

El suelo: integración de componentes minerales y orgánicos

Recibido el 20 de febrero de 2007

JUANA GONZÁLEZ PARRA*

Catedrática de Edafología. Facultad de Farmacia.

Universidad Complutense.

Académica Correspondiente de la Real Academia Nacional de Farmacia

RESUMEN

El objetivo de este artículo es exponer los principios fundamentales de la Ciencia del Suelo, definir el suelo y presentar sus funciones en nuestro Ecosistema. Las propiedades del suelo influyen en cómo funcionan en un ecosistema y cómo puede mejorarse el manejo para proteger el medioambiente y al mismo tiempo producir alimentos para la sociedad.

Un suelo es un cuerpo natural tridimensional constituido por cuatro componentes fundamentales: materia mineral, materia orgánica, aire y agua. Estos componentes interactúan entre ellos determinando la naturaleza de un suelo. Las relativas proporciones de estos componentes influyen en el comportamiento y productividad de los suelos. Un suelo es el producto de dos procesos, uno destructivo y otro de síntesis, y ejemplo de este último es la formación de partículas coloidales (arcilla y humus). En la mayoría de estos coloides predomina la carga electronegativa capaz de atraer iones de carga opuesta. Los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por otros cationes de la solución del suelo (cambio catiónico). Elementos tóxicos así liberados pueden ser absorbidos por las plantas entrando a formar parte de la cadena alimentaria: suelo → planta → animal → hombre.

Se presenta la hipótesis sobre el origen de la vida, los procesos de formación de péptidos sobre las superficies de minerales de la arcilla (montmorillonitas) y el decisivo papel jugado por el Cu(II), como un conjunto de ideas procedentes de Rode, Bujdak, Le Son, entre otros.

* Correspondencia: Departamento de Edafología. Facultad de Farmacia. UCM. Avda. Complutense, s/n. 28040 Madrid. e-mail: jgparra@farm.ucm.es

La capacidad de los suelos para producir alimentos se está degradando y al mismo tiempo el número de personas que necesitan alimentos incrementa, luego el conocimiento de la Ciencia del Suelo es fundamental para encontrar nuevos recursos que hagan frente a la humanidad en el siglo XXI. Será preciso aplicar los principios básicos de la biología, la química y la física con objeto de minimizar la degradación y destrucción de uno de nuestros más importantes recursos naturales.

Palabras clave: Ciencia del suelo.—Arcillas.—Materia orgánica.—Intercambio Catiónico.—Origen de la vida.

ABSTRACT

The soil: Integration of mineral and organic components

The purpose of this article is to explain the fundamental principles of Soil Science, to define the soil, and to present the functions of soils in our Ecosystem. Soil properties influence how soils function in an ecosystem and how they can best be managed to protect the environment and the same time produce food to support society.

A soil is a three dimensional natural body. In fact, the four major components of soil are: mineral matter, organic matter, air and water. These components interact with each other to determine the nature of a soil. The relative proportions of these components greatly influence the behaviour and productivity of soils. A soil is the product of both destructive and synthetic processes. Formations of colloidal particles (clay and humus) are examples of synthesis. For most soil colloids, electronegative charges predominate. These charges attract ions of an opposite charge to the colloidal surfaces. The adsorbed cations are subject to exchange with other cations held in the soil solution (cation exchange). Toxic elements thus released can be absorbed by plants. Toxic elements become part of the food chain: soil→ plant→ animal→ human.

I present the hypothesis for the origin of life, the peptide formation processes on the clay mineral surface (montmorillonites) and the decisive role played by the catalyst Cu(II), as an amalgam of ideas provided by Rode, Bujdak, Le Son and others.

The capacity of soils to produce food is being degraded, even as the number of people needing food is increasing. A fundamental knowledge of Soil Science is a prerequisite to meeting the many natural resource challenges that will face humanity in the 21st century. The basic principles of biology, chemistry and physics can be used to minimize the degradation and destruction of one of our most important natural resources.

Key words: Soil science.—Clays.—Organic Matter.—Cationic Exchange.—Origin of Life.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural tridimensional, situado en la interfase de la litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera (1). En el año 1994, el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos publica una Clave Taxonómica (2) en la que se define el suelo como «el cuerpo natural formado a partir de materiales minerales y orgánicos, que contiene materia viva y que puede soportar vegetación de forma natural. El límite superior es el aire, el límite inferior coincide normalmente con el de la actividad biológica. Está constituido por horizontes próximos a la superficie terrestre, que se diferencian del material rocoso subyacente porque han sido alterados a través del tiempo debido a las interacciones entre clima, relieve, materiales parentales y organismos vivos».

2. ANTECEDENTES DE LA CIENCIA DEL SUELO

En 1924 se crea en Roma la «Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo» (International Society of Soil Science) como denominación más general de una disciplina que había tenido sus comienzos en el año 1883 con Dokuchaev, investigador ruso, marcando el hito inicial de los estudios relacionados con el suelo. Esta Ciencia, desde la década de los treinta, se ha ido desarrollando, según el concepto de suelo a través de los años, en diferentes etapas: agroquímica, geológica, la de química coloidal, el suelo como cuerpo órgano mineral y finalmente la etapa geoquímica.

En España, Huguet del Villar (1871-1951) presidente de la Subcomisión de Suelos Mediterráneos en la 1.^a Asociación Internacional de la Ciencia del Suelo, introdujo el término Edafología (3) en el año 1925 para designar la Ciencia cuyo objeto es el Suelo, definido según este autor como «la película de la corteza terrestre que sirve de medio a la vegetación». Esta película resulta de la actuación de diversos factores: roca, clima, vegetación, microorganismos y el hombre, que actúa más bien como perturbador y destructor. En el año 1944 se inicia la docencia de la Edafología en la licenciatura de Farmacia, debido a una destacada figura en éste campo, José María Albareda, quién había creado en Madrid el Instituto Español de

Edafología, Ecología y Fisiología Vegetal en el seno del CSIC, alcanzando esta disciplina gran relieve.

A partir de 1960 se desarrolló esta Ciencia abordando dos aspectos diferentes, uno concerniente a la producción agrícola, y otro enfocado a problemas ambientales (4). Las relaciones que tiene con la Geología y Biología son evidentes y hoy se la puede considerar como ciencia intermedia entre ellas e íntimamente relacionada con la Bioquímica (5).

Dentro de los grandes hitos en el desarrollo de la Ciencia del Suelo figura la atribución a los minerales de la arcilla de una estructura cristalina puesta de manifiesto por difracción de Rayos X y además, la de ser una importante fuente de carga negativa lo que les confería una determinada capacidad de adsorción. Los trabajos sobre materia orgánica y el conocimiento sobre los mecanismos de interacción de sustancias húmicas con sustancias minerales supuso otro gran hito en el desarrollo de esta Ciencia (6, 7).

A partir de 1980, los avances en técnicas analíticas hacen posible el estudio de las reacciones entre los minerales del suelo y la interfase acuosa, surge así una nueva ciencia multidisciplinar, «la Ciencia Ambiental Molecular» que aborda la distribución de contaminantes en suelos, aguas y atmósfera. Se abren perspectivas nuevas en el área ambiental, por ejemplo: mecanismos de sorción/desorción de contaminantes, problemas de toxicidad e impacto sobre la salud humana (8-10).

Existen múltiples funciones que los suelos ejercen en la sociedad y en el hombre, entre las que figuran: **El suelo como productor y transformador de biomasa. Como hábitat para la Biota. El suelo como Geomembrana y su papel como: Reactor, Filtro y Tampón** no sólo para nutrientes, sino también para pesticidas, herbicidas y otros contaminantes. Representa el eslabón con la litosfera, hidrosfera y atmósfera. **El papel del suelo en el ciclo global de carbono.**

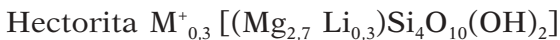
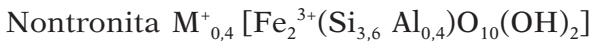
3. COMPONENTES DEL SUELO

3.1. Componentes minerales

La fracción mineral que presenta mayor actividad desde el punto de vista químico es la fracción arcilla, es la de menor tamaño y se caracteriza por tener propiedades coloidales. Los minerales fundamentales de la arcilla corresponden a silicatos laminares: Filosilicatos. Estos minerales están formados por pequeñas partículas constituidas por capas de tetraedros y octaedros. La fórmula estructural que presenta una capa tetraédrica es: $\text{Si}_2\text{O}_5\text{OH}^{3-}$.

Los octaedros pueden llevar en su interior iones Al^{3+} o Mg^{2+} . Si es el aluminio el que ocupa estas posiciones el **mineral es dioctaédrico**, si es magnesio, el **mineral es trioctaédrico**. Los filosilicatos pueden estar constituidos por estructuras 2:1 (dos capas tetraédricas y una octaédrica), 1:1 (una capa tetraédrica y una octaédrica) y 2:1:1 (dos capas tetraédricas y dos octaédricas). Como minerales 2:1 con carga cero están la **Pirofilita** (dioctaédrica) ($\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2$) y el **Talco** (trioctaédrico) ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{OH}_2$) (11).

Los átomos de silicio pueden ser parcialmente sustituidos por Al^{3+} , lo que confiere **carga negativa permanente** a la estructura, cuya cuantía dependerá de la sustitución, formándose así nuevos minerales (12). Entre los minerales filosilicatos con estructura 2:1 están las **micas** (di y trioctaédricas con carga -1), **ilitas** (dioctaédricas con carga -0,8), **vermiculitas** (di y trioctaédricas con carga -0,67) y **esmeclitas** (di y trioctaédricas con carga -0,33) (Figura 1). **Entre las esmeclitas dioctaédricas está la montmorillonita**, cuya sustitución isomórfica es en la capa octaédrica (Al por Mg), **entre las trioctaédricas está la hectorita**, con sustitución parcial de Mg por Li en la capa octaédrica (13).



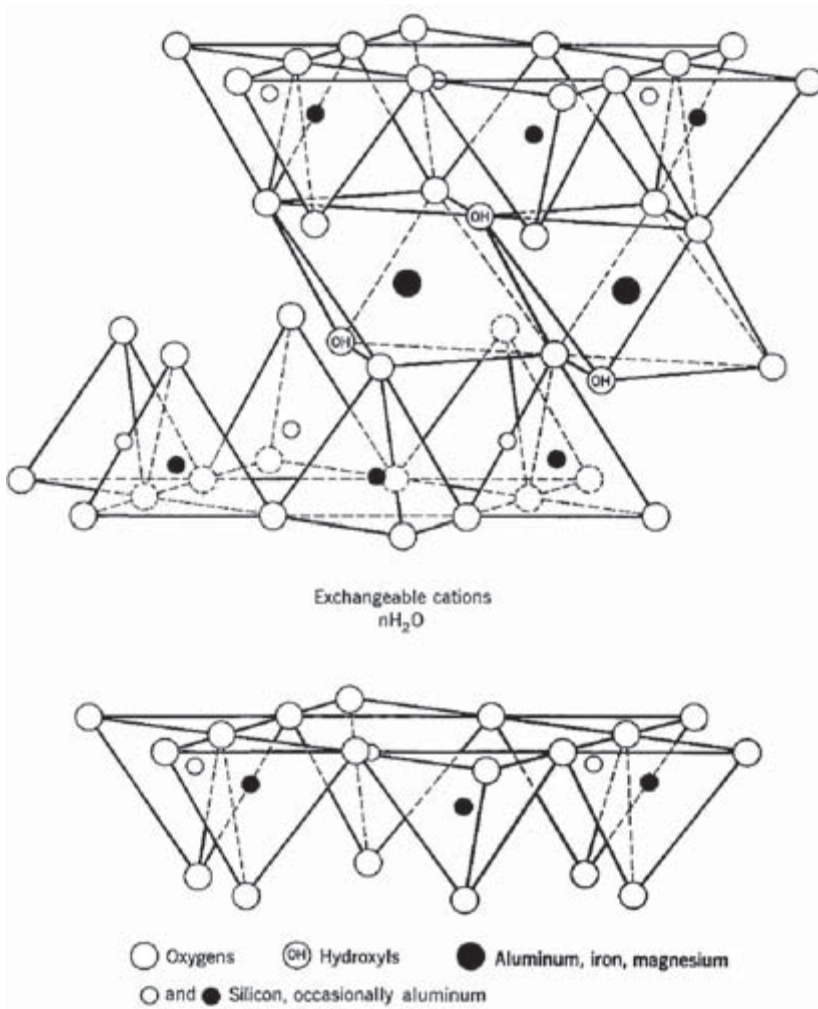


FIGURA 1. *Esquema estructural de un mineral 2:1 (Esmectita).*

Los minerales de estructura 1:1 presentan **carga variable o dependiente del pH**, debido a grupos funcionales SiOH y AlOH que se originan como consecuencia de roturas de bordes en estas estructuras. Entre estos minerales están la **haloisita**, **caolinita** (dioctaédrica) (Figura 2) y **antigorita** (trioctaédrica). A los minerales con estructura 2:1:1 pertenecen las **cloritas**.

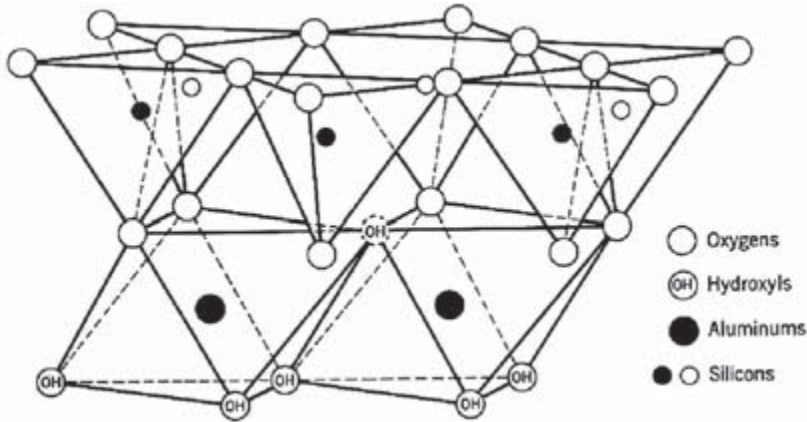


FIGURA 2. *Esquema estructural de un mineral 1:1 (Caolinita).*

Los minerales fibrosos tipo **paligorskita** (atapulgita) y **sepiolita** presentan una estructura en bandas o cadenas y se caracterizan por la existencia de canales (paralelos a estas cadenas) en los que se sitúan moléculas de agua.

Los minerales de la arcilla contribuyen a una de las propiedades fundamentales de los suelos, **la capacidad de intercambio catiónico** (14). Los cationes debido a su carga positiva son atraídos a las cargas negativas (permanentes o variables) de los filosilicatos formando parte del **complejo adsorbente del suelo**. Estos cationes pueden estar hidratados y son factibles de intercambiarse con otros de la solución externa. Por otra parte estos minerales pueden actuar en reacciones de adsorción de pesticidas, impidiendo su degradación, disminuyendo con ello tanto su disponibilidad frente al ataque microbiano, como su concentración en la solución del suelo (15).

3.2. Componentes orgánicos

La fracción orgánica está constituida por todas aquellas sustancias que contienen carbono orgánico, y comprende restos de plantas sin descomponer (hojas, raíces, etc.), residuos microbianos y sustancias muy polimerizadas como productos estables de degradación y síntesis.

La materia orgánica del suelo se puede dividir en: **sustancias no húmicas y sustancias húmicas**. Las primeras incluyen carbohidratos, proteínas, aminoácidos, aminas, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, lignina, alcaloides, antibióticos, auxinas, vitaminas, enzimas y lípidos (grasas, resinas, aceites, etc.). Las sustancias húmicas están constituidas por compuestos de naturaleza ácida y de elevado peso molecular y se han formado por reacciones de síntesis: **ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, húmicas y ácidos himatomelánicos** (6, 16).

La estructura de estas macromoléculas se puede describir como un núcleo central o matriz rica en unidades hidroxiquinónicas. Sobre este núcleo se fijan cadenas proteicas o polipeptídicas a través de grupos alfa-aminados de aminoácidos. Las macromoléculas de elevado peso molecular o ácidos húmicos presentan un núcleo de mayor tamaño y cadenas más cortas que la de peso molecular más bajo que corresponden a ácidos fúlvicos (17).

Los ácidos fúlvicos y ácidos húmicos presentan marcadas diferencias tanto en composición como en propiedades: Los ácidos húmicos se caracterizan por mayor polimerización, mayor contenido en C, N, grupos OH fenólicos, elevada capacidad de intercambio catiónico y mayor capacidad de unión con la arcilla. Los ácidos fúlvicos presentan mayor contenido en O, en grupos $-\text{COOH}$ y $-\text{OCH}_3$, incremento de la acidez y mayor posibilidad de formar quelatos (18).

Los compuestos húmicos influyen en: El **color oscuro** de los suelos. En la **retención de agua**. En la **capacidad de cambio catiónico**, muy superior a la que presentan los minerales de la arcilla. En la fracción orgánica, las cargas negativas proceden de la ionización de grupos $-\text{COOH}$ y en menor medida de grupos $-\text{OH}$ fenólicos, la carga por consiguiente es dependiente del pH. También influyen en la formación de agregados debido a la **capacidad de unión a minerales de la arcilla**. En la **posibilidad de quelación**, formando complejos solubles estables con micronutrientes facilitando su disponibilidad, o con elementos tóxicos, haciendo accesible su transferencia a otros compartimentos como agua y cadena trófica. En la **acción tampón**, ayudando a mantener la reacción uniforme del suelo, impidiendo los cambios bruscos de pH. En la **mineralización**, la materia orgánica es la principal fuente de nutrientes, su descomposición da lugar a CO_2 ,

NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} y SO_4^{2-} . La mineralización está frenada cuando los compuestos húmicos están formando agregados. Los compuestos húmicos pueden **combinarse con otras moléculas orgánicas** afectando a la persistencia y biodegradación de pesticidas (6).

3.3. Reacciones de la materia orgánica del suelo con iones metálicos

Los componentes del humus (ácidos fúlvicos y ácidos húmicos) son **capaces de formar con metales, complejos que pueden ser, solubles o quelatos e insolubles**. Los ácidos fúlvicos presentan gran capacidad para formar complejos, siendo más solubles que los formados por ácidos húmicos, debido a la mayor acidez y menor peso molecular. **Los complejos órgano metálicos ejercen en los suelos los siguientes efectos** (6):

- Determinan la transferencia de metales a otros compartimentos, como aguas naturales.
- La formación de complejos con Fe y Al mantienen solubles a estos elementos a valores de pH a los que estarían precipitados.
- Influyen en la disponibilidad de micronutrientes en el suelo. Existirá inmovilización de micronutrientes si el complejo es insoluble.
- Ante una elevada concentración de un metal en suelo, la formación de complejos de baja solubilidad reduce los posibles efectos de toxicidad.
- Las reacciones de quelación juegan un importante papel en la alteración química de las rocas y minerales. Los líquenes así como bacterias y hongos contribuyen a la desintegración de rocas al producir agentes quelantes orgánicos.

Los componentes orgánicos pueden reaccionar con los minerales de la fracción arcilla dando agregados arcillo-húmicos, que mejoran la estructura del suelo y condicionan su estabilidad frente a procesos erosivos.

4. PAPEL DE LOS MINERALES DE LA ARCILLA EN EL ORIGEN DE LA VIDA

4.1. Fundamentos geoquímicos

La geoquímica moderna asume que las condiciones existentes hace 3.900 millones de años dieron lugar a la primera masa sólida formada por enfriamiento del magma, al mismo tiempo la actividad volcánica originaba los componentes de la atmósfera de la primitiva Tierra: CO₂, N, agua, dióxido de azufre y pequeñas proporciones de O₂. El posterior enfriamiento hasta una temperatura inferior a 100° C condujo a la condensación de agua a partir de esta atmósfera. Las temperaturas que prevalecieron eran próximas al punto de ebullición del agua, alternando procesos de evaporación/condensación, que podían haber conducido a descargas eléctricas. Se ha demostrado que tal mezcla de gases produce aminoácidos cuando se expone a descargas eléctricas originadas por luz ultravioleta o radiaciones cósmicas (19).

Las primeras trazas de bioactividad se han encontrado en rocas de 3.800 millones de años de antigüedad. Por otro lado, los primeros restos fósiles con estructura de célula se localizaron en minerales y se han datado con una antigüedad de 3.500 millones de años. Se tiene que asumir que sólo 100 a 400 millones de años fueron necesarios para que la evolución química produjera la primera estructura monocelular a partir de componentes simples inorgánicos. Los primeros organismos multicelulares no se observaron hasta 1.500 millones de años más tarde.

Cairns-Smith y Hartman (20) participantes del Grupo de trabajo «Arcillas y el Origen de la Vida», celebrado en Glasgow en 1983, sugirieron cómo las arcillas podían haber sido el origen de la vida sobre la Tierra. Esta teoría se basa en la estructura y modo de formación de estos minerales, considerados tanto productos de síntesis como de degradación o desintegración de rocas.

Las condiciones necesarias para la formación de arcillas llevadas a cabo en laboratorio coinciden con las de la naturaleza, así en medios con limitado contenido en oxígeno se forman minerales de arcilla ricos en hierro. La primitiva atmósfera Precámbrica era rica en dióxido de carbono, nitrógeno y agua, en contraste con la atmós-

fera de hoy, rica en oxígeno. En estas condiciones se pudieron formar Montmorillonitas con Fe y Nontronitas, tanto en medios lacustres y marinos como continentales.

4.2. Interacciones de los componentes del suelo

Más del 90% del N de los horizontes superficiales del suelo está en forma orgánica, y el 50% de este N está como aminoácidos procedentes de proteínas.

Las proteínas contienen una serie de grupos funcionales que pueden asociarse a las superficies de los minerales de la arcilla (21). Estos minerales presentan carga neta negativa que está neutralizada por cationes cambiabiles como Ca^{2+} y Mg^{2+} . Estos cationes y fundamentalmente el Na^+ ejercen un gran papel en la adsorción de proteínas por arcillas tipo esmectitas. La esmectita-Na puede intercalar proteína entre sus láminas. Se debe a la capacidad de adsorber agua por tratarse de un catión con gran capacidad de hidratación, por lo que resulta un mineral más hinchable, y por lo tanto más accesible a la entrada de grandes moléculas, como las proteínas. En el suelo es más difícil la formación de complejos esmectita-proteína interlaminares y se debe al predominio de iones calcio, siendo fácil sin embargo el acceso a la superficie externa mineral. Las proteínas son también adsorbidas en superficie por otros minerales, como vermiculitas, illitas, y caolinita, pero siempre en proporciones más bajas que en esmectitas.

Se ha observado la adsorción de aminoácidos sobre la superficie de arcillas como montmorillonitas, en solución acuosa a $\text{pH} = 7,5$, condiciones de un océano primitivo. Los cationes de las posiciones de cambio de estos minerales influyen en este proceso de adsorción (22). También la asociación de moléculas orgánicas a los grupos funcionales (SiOH y AlOH), procedentes de roturas de bordes de arcillas, pueden haber sido importantes en la química prebiótica.

4.3. Péptidos y el origen de la vida

La aparición de la vida sobre la Tierra debía ser considerada como un fenómeno inseparable, según Oparin (23), de la evolución general de nuestro planeta, aunque no se pueda reproducir artificialmente el conjunto de esta evolución. En base a los avances en conocimientos sobre geología, astronomía, biología, física y química, cuestiones relacionadas con el origen de la vida, han tomado un nuevo impulso (24). La hipótesis de la existencia de un «caldo primigenio» conteniendo todos aquellos principios químicos necesarios para la formación de biomoléculas de complejidad creciente, que finalmente darían lugar a organismos vivos, ha sido la base para reconstruir las condiciones que debería cumplir el escenario donde se formasen macromoléculas (especialmente proteínas y ácidos nucleicos), a partir de moléculas simples.

Para la mayor parte de los científicos, la vida tiene su origen en la capacidad de ciertas moléculas para autorreplicarse. Miller, basándose en las ideas de Urey (25), demostró que los aminoácidos se podían formar a partir de una atmósfera con metano, hidrógeno, amonio, agua y algún otro componente simple, bajo la influencia de descargas eléctricas y calor, lo que se podía asemejar a la «química prebiótica».

Los experimentos de Miller se repitieron bajo diferentes condiciones (distinta composición de la atmósfera, radiación ultravioleta, y otras fuentes de energía), llegando a otras moléculas precursoras como azúcares y bases nucleicas.

En las condiciones ambientales existentes al principio de la evolución química se formarían en primer lugar péptidos a partir de aminoácidos. Para explicar la evolución química de los péptidos se propuso una **catálisis mineral y reacciones de condensación** (24).

Catálisis mineral

Se define catálisis al proceso que acelera una reacción química específica hacia el equilibrio a través de una sustancia, la cual no experimenta ningún cambio químico durante el proceso. Las super-

ficies minerales pueden jugar un gran papel como catalizadores especialmente aquellos de tipo arcilla, los cuales han pertenecido a los primeros minerales formados (26-28). La actividad catalítica depende de la estructura mineral, de su química y de la reactividad de superficie.

La formación de péptidos catalizada por arcillas es una compleja combinación de varias reacciones: dimerización de aminoácidos, formación de anhídridos cíclicos y prolongación de las cadenas peptídicas.

La mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo con glicina y esmectitas (Figuras 3 y 4), poniéndose de manifiesto que la eficiencia catalítica depende de la composición de la esmectita, de la localización de la carga y del tipo de cationes intercambiables que presenta la estructura (29).

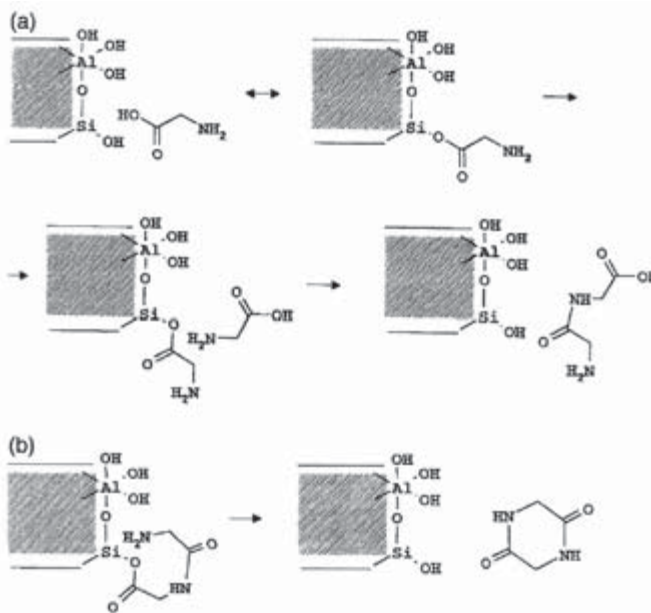


FIGURA 3. (a) Esquema de la activación de glicina en borde de una partícula de arcilla dando lugar a la formación de diglicina. (b) Esquema de la formación de dicetopiperazina (DKP) a partir de diglicina activada en borde de partícula de arcilla. Según Bujdák y Rode (30).

Bujdák y Rode (30) han trabajado con diversos tipos de minerales de arcilla para comprobar su efecto catalítico. Estudiando estos procesos con esmectitas di y trioctaédricas pudieron observar que los mejores resultados se obtuvieron con arcillas trioctaédricas, fundamentalmente con hectorita. Era dos veces menor la eficiencia obtenida con montmorillonita (esmectita dioctaédrica) y con arcillas fibrosas, atapulgita y sepiolita. La hectorita y montmorillonita se caracterizan por la distinta actividad, que puede interpretarse porque las uniones Mg-O y Li-O en la hectoria son muy polares y se facilita la orientación del aminoácido. El menor efecto catalítico fue observado con caolinita (estructura 1:1, dioctaédrica) (31).

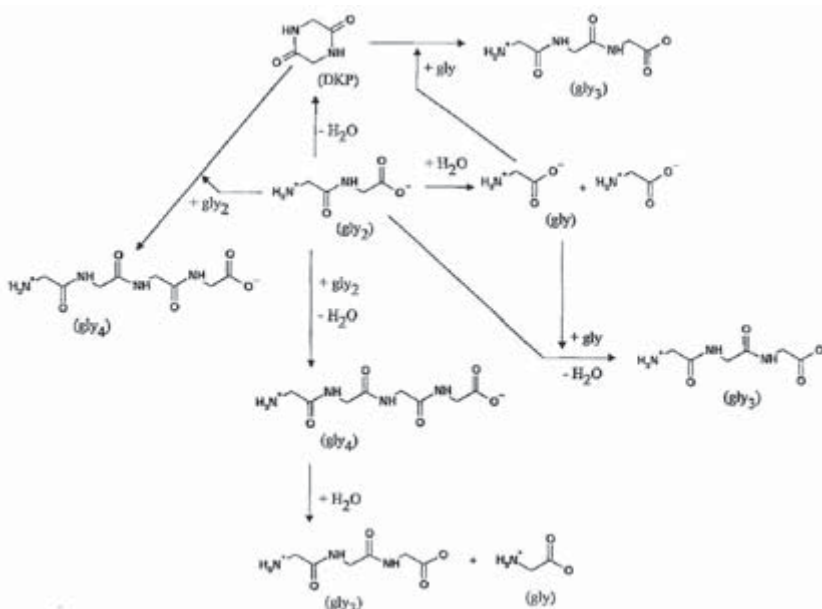


FIGURA 4. *Mecanismos de las principales reacciones que tienen lugar a partir de dicetopiperazina (DKP) y glicina (gly).* Según Bujdák y Rode (30).

Los minerales de la arcilla no sólo pueden catalizar la formación de péptidos a partir de aminoácidos, sino que además los protegen de procesos hidrolíticos estabilizando los compuestos formados. El mecanismo de reacción se basa en el poder de adsorción que presen-

tan en superficie los minerales silicatados y en la existencia de grupos Si-OH y Al-OH en estos minerales, como consecuencia de roturas de bordes, que pueden reaccionar con aminoácidos, de ahí su posible papel en la química de péptidos prebióticos.

Minerales fibrosos como atapulgita y sepiolita no se hinchan con el agua, pero los canales de su interior, igual que en las zeolitas, pueden adsorber agua y pequeñas moléculas de aminoácidos. Los grupos activos Si-OH están localizados en el interior de los canales debido a imperfecciones y roturas en las capas tetraédricas.

Se puso de manifiesto el efecto del pH en la formación de diglicina, observando un significativo incremento en soluciones a $\text{pH} > 7$. Una ligera acidificación disminuía la formación de uniones peptídicas. Experiencias realizadas con alanina en suspensiones de arcilla confirmaron menor reactividad que la glicina. Entre los minerales ensayados figuraba la hectorita como el más efectivo, seguido por talco, montmorillonita y en último lugar cloritas y vermiculitas. Ningún efecto se obtenía con caolinita y pirofilita (30).

Reactivos de condensación

Se ha investigado la capacidad del NaCl para actuar como agente de condensación en la formación de péptidos a partir de aminoácidos y la de iones metálicos divalentes incluyendo alcalino térreos y metales de transición. Un papel decisivo lo juega el Cu(II) como catalizador de glicina y alanina (32).

Esta reacción se denomina: Formación de péptidos inducida por sales, «Salt Induced Peptide Formation» (SIPF), representa el camino más simple para obtener péptidos en solución acuosa. Se requieren: Sistemas conteniendo aminoácidos, NaCl y una pequeña cantidad de CuCl_2 a temperatura aproximada a 80°C (33).

La pregunta es: ¿existían en los comienzos de la Tierra todos los ingredientes para esta reacción? Los aminoácidos se habrían formado en procesos atmosféricos, el cloruro sódico estaba presente en océanos y lagos y en las formaciones de rocas precámbricas se acumulaban minerales de Cu (32). La presencia de cobre en estado divalente era posible dado el contenido en oxígeno existente, según estimacio-

nes, en la atmósfera secundaria de la primitiva Tierra, capaz de transformar el Cu monovalente en Cu divalente. Las temperaturas entre 80-100° C son comunes en procesos de enfriamiento de la Tierra después de la primera formación de una hidrosfera, luego las condiciones ambientales existentes eran propicias al desarrollo de la reacción SIPF. Como resultado se obtenía que los alfa aminoácidos intervienen preferentemente en la formación de péptidos.

Rode y Suwannachot (32) llegaron a la conclusión que la reacción SIPF era la responsable de la producción de los primeros péptidos en la primitiva Tierra. Estos autores compararon y vieron la analogía entre los péptidos así formados y los encontrados en las proteínas de las membranas de los más viejos organismos vivos, las arqueobacterias. Se utilizó la glicina y alanina en presencia de montmorillonita-Ca y hectorita (33) para ver si la reacción (SIPF) y la síntesis peptídica catalizada por arcillas podían tener lugar simultáneamente bajo las condiciones primitivas de la Tierra. Los resultados mostraron que estas dos reacciones eran compatibles y por lo tanto era posible que pudieran darse juntas.

4.4. Otros minerales que actúan como agentes catalíticos

Muchos son los ejemplos en los que minerales intervienen como agentes catalíticos de diversas reacciones. La reducción de CO₂ a ácido fórmico se considera de gran interés en el origen de la vida sobre la Tierra. Esta reacción se ha llevado a cabo sobre esfalerita (ZnS) iluminando con luz UV para excitar al mineral. La hipótesis de que las primeras moléculas orgánicas para la vida se formaron por reacciones entre compuestos simples (agua, CO, CO₂) y superficies de sulfuros metálicos, como pirita, ha merecido gran atención en los últimos años (34). El N se puede reducir a amonio sobre ilmenita (FeTiO₃), anatasa (TiO₂) y esfalerita (ZnS).

5. OBJETIVOS ACTUALES DE LA CIENCIA DEL SUELO

La Ciencia del Suelo ha contribuido a través de su historia a la calidad de vida del hombre y ha aumentado nuestro conocimiento

acerca del manejo del recurso suelo en la obtención de alimentos. El incremento de la población en el mundo ha llevado a la necesidad de aumentar la producción, poniendo en cultivo gran extensión de tierras vírgenes y teniendo que aportar enmiendas, fertilizantes y pesticidas para suplir estas necesidades, lo que ha conducido a su deterioro, con pérdida de la multifuncionalidad del suelo. La consecuencia es un nuevo reto que busca el balance entre la demanda humana, el servicio del ecosistema y su integridad. Estos cambios han llevado a nuevas áreas de investigación, como calidad del suelo, desarrollo sostenible y recuperación de suelos contaminados, sin que se abandone su tradicional papel como soporte de la agricultura.

5.1. Contaminación de suelos

Se puede decir que existen muy pocos lugares en la tierra que estén libres de contaminación originada por actividades industriales. El uso en gran escala de pesticidas, lodos y fertilizantes en agricultura, que contienen metales pesados, ha conducido a la contaminación de suelos y de aguas.

Grandes esfuerzos se han realizado y muchas investigaciones son necesarias para conocer los factores que determinan la disponibilidad en el suelo de estos contaminantes y su transporte a otros compartimentos del ecosistema.

En 2005 se publica un Real Decreto por el que se establecen los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados (35) y se señala como obligatorio para cada Comunidad establecer valores de referencia para sus suelos. El comportamiento de los suelos frente al aporte de metales ha constituido otro de los objetivos llevados a cabo mediante experiencias en laboratorio, utilizando soluciones contaminantes de metales a diferentes concentraciones para determinar la Carga Crítica del suelo. Se ha analizado el papel que ejercen en la movilidad y disponibilidad de metales los minerales de la arcilla, óxidos de hierro y materia orgánica (36, 37).

5.2. Papel del suelo en el ciclo del carbono

El suelo constituye un reservorio de carbono, aproximadamente el 75% del C terrestre se encuentra en suelos, tanto en formas minerales (calcita y dolomita) relativamente estables, como en forma orgánica, constituyendo la materia orgánica la más importante reserva de C orgánico terrestre. En ciertas circunstancias, la fracción más lábil de carbono del suelo puede volatilizarse, pasando a dióxido de carbono o metano, dependiendo de los procesos de oxidación o reducción dentro del suelo. Cuando estos gases se emiten a la atmósfera contribuyen al denominado «efecto invernadero». Si bien el suelo, como sistema complejo variable, puede actuar como fuente o sumidero de gases carbonosos, va a depender su comportamiento del uso y manejo que de él haga el hombre. Por transformación de áreas con cubierta vegetal natural en zonas de cultivo la biomasa vegetativa se oxida y se convierte en CO₂; es fundamental el efecto originado por incendios forestales.

El secuestro de C por el suelo implica la fijación en forma de materia orgánica, del CO₂ tomado de la atmósfera, por las plantas (38). El contenido en arcilla controla la dinámica del C en el suelo, frenando el proceso de mineralización.

Sin embargo, el incremento de CO₂ en la atmósfera, consecuencia de actividades industriales, es lo que puede llevar al calentamiento global de la Tierra. Las estrategias que puedan conducir a mejorar este problema tienen gran significación a nivel global, ya que se desconoce la capacidad máxima de los ecosistemas para el secuestro de carbono. Las vías que proponen Mermut y Eswaran (39) son:

- a) Protección de aquellos ecosistemas capaces de retener carbono.
- b) Manipulaciones en los ecosistemas para incrementar el secuestro de carbono.

5.3. Degradación del suelo por causas físicas

Desde 1972, fecha en que se celebró en Estocolmo la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Hombre, para marcar

estrategias sobre manejo sostenible del suelo, con el fin de controlar la degradación, han sido muchas las conferencias que se han celebrado con este objetivo, entre las que se pueden destacar la de Río de Janeiro, sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992; la Convención de Naciones Unidas para Combatir la Desertificación en 1994, y la Convención sobre Cambio Climático en 1995.

El Centro Internacional de Información y Referencia del Suelo (ISRIC) en colaboración con FAO, ha elaborado el Mapa Mundial de degradación del suelo inducida por el hombre (40). Se identifican los siguientes tipos de intervención humana:

- a) Desforestación y pérdida de vegetación natural por incendios forestales.
- b) Sobrepastoreo por ganado.
- c) Uso inadecuado de tierras de cultivo.
- d) Sobreexplotación de la cubierta vegetal para uso doméstico.
- e) Actividades industriales que conducen a contaminación química de los suelos.

Según este Mapa Mundial, 1.964 millones de hectáreas de suelos agrícolas a nivel mundial están degradadas.

6. CONSIDERACIONES FINALES

La Ciencia del Suelo constituye una disciplina esencial para el nuevo milenio. Los importantes problemas ambientales que han tenido lugar durante las últimas décadas han contribuido a que se reconozca al suelo como el medio terrestre más complejo aún que el aire o el agua, cuya capacidad de almacenamiento de productos de deshecho de una sociedad industrializada y urbanizada, no es ilimitada. La Ciencia del Suelo en su desarrollo en el futuro tendrá que incluir aspectos relacionados con cambios climáticos globales, con el manejo de suelos en países en desarrollo, de suelos urbanos y en colaboración con otras Ciencias tendrá que responder a las demandas de la sociedad. Corresponde a los científicos del suelo jugar un importante papel demostrando el valor de esta Ciencia tanto en aspectos ambientales como en los relacionados con la salud humana.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) BRADY, N. C. y WEIL, R. R. (1999): The nature and properties of Soils. Prentice-Hall, Inc. USA.
- (2) SOIL SURVEY STAFF (1994): Keys to Soil Taxonomy. Soil Conservation Service. United States Department of Agriculture.
- (3) MARTÍ HENNEBERG, J. (1983): Geo-Edafología por Huguet del Villar. Geocrítica. Universitat Barcelona.
- (4) YAALON, D. H. y ARNOLD, R. W. (2000): Attitudes toward soils and their societal relevance: Then and now. *Soil Sci.* 165: 5-12.
- (5) KRUPENIKOV, I. A. (1993): History of Soil Science. Russian Translations Series 98. Balkema. A. A. (Ed.) Rotterdam.
- (6) STEVENSON, F. J. (1982): Humus chemistry. Wiley, New York.
- (7) SCHNITZER, M. (2000): A lifetime perspective on the chemistry of soil organic matter. *Adv. Agron.* 68: 1-58.
- (8) PEPPER, I. L. (2000): Environmental Science: A new opportunity for Soil Science. *Soil Sci.* 165: 41-46.
- (9) SPARKS, D. L. (2001): Elucidating the fundamental chemistry of soils: past and recent achievements and future frontiers. *Geoderma.* 100: 303-319.
- (10) VAN BAREN, H.; HARTMINK, A. E. y TINKER, P. B. (2000): 75 years The International Society of Soil Science. *Geoderma.* 96: 1-18.
- (11) GRIM, R. E. (1968): Clay Mineralogy. Mc Graw-Hill, New York.
- (12) BRADY, N. C. (1990): The Nature and properties of soils, Macmillan, New York.
- (13) NEMECZ, E. (1981): Clay Minerals. Akadémiai Kiado, Budapest.
- (14) SPOSITO, G. (2000): Ion exchange phenomena. En: *Handbook of Soil Science* [Sumner, M. E., (Ed.)], pp. 241-264. CRC Press, Boca Raton, FL.
- (15) HUANG, P. M.; SENESI, N. y BUFFLE, J. (1998): Structure and Surface Reactions of Soil Particles. IUPAC Series on Analytical and Physical Chemistry on Environmental Systems 4. John Wiley and Sons.
- (16) GREENLAND, D. J. y HAYES, M. H. B. (1978): The Chemistry of Soil Constituents, John Wiley and Sons, Chichester.
- (17) ANDREUX, F. (1987): Génesis y propiedades de las moléculas húmicas. En: *Edafología 2. Constituyentes y propiedades del suelo* (Bonneau, M. and Souchier, B., Eds.). Masson.
- (18) GIESEKING, J. E. (1975): Soil Components. VI. Organic Components. Springer-Verlag.
- (19) HANIC, F. y MORVOVA, M. (1998): Eleventh Symposium on Elementary Processes and Chemical Reactions in Low Temperature Plasma. Low Tatras, Slovakia.
- (20) CAIRNS-SMITH, A. G. y HARTMAN, H. (1988): Clay Minerals and the Origin of Life. Cambridge Univ. Press. UK.
- (21) BOYD, S. A. y MORTLAND, M. M. (1990): Enzyme Interactions with Clays and Clay-organic matter Complexes. En: *Soil Biochemistry* (Bollag, J. M. and Stotzky, G., Eds.), 6: 1-28. Marcel Dekker, Inc.

- (22) LAWLESS, J. G. (1988): Clay-organic interactions and the origin of life. En: *Clay Minerals and the Origin of Life* (Cairns-Smith, A. G. and Hartman, H., Eds.). Cambridge Univ. Press. UK.
- (23) OPARIN, A. I. (1965): L'origine de la vie sur la Terre (Gavaudan, P. and Guyot, M., Eds.). Masson y Cie.
- (24) RODE, M. B. (1999): Peptides and the origin of life. *Peptides*. 20: 773-786.
- (25) UREY, H. C. (1952): The planets. New Haven, CT: Yale University Press.
- (26) CAIRNS-SMITH, A. G. (1971): The life puzzle. Toronto. University of Toronto Press.
- (27) FERRIS, J. P.; HILL, A. R. J.; LIU, R. y ORGEL, L. E. (1996): Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces. *Nature*. 381: 59-61.
- (28) HELLER-KALLAI, L.; GOLDSTEIN, T. P. y NAVROTSKY, A. (1996): Active components in clay condensates and extracts as potential geocatalysts. *Clays Clay Miner.* 44: 393-397.
- (29) BUJDAK, J.; LE SON, H. y RODE, B. (1996): Montmorillonite catalyzed peptide bond formation: The effect of exchangeable cations. *J. Inorg. Biochem.* 63: 119-124.
- (30) BUJDAK, J. y RODE, B. M. (1999): The effect of clay structure on peptide bond formation catalysis. *J. Mol. Catal. A Chem.* 144: 129-136.
- (31) BUJDAK, J.; EDER, A.; YONGYAI, Y.; FAYBÍKOVÁ, K. y RODE, B. (1996): Investigation on the mechanism of peptide chain prolongation on montmorillonite. *J. Inorg. Biochem.* 61: 69-78.
- (32) RODE, B. M. y SUWANNACHOT, Y. (1999): The possible role of Cu(II) for the origin of life. *Coordin. Chem. Rev.* 190-192: 1085-1099.
- (33) LE SON, H.; SUWANNACHOT, Y.; BUJDA, J. y RODE, B. M. (1998): Salt-induced peptide formation from amino acids in the presence of clays and related catalysts. *Inor. Chim. Acta.* 272: 89-94.
- (34) HUBER, C. y WAECHTERSCHAEUSER, G. (1997): Activated acetic acid by carbon fixation on (Fe, Ni) S under primordial conditions. *Science*. 276: 245-247.
- (35) BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO (2005): Real Decreto 9/2005, de 14 de enero. Criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. *B.O.E.* 15: 1833-1843.
- (36) MORENO, A. M.; QUINTANA, J. R.; PÉREZ, L. y PARRA, J. G. (2006): Factors influencing lead sorption-desorption at variable added metal concentrations in Rhodoxeralfs. *Chemosphere*. 64: 758-763.
- (37) MORENO, A. M.; PÉREZ, L. y GONZÁLEZ, J. (1993): Soil Parameters Contributing to Heavy metal Dynamics in Perimetropolitan Farmland Areas. *Geomicrobiology J.* 11: 325-332.
- (38) LAL, R. (2004): Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123: 1-22.
- (39) MERMUT, A. R. y ESWARAN, H. (2001): Some major developments in soil science since the mid-1960s. *Geoderma*. 100: 403-427.
- (40) OLDEMAN, L. R.; HAKKELING, R. T. A. y SOMBROEK, W. G. (1991): World Map of the Status of Human Induced Soil Degradation: Han Explanatory Not. 2nd revised edn. ISRIC, Wageningen. The Netherlands.