habido una concienciación cada vez mayor de que la calidad del aire, del agua, del suelo y de los alimentos influye en la calidad de nuestra salud y de nuestras vidas. Se pasa de un aumento de las alergias, las enfermedades respiratorias y los casos de cáncer, a la alteración de los sistemas hormonales y reproductivos de nuestro cuerpo y a la muerte prematura»* (5).

El objetivo general de este programa en relación con el medioambiente y la salud es obtener una calidad del medioambiente tal que los niveles de contaminación antropogénicos, incluidos los diversos tipos de radiación, no representen riesgos para la salud. En la estrategia política para los próximos años, está el ver por que vías los contaminantes alcanzan el cuerpo humano y determinar el camino más eficaz para reducir al mínimo aceptable los niveles de exposición referidos al aire, al agua y al suelo.

Son por tanto, aire, agua y suelo, los vehículos que transportan la vida, aunque también son los elementos que la naturaleza utiliza para transportar su alteración. Todos son imprescindibles, pero quizá

sea el suelo quien mejor representa la conjunción de un espacio vital, por lo que constituye un elemento decisivo en la valoración de los riesgos ambientales, tanto por ser un sistema en el que se desarrolla vida, como por ser almacén de nutrientes, y también un depósito de contaminantes.

No ha sido tradicionalmente el suelo, el elemento más estudiado, seguramente porque se tiene la sensación que hay mucho, y por tanto no se puede agotar, lo cual es, un gran, un imperdonable error, porque como todo bien no renovable a corto plazo, y el suelo lo es, su destrucción o contaminación significa una pérdida que tardaría miles, incluso millones de años en recuperarse.

2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL SUELO

Han tenido que pasar varias décadas, desde el comienzo del desarrollo industrial, mediados del siglo xx, para que la comunidad internacional empiece a entender su importancia, y no fue hasta 1986 cuando se emitió la primera disposición en forma de Normativa Europea específica para suelos (6).

En reuniones posteriores, promovidas por el Comité Científico Europeo de Suelos, se reconoce explícitamente que los suelos en Europa es uno de los recursos naturales más amenazados, y donde las políticas medioambientales han conseguido poco éxito.

Cabría preguntarse a que es debido, por qué el suelo, elemento imprescindible de los ecosistemas, ha tenido tan escaso tratamiento. Quizá la respuesta esté en el concepto que sobre él se ha desarrollado. Su tratamiento excesivamente utilitarista, donde su estudio se ha centrado en su condición de sustrato para el desarrollo de las plantas, ha hecho no entenderlo como un sistema, en sí mismo, complejo, multiestructural y multifuncional con sus propias leyes de organización. Conceptos como «*calidad*» o «*funciones*» del suelo imprimen una perspectiva excesivamente antropomórfica, que impide desarrollar una concepción más amplia del sistema.

Pero si atendemos al concepto holístico no podemos pararnos en el análisis de estas propiedades que definirían, el «*cuerpo edáfico*» (7). La edafología en el próximo milenio deberá ocuparse de

gestionar el *recurso suelo* en todos los aspectos: técnicos, jurídicos, sociales, sanitarios, e incluso económicos, de forma que problemas como el cambio climático, la capa de ozono, las emisiones atmosféricas, la gestión de residuos, la eutrofización, la erosión o la desertización, respondan a planteamientos generales donde el suelo no pueda ser obviado.

Un rápido análisis de la utilización del «*suelo*» en la Comunidad Europea durante los últimos años nos enseña que la agricultura se ha ido especializando y concentrando en las zonas con menores costes de explotación, de forma que el 80% de la producción intensiva en la Comunidad Europea se ubica en zonas costeras del mar del Norte y del canal de la Mancha, en detrimento del sur donde muchas hectáreas se desforestan, se marginan e incluso se abandonan por completo, la emigración o el cambio del sector productivo es la respuesta. La contaminación es otro hecho que afecta al suelo y tiene implicaciones en elementos del ecosistema, un ejemplo de ello lo encontramos en la absorción y acumulación de metales por las plantas que crecen en suelos con elevadas concentraciones de estos. Otros efectos son: el de la eutrofización que se producen en las aguas como consecuencia de la utilización de abonos nitrogenados y fosfatados, o los procesos de salinización y posteriores pérdidas de productividad.

Nos referiremos a continuación a dos de los grandes bloques temáticos que constituyen parte fundamental en el desarrollo de la edafología, de un lado, el suelo como integrante del ecosistema que debemos conocer e identificar, y de otro, las implicaciones que su contaminación tiene para la salud ambiental.

3. EL SUELO EN LA BIOSFERA

Hasta ahora, cuando se estudia el suelo partimos de definiciones clásicas, «*el suelo es la parte superficial de la corteza terrestre que constituye un sistema complejo órgano-mineral, no renovable a corto plazo, capaz de permitir la vida y la existencia de todos los ecosistemas terrestres y de las actividades asociadas*».

Según esta definición el suelo, como todo recurso natural, se despliega en el espacio y evoluciona con el tiempo. Aparece el con-

cepto de edafosfera, entendiendo como tal la superficie terrestre que forma la interfase entre la baja atmósfera, la planta y la capa geológica subyacente. Desde esta perspectiva, la edafosfera puede caracterizarse por atributos tales como extensión, volumen, propiedades físicas, químicas y biológicas, sometidos a los procesos de formación o degradación. Así mismo, ya sea mediante su evolución natural, ya como resultado de las actividades humanas, la edafosfera puede dilatarse, contraerse, aumentar o disminuir de volumen, mutar cuantitativa y/o cualitativamente sus propiedades.

Un ejemplo donde la evolución natural está relacionada con las actividades humanas lo encontramos en las formaciones diapíricas, en las que sustrato y tipo de suelo hacen de estas zonas enclaves de interés medioambiental. Los Diapiros son geoformas salinas poco frecuentes en la cuenca Mediterránea que fueron utilizadas por las diferentes civilizaciones para su explotación. La sal como sustancia imprescindible para la salud humana hizo de los diapiros fábricas naturales para su producción, cientos de familias vivieron de sus entrañas, su cuidado y conservación era imprescindible para la supervivencia.

Estudiadas, en algunos casos, como formaciones asociadas a bolsadas de petróleo (8), las formaciones diapíricas son pliegues del terreno en forma anticlinal que tienen un núcleo salino. Estas capas de sal enterradas a gran profundidad, debido a su menor densidad ascienden en columnas como troncos, van penetrando lentamente en los estratos suprayacentes y finalmente afloran en la superficie. Las columnas o cúpulas de sal pueden tener una extensión vertical de varios kilómetros y sólo uno o dos kilómetros de diámetro. Por tanto, las formaciones diapíricas representan un caso extremo de pliegues disarmónicos desarrollados en series sedimentarias que intercalan material evaporítico con una estratificación caótica.

Unidas a estas formaciones diapíricas pueden encontrarse afloramientos de rocas ígneas básicas, denominadas ofitas. Su origen es volcánico o subvolcánico y proceden de antiguas actividades sísmicas ocurridas en el Trías, que dejó en su erupción materiales sueltos, posteriormente arrastrados por el domo en su ascenso (9).

Estas formaciones dan origen a unos ecosistemas de características específicas, ya que la gran diversidad de materiales originales

se pliegan sin orden alguno, originando suelos de mineralogía compleja, condicionando una gran edafodiversidad. Los afloramientos principales se localizan en el Norte y Noreste de la Península Ibérica, Levante, Cordilleras Bética y Subbética.

Analizamos las condiciones geológicas, climáticas, botánicas y edáficas de distintos diapiros encontrados en el Norte de España, como ejemplo de ecosistemas autóctonos cuya conservación determina la evolución de los recursos naturales y participa en el desarrollo sociocultural de una región.

El área diapírica seleccionada, Norte de la provincia Burgos (Poza de la Sal), presenta una elevación máxima de 1.024 metros, y está encuadrada en el centro de un gran valle constituido por calizas y margas del Cretácico que rodean concéntricamente al domo salino. En la parte central aparece un gran dique con perfil elíptico de ofitas.

Geológicamente la zona central está formada por rocas ígneas oscuras, básicas, duras y compactas que se presentan como manifestaciones volcánicas y subvolcánicas, asociadas a su alrededor con formaciones sedimentarias. Estos materiales circundantes tienen una gran diversidad litológica, predominan arcillas abigarradas y yesos del Keuper que están en contacto con calizas arcillosas y margas jurásicas recubiertas por sedimentos terrígenos del Cretácico superior (10). Tienen un carácter claramente extrusivo que, gracias al comportamiento plástico del Keuper, representan un nivel de despegue respecto a la cobertera cretácica y terciaria.

Los afloramientos ígneos de los diapiros presentan textura ofítica heterogranular cuyos constituyentes esenciales desde el punto de vista mineralógico, son: clinopiroxeno, plagioclasas y, olivino en menor proporción. Como minerales accesorios, horblenda y óxidos metálicos. La biotita con alto grado de cristalinidad es el filosilicato más abundante, acompañado por vermiculita en baja proporción, y trazas de clorita. En general presentan una alteración media tipo deutérico que afecta principalmente al olivino que se altera hacia minerales serpentínicos y a las plagioclasas que se alteran hacia moscovitas.

Geoquímicamente las ofitas se caracterizan por presentar una composición básica, con porcentajes de SiO_2 entorno al 50%, y don-

de el Al_2O_3 representa 1/3 del total de los otros óxidos (Figura 1). Es de destacar el alto contenido en óxido de calcio, el enriquecimiento en óxidos ferromagnesianos y la escasez en óxidos de sodio y potasio, cuyos contenidos no sobrepasan el 3% (11).

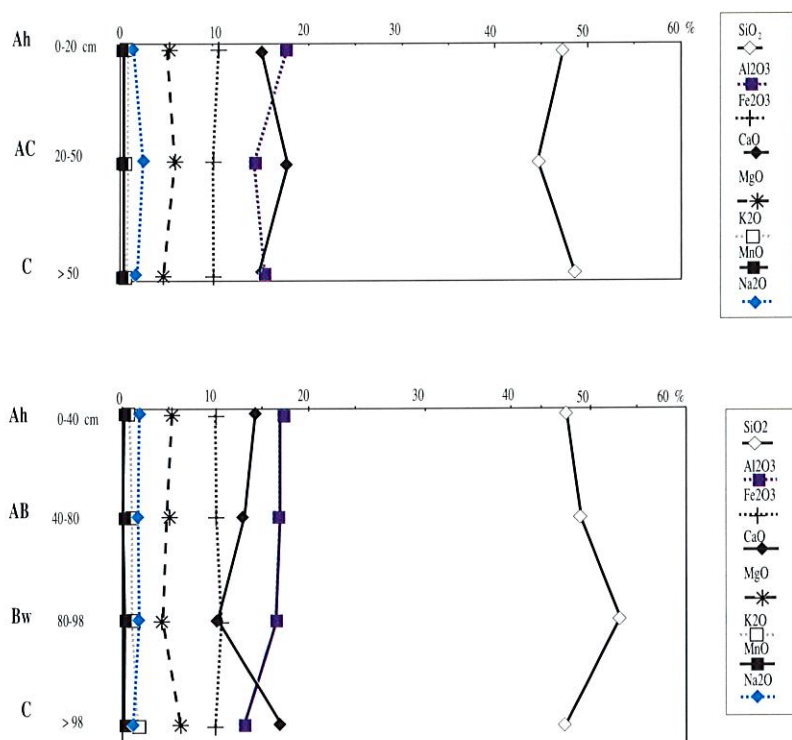


FIGURA 1. Composición química porcentual de muestras de rocas ofíticas incluidas en los suelos.

Presenta la zona un clima marcadamente mediterráneo, con una estación seca (3-4 meses) que coincide con la estación cálida lo que conduce a un intenso déficit de humedad. Las precipitaciones son escasas y torrenciales, especialmente en otoño. Elevadas temperaturas en verano, y fuertes contrastes climáticos interanuales. Según los datos de las estaciones meteorológicas más próximas, el tipo climático de la zona es Mediterráneo templado con una precipitación media anual de 650 mm y una temperatura media anual de 11,5 1C.

Desde el punto de vista bioclimático la zona se encuadra en el piso Supramediterráneo inferior, con un ombroclima seco a subhúmedo. Se distinguen dos series de vegetación: Serie supra-mediterránea castellano-cantábrica y riojano-estellesa basófila del quejigo (*Quercus faginea*) *Daphno latifoliae*-*Acereto granatensis sigmetum* y serie supra-mediterránea castellano-cantábrica y riojano-estellesa basófila de la encina (*Quercus rotundifolia*) *Spiraeo hispanicae-Querceto rotundifoliae sigmetum* (12).

En la actualidad la vegetación es poco densa y está constituida principalmente por pastos y matorrales. Los pastizales son de gramíneas del tipo *Lolium perenne*, *Phleum phleoides*, *Dactylis hispanica*, *Festuca indigesta* y *Bromus hordaceus* y de leguminosas del tipo *Medicago minima*, *Lotus corniculatos* y *Trifolium repens*, que corresponden, tanto a antiguas parcelas de labor abandonadas como, a laderas húmedas y sin arbolado. Estas formaciones a menudo se encuentran asociadas a matorrales rastreros de aulagas (*Genista scorpius*), tomillos (*Thymus mastichina*) y espliegos (*Lavandula latifolia*). Al Oeste del área diapírica se presentan cultivos de hierba, que sirven de pasto para los numerosos rebaños de oveja existentes en esta parte del país.

Debido a la gran actividad minera desarrollada en el siglo XIX en la zona, el relieve se encuentra en la actualidad fuertemente alterado, predominando terrazas artificiales construidas para la explotación de la sal.

Sobre este tipo de materiales geológicos y estas condiciones ambientales se desarrollan, dos secuencias evolutivas de suelos: la procedente de la alteración de materiales sedimentarios y la procedente de la alteración de las rocas ígneas, que a pesar de constituir catenas, tienen unas características edáficas muy diferentes.

3.1. Propiedades físicas y químicas de los suelos

Los suelos desarrollados sobre ofitas presentan una textura gruesa, con proporciones de arcilla entorno al 14%, que disminuyen en los horizontes profundos. Los mayores porcentajes de las fracciones finas en horizontes superficiales indican una alteración más intensa a este

nivel, como resultado de la marcada transformación bioquímica provocada por la descomposición de la materia orgánica (Tabla 1).

La densidad aparente varía entre 0.42 y 1.62 Mg m⁻³, lo que pone de manifiesto la pequeña proporción de constituyentes amorfos en estos suelos. Sin embargo, y a pesar de sus gruesas texturas, se trata de suelos con un alto porcentaje en la capacidad de retención de agua, que supera el 14%, este hecho es debido al alto contenido en C orgánico que estabiliza los agregados y evita las pérdidas de humedad (13).

Las texturas más finas, con altos contenidos de limo, están asociados a los suelos del tramo yesífero-arcilloso y son consecuencia de la naturaleza del material original y no a procesos de ilmerización.

No existen diferencias apreciables respecto a los valores de densidad aparente con los suelos ofíticos, si bien la capacidad de retención de agua tiende a ser superior en todos los casos, propio de clases texturales medias.

TABLA 1. *Propiedades físicas seleccionadas de suelos representativos de formaciones diapíricas*

Horz.	Análisis Granulométrico				Densidad	Densidad	Retención
	Arena Gruesa	Arena Fina	Limo	Arcilla	Aparente	Real	de Agua -33kPa
	%				Mg m ⁻³		g kg ⁻¹
Suelo derivado de ofitas							
A1	57.48	25.10	7.56	9.86	1.55	2.75	142.6
AB	47.14	29.54	9.28	14.03	1.62	2.73	138.9
Bw	46.85	37.53	9.01	14.81	nd	nd	nd
C	59.71	30.83	6.25	3.25	nd	nd	nd
Suelo derivado de materiales sedimentarios							
A1	36.52	38.44	15.19	9.85	1.01	2.55	293.2
ABca	5.29	18.39	49.58	26.74	1.51	2.68	201.1
C1	4.29	17.95	34.31	45.54	1.63	2.70	186.7
C2	35.07	21.92	18.53	24.48	1.52	2.74	209.4

Los suelos derivados de materiales ígneos presentan unos pH comprendidos entre valores moderadamente ácidos a neutros (Tabla 2). Están influenciados por la fuerte incorporación de los ácidos orgánicos. La reacción con fluoruro sódico fue ligeramente alcalina en todos los horizontes, lo que descarta la presencia de materiales ándicos (14).

Los perfiles desarrollados a partir de materiales sedimentarios alcanzan valores de pH superiores a la neutralidad. Esto se debe, por un lado a la naturaleza de los materiales litológicos y por otro, a la escasez de precipitaciones que impide la pérdida de bases por lavado, induciendo la formación de carbonato cálcico secundario.

Todos los suelos presentan, así mismo, elevados contenidos en C orgánico, como consecuencia del fuerte enraizamiento que origina el tipo de vegetación. Por el marcado contraste estacional, se trata de materia orgánica bien humificada, y estabilizada por el carbonato cálcico, en el caso de los suelos carbonatos o por los constituyentes amorfos en el caso de los suelos ofíticos (15). La evolución del nitrógeno total es similar a la evolución del carbono orgánico, lo que sugiere que las formas orgánicas de N son mayoritarias en estos suelos.

La naturaleza química de estos suelos es esencialmente igual a la del material de partida. Presentan respecto a las rocas un relativo incremento en sílice y potasio, decrecen los óxidos de aluminio y hay una ligera disminución en las proporciones de hierro, sodio y alcalinotérreos.

En las condiciones actuales las rocas de textura ofítica presentan una composición química homogénea. Las mayores proporciones corresponden a los iones Si y Ca, el resto de los cationes presentan contenidos variables aunque su concentración sigue el mismo orden $Al > Fe > Mg > Na > K > Mn$. En las rocas de facies Keuper encontramos una gran heterogeneidad química en función de su contenido en arcilla, manteniéndose constante el predominio de silicio y los altos contenidos de potasio.

El contenido en cationes alcalinos y alcalinotérreos de la roca fresca de textura ofítica y de los suelos derivados de ellas es análogo. La secuencia de movilidad es: $Ca > Mg > K > Na$. Por el contrario,

TABLA 2. Propiedades químicas seleccionadas de suelos representativos de formaciones diapiíticas

Horz.	pH	Carbónico	Nitrógeno	C/N	CIC*	Bases Cambiables			Saturación	CaCO ₃	Retención		
H ₂ O	INNaF	Orgánico	Total		Ca	Mg	Na	K	Bases Equiv.	Fosfatos			
		g kg ⁻¹				cmol kg ⁻¹			%				
Suelo derivado de ofitas													
A1	7.41	8.52	33.22	2.08	16	31.84	21.50	3.92	0.15	0.42	81.62	0.00	18.57
AB	7.61	8.72	16.42	1.60	10	32.15	23.60	3.58	0.14	0.37	86.13	0.00	19.59
B _w	7.80	8.75	14.35	1.35	10	27.05	21.32	3.61	0.14	0.29	93.75	0.00	17.52
C	8.01	8.84	2.10	0.70	-	21.94	17.55	3.08	0.11	0.23	95.58	0.00	9.76
Suelo derivado de materiales sedimentarios													
A1	7.87	nd	28.13	2.43	12	26.12	21.07	4.77	0.78	0.64	Sat.	5.10	nd
AB _{ca}	8.14	nd	10.00	0.80	11	15.46	31.07	3.52	8.87	0.47	Sat.	33.72	nd
C1	9.01	nd	2.45	0.55	-	10.94	14.39	1.28	12.90	0.39	Sat.	11.23	nd
C2	9.29	nd	0.50	0.20	-	9.19	6.91	1.01	9.76	0.24	Sat.	4.33	nd

CIC* = Capacidad de Intercambio Catiónico.

hay una gran diversidad en el contenido de los cationes básicos correspondientes a rocas y suelos del Keuper, debido a su variada naturaleza litológica y a su distribución caótica (Figura 2).

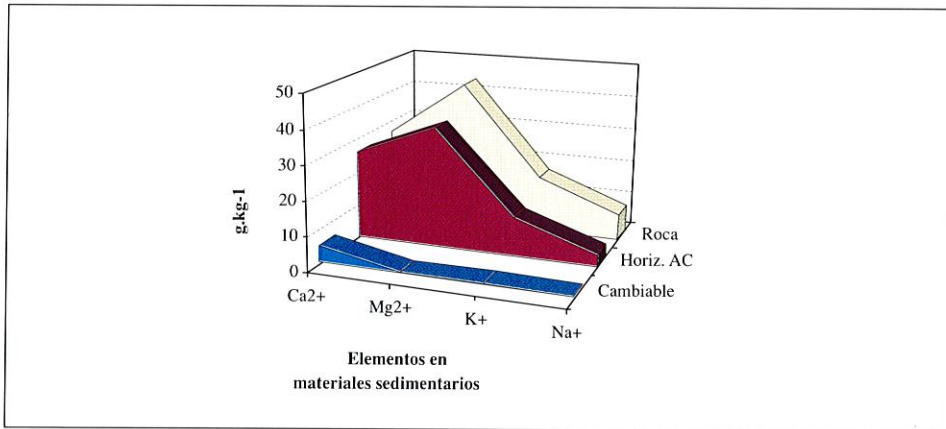
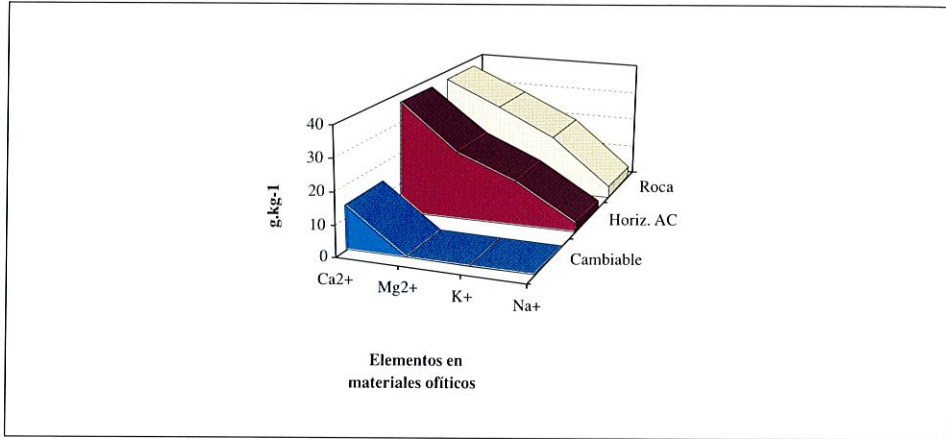


FIGURA 2. Evolución del contenido cationes alcalinos y alcalinotérreos en ambientes diapíricos.

El Ca es el catión con mayor proporción en el Complejo de Cambio Catiónico (entre un 47% y 97% del total de bases), incluso en los suelos con menor cantidad de calcio total, lo que indica que, en toda la formación diapírica, existe una preferencia relativa y/o una intensa retención de este elemento por el complejo de cambio.

A pesar de que el Na cambiante queda fijado muy débilmente en todos los suelos estudiados, su alto contenido en algunos perfiles se atribuye a la presencia de sales solubles asociadas a él, representando un peligro potencial de toxicidad, así como, un antagonismo significativo para el magnesio.

El Mg total en la unidad facies Keuper, es muy superior al Ca total, tanto en roca como en suelo. No obstante, se puede originar un estado carencial de magnesio, debido a que en el complejo de cambio las proporciones de este elemento son muy bajas, dando relaciones $Ca_{\text{cambiable}}/Mg_{\text{cambiable}} > 10$ (16). Sin embargo este hecho no supone una carencia de calcio para la vegetación, ya que las relaciones Mg/Ca en el complejo de cambio son menores de 0.13. El catión K que presenta elevadas proporciones, sobre todo en roca y suelo de materiales del Keuper, disminuye notablemente en el complejo de cambio, lo que se debe, tanto al efecto antagonista que ejerce el calcio (17), como a su facilidad para ocupar posiciones reticulares en los silicatos.

3.2. Génesis y Clasificación

Debido a la textura y al carácter heterogranular, la alteración que tiene lugar en los materiales ofíticos solo se produce superficialmente. Este hecho junto a la peculiaridad del clima mediterráneo, con escasez de precipitación < 650 mm, conduce a que estos materiales se alteren muy lentamente dando lugar a perfiles de suelos poco diferenciados, tipo AC o AR. Están constituidos por horizontes organominerales bien desarrollados que satisfacen los requisitos de epipedón móllico. Son suelos con escasa proporción de arcilla, en todos los casos heredada del material original. No obstante el buen drenaje y los fuertes contrastes climáticos interanuales han favorecido la alteración de biotita primaria hacia vermiculita, clorita, esmectita y sus interstratificados.

Cuando el material de partida corresponde a la deposición del Keuper arcillo-evaporítico, los procesos de alteración son igualmente incipientes. El escaso lavado que se produce en estos medios como consecuencia de la sequedad ambiental, junto a la impermeabilidad de los sustratos, impide la pérdida de las bases liberadas en la

alteración, por lo que los suelos permanecen saturados en cationes, permitiendo la formación de CaCO_3 secundario (18) (19).

La influencia en los suelos de los materiales salinos asociados al diapiroismo, se pone de manifiesto por los altos valores de Na^+ cambiante, conductividad eléctrica y pH. A causa de estas características se originan suelos poco evolucionados. Son las alternancias estacionales las que desempeñan un importante papel en la dinámica de los suelos, ya que provocan la precipitación de los iones menos solubles (Ca^{2+} y Mg^{2+}) y la saturación del complejo absorbente en el ión que se mantiene soluble durante más tiempo (Na^+).

En función de estos parámetros y aplicando el sistema de clasificación de suelos Soil Taxonomy propuesta por la Soil Survey Staff (20), se distinguen en el diapiro tres Grandes grupos de suelos:

Haploxerolls, los formados a partir de material subvolcánico.

Torriorthent y Xerorthent, los formados a partir de arcillas y yesos del Keuper (21).

Los clasificados dentro del orden Mollisols como Haploxerolls corresponden a los suelos desarrollados sobre materiales ofíticos y presentan un epipedón móllico y un régimen de humedad xérico. Se caracterizan por tener un horizonte orgánico en superficie, desarrollado sobre un horizonte de alteración fisicoquímica con diferentes grados de evolución. Se distinguen tres subgrupos: Typic haploxeroll, por presentar un horizonte cámbico y alta saturación en bases. Entic haploxeroll, por presentar un alto contenido en fragmentos rocosos y escaso desarrollo de los horizontes. Lithic haploxeroll, por tener contacto lítico.

Los suelos desarrollados sobre materiales arcillosos del Keuper se clasificaron dentro del orden Entisols como Torriorthent y Xerorthent. Son suelos con escaso desarrollo genético caracterizados por tener un epipedón ócrico. Se distinguen dos subgrupos: Tipyc Torriorthent aquellos que tienen una conductividad eléctrica en extracto de saturación mayor de 2 dSm^{-1} a 25°C , y Tipyc Xerorthent los que presentan una moderada profundidad y un régimen de humedad xérico. Como consecuencia, la unidad de paisaje seleccionada presenta una gran variabilidad edáfica, con suelos de composición química y mineralógica heterogénea.

Encontramos, por tanto, en estas formaciones un ecosistema que responde a una arquitectura heterogénea, donde son muchos los parámetros que intervienen y cada uno de ellos influye en el equilibrio del sistema.

4. ELEMENTOS CONTAMINANTES DEL SUELO. SALUD AMBIENTAL

Surge en este punto un nuevo planteamiento que el edafólogo debe hacerse. La Edafología tiene su base científica en el estudio del suelo, como hemos visto, pero como cualquier otra ciencia, sobre el fundamento y el método científico, se desarrollan, además, unas aplicaciones que ayudan a su evolución. Es en este contexto donde debemos encuadrar el análisis de la calidad de los suelos y sus efectos sobre la salud de la población. Ahora bien, no podemos olvidar que disciplinas como la edafología tiene una serie de dificultades que hacen difícil la posibilidad de hallar la necesaria «*causa-efecto*», pues en muchos casos se valora lo que podemos definir como «*efectos débiles o no apreciables*», es decir, valoramos elementos que son nocivos, muchas veces, en cantidades trazas, y con secuelas no apreciables a corto plazo.

Analizamos a continuación las consecuencias que suponen para la salud ambiental la existencia de suelos contaminados, que según el último informe de la Agencia Europea de Medioambiente, se estima que en la Comunidad Europea hay alrededor de 1,5 millones de áreas contaminadas de diversa naturaleza.

Las constantes agresiones que sufre el medioambiente, fundamentalmente en los países industrializados, desde comienzos del siglo xx, por el aumento de la población, y por el desarrollo de la ciencia y la técnica, ponen de manifiesto la necesidad de estudiar su comportamiento frente a la llegada de elementos extraños.

El suelo por ser un sistema abierto que intercambia materia y energía con la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera, hace de él un medio clave en el control de los ciclos biogeoquímicos que tienen lugar en la superficie del planeta, donde el suelo actúa como un receptor complejo, capaz de realizar funciones de filtración, descom-

posición, neutralización, almacenamiento y regulación de determinadas sustancias. Por lo que este puede ser barrera protectora de otros sistemas más sensibles, agua, plantas, animales, o por el contrario puede ser fuente de sustancias peligrosas.

Cuando una sustancia entra en el suelo puede ser neutralizada, degradada de forma biótica o abiótica, adsorbida por procesos de adsorción específica o cambio iónico, complejada o precipitada. El suelo no es selectivo y puede actuar simultáneamente sobre compuestos orgánicos e inorgánicos, aniones y cationes, ácidos y bases, oxidantes y reductores, metales, sales, partículas coloidales, microorganismos, etc. La salida del sistema puede ser por volatilización, por lavado, por adsorción, por intercambio, o extraído por la vegetación y microorganismos. Como resultado final se produce la retención de las sustancias o su movilización, bien en el interior del suelo, bien a través de sus lixiviados a las capas freáticas.

La legislación española en la Ley básica de Residuos Tóxicos de 1998 define suelo contaminado como *«todo aquel cuyas características físicas, químicas o biológicas han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo para la salud humana o el medio ambiente»* (22). Entendiendo por contaminante no solo a la sustancia química de origen humano, sino también aquella que siendo de origen natural se acumula en el suelo y produce cambios en su equilibrio.

La ley recoge veintinueve productos tóxicos que se agrupan en: Compuestos tóxicos de naturaleza orgánica y compuestos tóxicos de naturaleza inorgánica, todos ellos representan un elevado nivel de riesgo para la vida, ya que a través de vertidos accidentales o planificados, estos compuestos llegan al suelo, a las plantas, a las aguas y por último a nuestro propio organismo.

4.1. Compuestos orgánicos

El desarrollo tecnológico ha dado origen a la existencia de miles de compuestos orgánicos que son contaminantes potenciales de los suelos, bien por si mismos, bien como resultado de transformacio-

nes químicas o biológicas, que conducen a la formación de nuevos productos, en ocasiones más móviles, persistentes y peligrosos que los compuestos de partida.

Algunos de estos compuestos orgánicos son relativamente inertes, sin embargo, otros son muy activos aún en concentraciones muy bajas. Las propiedades moleculares, en particular la estructura electrónica, la solubilidad en agua y su disponibilidad para volatilizarse, son los factores que controlan su comportamiento en el suelo.

Dos son los tipos de moléculas que afectan de forma directa a los suelos, unas de elevado Peso Molecular o macromoléculas y otras de bajo Peso Molecular.

Constituyen las primeras, polímeros que se incorporan en los suelos de manera natural o de forma antrópica. El origen natural se debe a la proliferación de microorganismos y a las transformaciones químicas de compuestos orgánicos naturales existentes en el suelo, como son ácidos fúlvicos y ácidos húmicos, así como polisacáridos cargados positiva o negativamente. Estas macromoléculas, por sí mismas no son consideradas como contaminantes del suelo, pero al constituirse en ligandos de compuestos tóxicos orgánicos e inorgánicos, desarrollan un importante papel en los procesos de contaminación.

Los polímeros sintéticos aparecen en el suelo como productos de actividades humanas. Están formados por alcoholes vinílicos, acrilamidas, etilenglicoles, entre otros. Todos ellos, son sustancias no iónicas, solubles en agua, capaces de formar complejos órgano-minerales con la fracción arcilla de los suelos. En general no son tóxicos pero pueden ser muy peligrosos cuando aumenta su concentración como consecuencia de vertidos incontrolados, llegándose a detectar cantidades por encima de 1.100 microgramos por L⁻¹ en lixiviados procedentes de residuos hospitalarios.

El segundo grupo, sustancias de bajo Peso Molecular, se encuentran en la superficie del suelo como resultado de las distintas prácticas de protección de cultivos, o por deposición de vertidos industriales. Se incluyen sustancias como fitosanitarios y productos derivados del petróleo.

De ellos, debido a su uso, son los fitosanitarios los compuestos orgánicos que más afectan a las propiedades del suelo. El enorme

crecimiento demográfico de los países subdesarrollados y, el aumento de la calidad de vida de los desarrollados, ha traído como consecuencia la necesidad de obtener más y mejor cosechas, lo que lleva implícito la necesidad de combatir plagas y enfermedades.

Según la actual denominación de la EPA (Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos), los fitosanitarios son sustancias utilizadas para prevenir, destruir, repeler o mitigar cualquier plaga producida por insectos, hongos, mohos, bacterias o virus. Por lo que bajo el nombre genérico de fitosanitarios se engloban diferentes compuestos designados como: herbicidas, insecticidas, fungicidas, nematocidas y raticidas.

El comportamiento en el suelo de estos compuestos no es igual, la estructura molecular determina su actuación. Un ejemplo de ello lo encontramos en las moléculas orgánicas no iónicas, todas tienen en común el ser adsorbidas en el suelo a través de coloides orgánicos, sin embargo la escasa biodegradabilidad de los compuestos Órganoclorados (compuestos clorados de benceno), frente a la rápida biodegradación de Carbamatos (derivados de la urea) condiciona su persistencia en el suelo y por tanto su toxicidad.

Los compuestos organoclorados constituyen un ejemplo de persistencia ambiental, ya que perduran en los suelos sin degradación significativa hasta 30 años después de ser aplicados. Esa permanencia favorece su incorporación a las cadenas tróficas y la acumulación en los tejidos grasos, tanto en humanos, como en animales. Aunque su uso es limitado desde los años ochenta, en nuestro país aún se detectan en tejidos vivos.

Es igualmente importante, la contaminación producida por los lixiviados de suelos contaminados, hacia las aguas subterráneas. De esta forma, se produce la desaparición de la flora y fauna acuática, la pérdida de agua como recurso utilizable y como consecuencia, el deterioro de nuestra calidad de vida.

En la actualidad mas de 600 compuestos orgánicos, con aproximadamente 50.000 formulaciones son usados en todo el mundo, para el control de diferentes plagas. Europa utiliza anualmente cantidades que están entorno a 350 millones de kilogramos, cantidad similar a las empleadas en Estados Unidos y Asia. Ante esta situa-

ción numerosos países han establecido niveles máximos de fitosanitarios en agua potable, así la legislación española (23) establece para el agua de bebida, niveles entorno a $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$ para un compuesto individual y de $0,5 \mu\text{g L}^{-1}$ para el contenido total, estos valores son muy inferiores a los que se detectan en los lixiviados procedentes de muchos suelos. Lo que pone de manifiesto la importancia del control de estos compuestos en la actividad agraria.

Cualquier compuesto tóxico de naturaleza orgánica una vez liberado en los suelos puede experimentar una o más procesos de transformación en función de la estructura química que presenten. Su mayor afinidad por los ácidos húmicos del suelo determina que es la naturaleza de la materia orgánica quien condiciona su disponibilidad y fito-toxicidad.

Sin duda la toma de decisiones en la gestión de residuos orgánicos es complicada. Por una parte es necesario un mayor rigor en la acción preventiva sobre la utilización de nuevos productos de síntesis, con la aplicación de mejores controles y evaluaciones de las consecuencias de su uso. Por otra parte, parece imprescindible aumentar el conocimiento de las interacciones de estos productos con los constituyentes y organismos del suelo, y su relación con otros medios (agua, atmósfera), con objeto de estudiar los procesos biológicos que incrementan la velocidad de su degradación o inmovilización. También parece lógico evitar la entrada en los suelos de aquellas sustancias estables y de mayores riesgos para los sistemas biológicos. A pesar de ello, en ocasiones, es necesario su utilización por lo que hemos de analizar las distintas consecuencias que pueden provocar. Sin duda la peor es su llegada al agua subterránea o al aire, sus consecuencias no son previsibles, por el contrario su retención en el suelo abre la posibilidad de estudiar las medidas que lleven a encontrar los mecanismos para su degradación.

4.2. Compuestos inorgánicos

Actualmente se piensa que en los países industrializados el grado de toxicidad producido por contaminantes inorgánicos, es superior al producido por la combinación de sustancias orgánicas y las emisiones radioactivas. Dentro de este grupo se incluyen nitratos,

fosfatos, carbonatos-bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, potasio y elementos traza, fundamentalmente metales pesados.

Determinar su procedencia no es fácil en todos los casos, la presencia de una amplia red de elementos contaminantes, hace que se vean implicados muchos de los sectores que constituyen el entramado productivo. La evolución de los mismos, tanto en su forma como en su tamaño, pone de manifiesto una situación dispar. El aumento del transporte por carreteras ha tenido una influencia decisiva en la prevalencia del Plomo, Cobre o Zinc en la atmósfera. Las emisiones de óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y dióxido de azufre se deben fundamentalmente, con porcentajes que superan al 60% del total en el caso de los compuestos de azufre, al sector energético. La producción de fertilizantes inorgánicos, la presencia de metales pesados en la industria automovilística, o la incineración de residuos industriales, son algunos de los sectores implicados en la contaminación atmosférica.

Este tipo de contaminación, asociada a las emisiones tiene una incidencia notable en la acidificación y eutrofización de aguas y suelo, acelerando la degradación de los ecosistemas naturales y atentando directamente a la salud. Presenta además una característica específica, sus efectos suelen ser transfronterizos, ya que pueden ser transportados por el aire a distancias considerables de su fuente productora. Para paliar en lo posible esto, el pasado Septiembre el Parlamento y Consejo Europeo aprobaron un proyecto que pretende establecer una Directiva donde se fijen los límites nacionales de las emisiones.

Su deposición, tanto por vía seca como húmeda, junto a los vertidos directos, son las principales vías de contaminación inorgánica de los suelos. La solución a estos problemas no es fácil, de acuerdo con el informe emitido por la FAO «Agricultura mundial: hacia los años 2015-2030», la persistencia de elementos potencialmente tóxicos en tierras de cultivo en los próximos treinta años seguirá siendo grave (24).

Según dicho informe, los problemas planteados tienen una doble vía, de un lado los producidos como consecuencia de la utilización de fertilizantes minerales en los suelos de cultivo, y de otro, la acu-

mulación de metales procedentes de las actividades industriales y de desarrollo.

Aparece nuevamente el concepto utilitarista del suelo, no podemos negarnos a utilizar los medios que nos ofrece la naturaleza para alcanzar un mayor y mejor desarrollo, pero al mismo tiempo, hemos de arbitrar las medidas que armonicen esa utilización con la conservación.

Es indudable que el aporte de fertilizantes es de crucial importancia para la nutrición vegetal, pero las elevadas tasas de Nitrógeno y Fósforo incorporadas en los suelos, tienen sus consecuencias, pues no son totalmente absorbidos por la vegetación y pueden movilizarse hacia las aguas superficiales y freáticas, provocando problemas de eutrofización y pérdida de potabilidad.

La contribución exacta de las prácticas agrícolas a la eutrofización es difícil de cuantificar, no obstante son numerosos los ejemplos estudiados, la concentración de nitratos en aguas subterráneas de zonas de cultivo, en la Unión Europea, excede el nivel de referencia (10 mg/L) en más del 85%, a pesar de las reducciones en el uso de fertilizantes minerales en estos últimos años. Pero esto no solo pasa en el ámbito rural, los hábitats seminaturales también están amenazados, hasta el punto que más de 370 zonas protegidas se encuentran en peligro de ser afectadas por la utilización de monocultivos exóticos, gasto excesivo de agua o abuso de prácticas agresivas en la preparación del suelo, hechos, todos ellos, que favorecen los procesos de lixiviación y por tanto tienen una incidencia directa en la eutrofización.

Pero los efectos negativos no recaen solo en las aguas, también tienen una repercusión en el suelo y en los seres vivos. Por ejemplo suelos con proporciones elevadas de materia orgánica como son los Histosoles, o suelos saturados en agua con drenaje lento como Fluvisoles y Gleysoles, pueden perder hasta un 70% de los fertilizantes nitrogenados, por procesos de desnitrificación y posterior volatilización en forma de compuestos gaseosos. Su oxidación contribuye a la formación de ácido nítrico, uno de los principales componentes de la lluvia ácida. El aporte posterior de esta lluvia puede provocar, en los suelos, pérdida de nutrientes por lavado y movilización de constituyentes, lo que incide en la menor productividad.

Si el Nitrógeno es un elemento imprescindible para la planta, también lo es el Fósforo, y también tiene una incidencia directa en todos los procesos antes señalados. El Fósforo constituye un macroelemento esencial para la nutrición vegetal, sin embargo, la baja solubilidad de los compuestos fosfatados y su importante capacidad de fijación en los suelos, ha justificado tradicionalmente unas aplicaciones excesivas, que han provocado un incremento de la reserva de Fósforo asimilable en los suelos, con frecuencia muy por encima de los niveles considerados críticos. Esta situación ha hecho aumentar el riesgo ambiental, puesto que, además de contribuir a la eutrofización de las aguas, el exceso de este nutriente ha dado lugar a problemas de toxicidad, causados por la aparición de antagonismos nutritivos, fundamentalmente con Hierro y Cinc.

Otro de los problemas planteados, como indicamos anteriormente, lo constituyen la presencia de metales pesados en los suelos. Para la Organización Mundial de la Salud constituye uno de los principales problemas sanitarios, ya que su existencia, no solo incide en la calidad de los cultivos, si no que afecta a los alimentos, provocando un efecto de bioacumulación en los organismos de la cadena trófica.

El suelo juega un papel esencial en el control de esta contaminación, su acumulación o eliminación determina su toxicidad. La legislación española recoge los contenidos máximos admitidos de estos elementos, tanto en alimentos como en agua, sin embargo aún no está establecida una normativa para los suelos, y únicamente aparecen límites recomendables en suelos a los que se les van a aplicar lodos con finalidad agrícola. Esta norma no hace referencia al tipo de suelo receptor ni a sus características, lo cual supone partir de la hipótesis que cualquier volumen de suelo es adecuado para poder recibir un residuo, lo que evidentemente está muy lejos de ser cierto.

La capacidad de los suelos para incorporar elementos extraños a su composición depende de múltiples factores, unos condicionados por el elemento y otros por las propiedades edáficas.

Contenido en materia orgánica, pH, conductividad o capacidad de intercambio iónico, son parámetros decisivos para controlar la concentración y movilidad de los elementos, y por tanto cuantificar su bio-disponibilidad. Por otra parte, hay que tener en cuenta que no todos los metales presentan el mismo comportamiento. En numero-

sas ocasiones los márgenes entre toxicidad y deficiencia son muy pequeños, por lo que no siempre es posible delimitar claramente que metales son esenciales y cuales son tóxicos. También es difícil considerar la toxicidad de un metal aislado puesto que en el suelo se producen interacciones entre ellos y con los organismos.

Ahora bien, la toxicidad de estos compuestos, no depende sólo de su contenido total, en ocasiones es mucho más importante estudiar su distribución, forma o especie en que se presenta en el suelo. Todos los metales pueden aparecer en formas de baja actividad o formas inmóviles que se relaciona con el predominio de compuestos escasamente solubles, o por el contrario pueden aparecer en especies más solubles. Este hecho se debe a las distintas formas de oxidación que un mismo elemento presenta en la naturaleza. Es el caso de los compuestos de Cromo, que puede estar en el suelo como Cr III o como Cr VI, la primera es mucho más estable, ya que se coordina con ligandos que contienen Oxígeno y Nitrógeno, mientras que las formas de mayor estado de oxidación (Cr VI) son mucho más tóxicas debido a su solubilidad. Esto mismo sucede con el Arsénico en el que las formas reducidas son de cuatro a diez veces más solubles en agua que los estados oxidados.

Un caso que se recoge tradicionalmente en la bibliografía es el descrito por Iimura (25), referente al envenenamiento que se produjo en Japón, por el consumo de arroz que había sido cultivado en suelos con alto contenido en Cadmio. Mientras que con las técnicas tradicionales de cultivo no se producían daños, al mantenerse el suelo en condiciones reductoras durante todo el ciclo productivo, el drenaje temporal realizado para facilitar el laboreo causó un cambio en las condiciones redox y por ello un incremento en la concentración de Cadmio en la disolución. La ingesta del arroz cultivado en estas condiciones provocó en la población una disentería en muchos casos mortal.

Estos ejemplos ponen de manifiesto la gran complejidad de los procesos que tienen lugar en el suelo ante la incorporación de metales pesados, por lo que no cabe duda, que debe seguir profundizándose en el estudio de su comportamiento químico, si queremos evaluar los riesgos potenciales y reales que su presencia supone para el medio ambiente. Es imprescindible ahondar en la relación causa/efecto, para

poder establecer las medidas necesarias que permitan la reducción de riesgos ambientales y su incidencia en la salud humana.

Por ello, la recuperación de suelos contaminados, es uno de los cometidos más importante que se esta llevando acabo en muchos países. La puesta en marcha de una tecnología apropiada entraña una gran dificultad desde el punto de vista medioambiental, debido al elevado número de variables que intervienen y a la complejidad que presenta la movilidad de los contaminantes.

La evaluación de las tecnologías existentes se efectúa por medio de una serie de criterios como son: La adecuación a una situación particular de contaminación, la facilidad de construcción y de operación, el comportamiento del contaminante, los aspectos medioambientales y de salud, la facilidad de obtener los permisos institucionales y por último los costes. Las razones por la que se rechazan las tecnologías se deben a: Las dificultades de implementación, la falta de garantía o de efectividad en los resultados y a los costes excesivos. La gran cantidad de variables que presentan las situaciones reales hace que la tarea de selección sea compleja y, en muchos casos, difícil, por la ausencia de información para decidir si una tecnología puede o no ser rechazada.

Diversas técnicas se están desarrollando en este sentido, desde lavados por métodos físico-químicos, a bioremediación y fitoremediación realizados *in situ*.

Las técnicas *in situ*, implican transformaciones biológicas que afectan a un gran número de contaminantes inorgánicos, fundamentalmente a nitratos, fosfatos y metales pesados. La bioremediación utiliza, entre otros, microorganismos, en general bacterias del suelo con capacidad para eliminar hidrocarburos y otros elementos tóxicos, y la fitoremediación, se basa en el uso de plantas con capacidad para absorber metales pesados. Estos procesos son, generalmente, inocuos para el ser humano y todos los ecosistemas.

Sin embargo, en muchas ocasiones los procesos de biodegradación natural necesitan ser intensificados, ya sea mediante el aporte de dadores de electrones (Grupos metilo, Gupos hidroxilos, Cloruros, Ioduros, entre otros), ya sea por la colocación de pantallas biológicas que prevengan la propagación del contaminante. En estas

ocasiones la intervención de elementos extraños puede tener como consecuencia la aparición de riesgos no previstos.

Los métodos de lavado *ex situ* utilizan ácidos y agentes quelantes, como es el caso del ácido etilendiaminotetracético (EDTA) debido a la intensa capacidad que presenta para formar complejos con los metales, especialmente con Plomo, Cinc, Cobre y Cadmio.

Dentro de estos métodos de desplazamiento, estamos trabajando actualmente en el Departamento en el desarrollo de un sistema experimental de columnas, que ya fue descrito por Adams en 1980 (26) y modificado por Wolt (27). Esta técnica no somete a las muestras a ninguna fuerza física o mecánica, por tanto, los percolados obtenidos están próximos a la solución del suelo inalterada (Figura 3). Cada columna es uniformemente empaquetada con muestras de

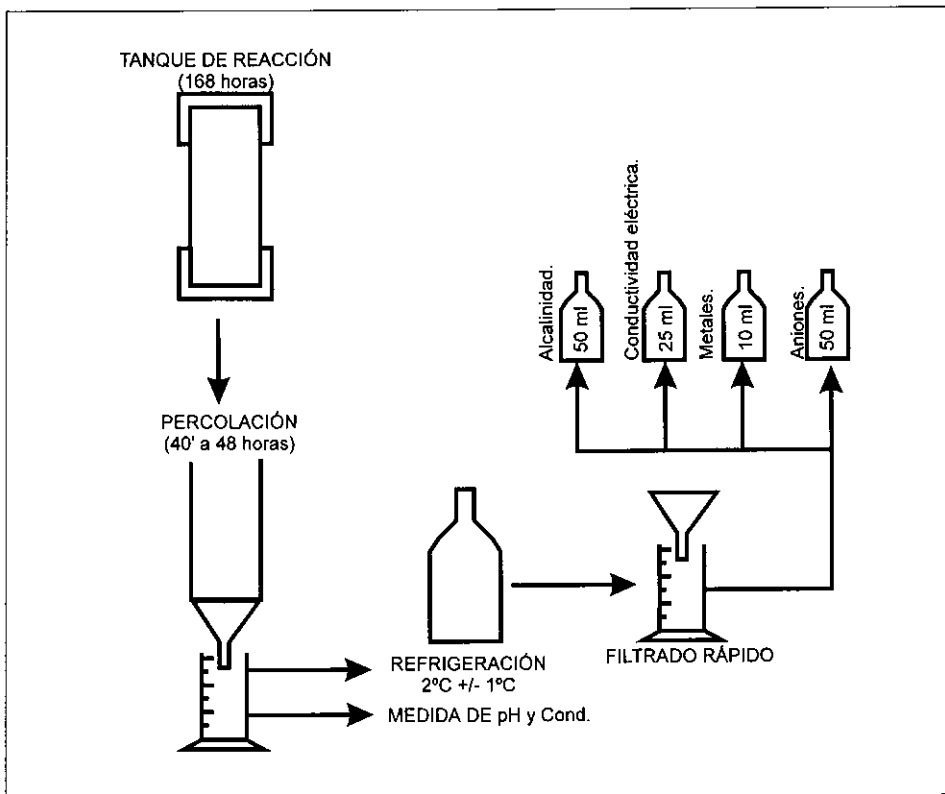


FIGURA 3. Esquema del sistema experimental de columnas y secuencia de trabajo.

suelos, a densidad aparente, y se le añade agua desionizada hasta alcanzar el contenido en humedad, equivalente a la capacidad de campo. Posteriormente, las columnas experimentales son almacenadas en condiciones controladas de temperatura durante, un tiempo de reacción establecido según consideraciones cinéticas como: «*el tiempo necesario para que la solución se equilibre con los minerales mayoritarios del suelo*» (28). La determinación de la composición química de los percolados resultantes, es una fase de vital importancia ante cualquier análisis de recuperación de suelos, ya que el estudio de la solución del suelo, debido a su carácter dinámico, puede proporcionar importante información respecto a la distribución espacial y temporal de contaminantes, así como su movilidad y disponibilidad.

Caracterizada la solución natural hemos procedido a los ensayos de contaminación. Para lo cual añadimos a las columnas una solución de metales pesados con igual concentración de cada metal (350 mg/kg^{-1}) con un tiempo de contacto de 48 horas. De los resultados obtenidos, se desprende que los porcentajes de absorción por el suelo fueron superiores al 90% en todos los casos, siendo el Cr y el Cu los cationes más retenidos y el Cd el catión más móvil (Figura 4). A continuación, sometimos a los suelos a diferentes procesos

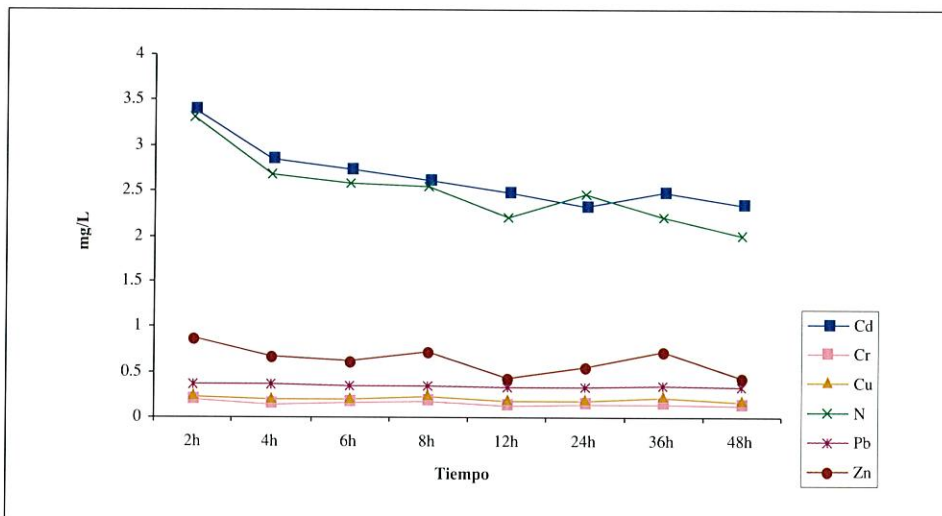


FIGURA 4. Lixiviados de metales.

de lavado sucesivos, a flujo discontinuo, con agua desionizada, simulando procesos de lluvia en climas áridos. Obteniéndose que la secuencia de retención es: Cr > Cu > Pb >> Zn >> Ni > Cd. Esta secuencia permite reconocer que Cr, Cu y Pb son los cationes de metales pesados más fuertemente adsorbidos por todos los suelos, mientras que Zn, Ni y Cd fueron los metales menos retenidos en situación de competencia. Es el Cd el catión que presenta mayor índice de toxicidad, tanto por su naturaleza como por su movilidad.

Actualmente, estamos realizando estudios de recuperación de los suelos previamente contaminados, mediante la aplicación de diferentes extractantes a flujo continuo.

Paralelamente estamos desarrollando técnicas de recuperación mediante la deposición en superficie de matrices poliméricas. Son hidrogeles sintéticos de naturaleza orgánica formados por redes procedentes del entrecruzamiento, tanto químico como físico, de cadenas poliméricas de alto peso molecular, lo que permite que se mantengan en estado sólido a pesar de contener un porcentaje elevado de agua en su estructura. Como propiedad más significativa es su grado de hinchamiento en equilibrio, o cantidad de agua absorbida por gel, de forma que, las sustancias disueltas en el medio pueden incorporarse a la matriz polimérica. Debido a esta propiedad utilizamos los hidrogeles como absorbentes de especies químicas existentes en el suelo, con el fin de que eliminen y retengan contaminantes.

Se realizaron estudios previos de absorción mediante experimentos por inmersión de los hidrogeles seleccionados en un cocktail de metales pesados a igual concentración de 350 mg/L, durante 48 horas. La desorción se realizó mediante inmersión de los geles contaminados en agua destilada (Tabla 3).

TABLA 3. *Comportamiento de los hidrogeles al ser sometidos a procesos de inmersión.*

GEL	COMPORTAMIENTO	PORCENTAJE
1	Absorción	Pb >>> Cr >> Ni > Cu > Cd > Zn 16,4 9,7 5,3 5,0 3,5 3,2
	Desorción	Zn > Cu > Ni > Cd >> Pb > Cr 21,9 16,5 13,1 10,6 4,8 3,2
2	Absorción	Pb >>>> Cr > Zn > Ni > Cu 54,9 19,7 8,5 5,3 4,1
	Desorción	Cu > Ni > Zn > Pb > Cr 3,3 1,9 1,4 1,0 0,2

5. HACIA DÓNDE VA EL FUTURO

Es otra de las preguntas que deberíamos contestarnos para no caer en los mismos errores. Que el suelo es un elemento esencial para el desarrollo de la vida como hoy la entendemos, queda fuera de toda duda, que su destrucción o contaminación es un hecho que debemos impedir, también. Que los países deben tomar conciencia de ello, debería ser objetivo a realizar sin demoras, para lo cual, deberemos planificar mejor su estudio, y dirigir las investigaciones a conseguir un mejor conocimiento del suelo, que nos permita establecer estrategias de control y evaluación de los impactos.

Para el cumplimiento de estos objetivos, es necesario el desarrollo de una tecnología que garantice analíticas adecuadas, el empleo de técnicas de modelización, y el establecimiento de una base de datos georeferenciada a escala apropiada que proporcione información de suelos de forma precisa, armonizada y útil. En consecuencia deberán recibir especial atención, todas aquellas medidas destinadas a mantener y/o mejorar la calidad ambiental.

A diferencia de otros medios, los procesos de contaminación de un suelo no suelen causar efectos perceptibles y explosivos, sino que, durante mucho tiempo, pueden pasar inadvertidos debido a su propia resistencia. Este hecho constituye un grave problema ya que,

cuando se hacen patentes los daños, la recuperación es mucho más costosa, en tiempo y dinero e incluso puede llegar a ser irreversible. Como consecuencia de esta situación, la comunidad científica y los poderes públicos medioambientales y sanitarios, deben trabajar conjuntamente para establecer estrategias específicas que luchen contra la contaminación de los suelos y su repercusión en nuestra calidad de vida.

Así, la Organización Mundial de la Salud en la década de los noventa, propuso como lema de trabajo «Salud para todos en el año 2000» (4). Para lograr esta meta, la OMS seleccionó 12 indicadores globales de salud. La región europea (OMS-EURO) fue una de las pioneras en seguir esta propuesta, al formular 38 objetivos de Salud, de los que 8 se relacionaban con la obtención de un medio ambiente saludable. El objetivo 23 correspondía al Control de Residuos Peligrosos y a La Contaminación de Suelo. Estrategia ambiciosa cuyo objetivo esencial era alcanzar a finales del año 2000 un nivel de salud para todos los habitantes del planeta que les permitiera desarrollar una vida digna. Logro que, evidentemente, no se consiguió.

En nuestro país, es a partir de 1996, cuando aparecen publicadas las primeras monografías sobre Indicadores Ambientales. De todos los indicadores propuestos, destacan, por sus potenciales impactos en salud, la eliminación de residuos peligrosos, en particular los aceites usados y los PBC, sin embargo los objetivos concernientes a Suelos Contaminados son todavía bastante limitados. Esta situación ha sido mejorada por el vigente Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados 1995-2005 (29). En él se pone de manifiesto la gravedad de la situación existente en materia de contaminación de suelos, detectando 4.532 emplazamientos identificados como potencialmente contaminados, por razón del tipo, concentración de contaminantes, y potencial de dispersión de los mismos. Sin embargo, sigue sin fijarse normas específicas que contemplen, entre otros: Estándares de calidad de los suelos en función de su uso. Valores, cualitativos y cuantitativos de riesgo sobre la salud humana e Impactos que producen.

La Sanidad Ambiental del siglo XXI deberá prestar especial atención a las emergencias ambientales, aún asumiendo que el «Ries-

go 0» en esta área es inalcanzable, por ello lo más importante es la estrategia que se debe emplear para conseguir un medio ambiente que favorezca la salud y el bienestar allí donde la gente vive y trabaja. Así, OMS plantea como objetivo para el año 2015 que la población de la Región Europea debe vivir en un ambiente físico más seguro, donde los niveles de contaminantes peligrosos para la salud no excedan los patrones acordados internacionalmente.

Se están realizando en la actualidad programas pilotos que abarcan zonas concretas y aunque existan problemas irresolubles a escala temporal corta, como es el caso de contaminaciones por radionucleidos radiactivos, sólo desde la prevención se podrá realizar una política eficaz de aprovechamiento del recurso «Suelo», por lo que todos los análisis ambientales y sanitarios, todos los Programas específicos de lucha contra la contaminación, así como los Programas de Salud Pública, tanto a nivel local como a nivel mundial, deberán tener en cuenta la edafodiversidad, el estado actual de los suelos, y su vulnerabilidad ante cualquier intervención. De esta manera se podrá integrar lo que es ecológicamente adecuado, con lo que es sanitariamente necesario, para que se obtenga un ambiente físico saludable y seguro, en el que la población mundial alcance y mantenga el nivel más alto de salud a lo largo de su vida.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) HOYOS DE CASTRO, A. (1980) La Edafología como ciencia. El problema de las clasificaciones de suelos. *Monografía Real Academia Nacional de Farmacia*. Madrid. 39 pp.
- (2) GELL-MANN, M. (1995) The Quark and the Jaguar. Aventures in the Simple and the Complex. METATEMA. Tusquets (Ed). Barcelona. 413 pp.
- (3) Agencia Europea de Medio Ambiente. (2001) Señales ambientales 2000. Informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente basado en indicadores. Ed. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medioambiente. 109 pp.
- (4) World Health Organisation Regional Office for Europe. (1991) Targets for Health for All. Summary of the updated edition. Copenhagen. WHO.
- (5) European Commission. (2002) The Sixth Framework Programme. Bruselas
- (6) European Economic Community. 1986. *Directiva relativa a la protección del medio ambiente* y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura, 86/278/EEC, EEC, Bruselas.

- (7) European Communities (1999) Una base de datos de suelos georeferenciada para Europa. EUR 18092. Comité Científico del Buró Europeo de Suelos (Ed). 208 pp. Italia.
- (8) STRHALER, A.N. AND STRHALER, A.H. (1989) Modern Physical Geography. Jhon Wiley & Son (Eds.) 689 pp.
- (9) JACKSON, J. (1986) Salt-Tectonics. Ed Elsevier
- (10) IGME. (1980) Mapa Geológico de España. E.1:50.000. Hoja N1 136, Oña. 10 Ed. IGME, Madrid.
- (11) GONZÁLEZ HUECAS, C.; VALVERDE ASENJO, V.; LÓPEZ LAFUENTE, A. (1999) Chemical and mineralogical characterization of soils derived from ophites in Mediterranean climate (North of Spain). *Commun. Soil Sci. Plant Anal* 30 (13-14), 2007-2021.
- (12) RIVAS MARTÍNEZ, S. (1987) Memoria del mapa de vegetación potencial de España. ICONA, Madrid.
- (13) RASMUSSEN, P.E. y H.P. COLLINS. (1991) Long-term impacts of tillage fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45, 93-134.
- (14) SHOJI, S., NANZYU, M. AND DAHLGREN, R. (1993) Volcanic ash soils- Genesis, properties, and utilization. *Dev. Soil Sci.* 21. Elsevier, Amsterdam.
- (15) TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D.; HAVLIN, J.L. (1993) Soil Fertility and Fertilizers, 5th Ed.; Macmillan Company Ed., New York.
- (16) POUDEL, D.D.; WEST, L.T. (1999). Soil Development and Fertility Characteristics of Volcanic Slope in Mindanao, the Philippines. *Soil Sci. Soc. Am.* 63, 1258-1273.
- (17) URBANO TERRÓN, P. (1992) Tratado de fitotecnia general. Ed. Mundi-Prensa. 21 Ed Madrid. 895 pp.
- (18) YAALON, D. H. y E. GANOR. (1973) The influence of dust on soils during the Quaternar. *Soil Sci.*, 116, 146-155.
- (19) GRAHAM, R.C. y FRANCO-VIZCAÍNO, E. (1992) Soils on igneous and metavolcanic rocks in the Sonoran Desert of Baja California, Mexico. *Geoderma*, 54, 1-21.
- (20) Soil Survey Staff (1994). Keys to soil taxonomy. 6 th Ed. US. Govt. Printing Office, Washington, DC.
- (21) LÓPEZ LAFUENTE, A.; VALVERDE ASENJO, A.; GONZÁLEZ HUECAS, C. (1999). Soils developed in diapiric environment in Mediterranean area: sector North of the Iberian Peninsula. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 30 (78), 1183-1199.
- (22) Ley 10/1998 de 21 de abril. Ley Básica de Residuos Tóxicos. BOE 22 de abril de 1998.
- (23) Real Decreto 1138/1990. Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público. BOE del 20 de Septiembre de 1990.
- (24) www.fao.org. (2003) Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030.
- (25) IMURA, I. CH. (1977) Behavior of contaminants heavy metals in soil plant system. International Seminar on soil Environment and Fertility managements in intensive Agriculture. Tokio. Japan.
- (26) ADAMS, F; BURMESTER, C.; HUE, N. AND LONG, F. (1980) *Soil Sci. Am. J.* 44: 733-735.

- (27) WOLT, D.J. (1994) Soil Solution Chemistry. Applications to Environmental Science and Agriculture; John Wiley & Sons, Eds.; Inc.: New York, 1994; 415 pp.
- (28) APPELLO, C.A.J. AND D. POSTMA. (1994) Geochemistry, Groundwater and Pollution, A.A.N. Balkema, Ed. Rotterdam. 536.
- (29) Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (1995-2005). RCL 1995/1437 y 2155. BOE 23 de marzo de 1996.