

SUELOS Y RECURSOS

I. Recursos naturales

Tema 1. Recursos naturales.

Introducción

Un recurso natural es cualquier bien capaz de suministrar a su poseedor alguna utilidad o beneficio (en términos económicos). Existen distintos criterios de valoración que supone que existan a su vez varios tipos de recursos.

El funcionamiento de la Tierra es cíclico, existiendo dos tipos de ciclos:

- Ciclos biológicos: la duración de los mismos nos la proporciona el participante más longevo.
- Ciclos geológicos: la duración de los mismos es de millones de años.

Debido a estos dos tipos de ciclos aparecen dos tipos de recursos en la Tierra:

- Recursos renovables: aquellos que se pueden renovar en un período de tiempo adecuado a escala humana, a su expectativa de vida.
- Recursos no renovables: aquellos ligados a ciclos biológicos de muchos millones de años, por lo que no son renovables a escala humana.

Clasificación general de los recursos naturales

Grupos	Tipos	Uso/Ejemplo
Recursos minerales	Minerales metálicos	Industria del metal/Blenda (ZnS)
	Minerales industriales no metálicos	Cerámica/Caolinita
	Rocas industriales	Construcción/Arena, grava y yeso
Recursos energéticos (no renovables)	Combustibles fósiles	Vehículos, aviones, etc/Petróleo Centrales térmicas/Carbón
	Combustibles nucleares	Centrales nucleares, usos militares/Uranio
Recursos energéticos dinámicos (renovables)	Energía geotérmica	Centrales eléctricas
	Biomasa	
	Energía eólica	
	Energía hidráulica	
	Energía mareal	
Recursos hidrológicos	Aguas superficiales	Abastecimiento humano, agricultura, industria refrigeración de centrales eléctricas, etc.
	Aguas subterráneas	
Recursos geotécnicos	Soporte estable y manejable de construcción local o lineal	Edificios, presas, carreteras, ferrocarriles
Recurso edáficos	Suelos de producción agrícola	Cultivos para alimento humano o ganadero, para bosques o plantas de producción de fibra
Recursos culturales y científicos	Sitios singulares	Parque Nacional de Timanfaya
Paisaje		Recreación, turismo, etc.

Tema 2. Recursos minerales.

Un yacimiento o recurso mineral es un cuerpo geológico constituido por una mineralización económicamente explotable. Siempre existirá un beneficio económico. La mayoría de los elementos químicos están distribuidos de forma equitativa, aunque existen diferencias en las distintas capas de la Tierra (en profundidad, pero no en la horizontal).

Cuando encontramos una anomalía (acumulación de uno de los elementos) tenemos un yacimiento. Para que un yacimiento sea explotable, el mineral debe superar la cantidad media existente. En relación al rendimiento económico podemos diferenciar entre recursos y reservas:

- Reservas: depósitos conocidos e identificados en los que el mineral se extrae con un beneficio económico gracias a una tecnología y unos parámetros económicos actuales.
- Reserva medida: yacimientos minerales conocidos y que se pueden medir ya que conocemos sus dimensiones con un error menor al 10%.
- Reserva indicada o probada: conocemos algunos de sus límites y suponemos los demás con un error menor al 20–30%.
- Reserva inferida o posible: solo tenemos algunos indicios de sus dimensiones o existencia proporcionados por sondeos.
- Recursos hipotéticos: aquellos que todavía no se han descubierto, pero que existen razones geológicas para suponer su presencia.
- Recursos especulativos: son aquellos que puede que existan en áreas sin descubrir, pero de los que no hay datos.

Yacimientos minerales: conceptos básicos

- Mena: indica el mineral principal que tiene un interés desde el punto de vista de la minería. Generalmente se utiliza para los metales, designando el mineral principal.
- Ganga: comprende los minerales que acompañan a la mena, pero que no tienen interés comercial cuando la explotamos. Si la ganga tiene interés de explotación pasa a ser mena.
- Supproductos: minerales que tienen interés económico pero que no son el objetivo principal de la explotación. Pueden darle un valor añadido.
- Reserva: cantidad de mineral que conocemos y es explotable.
- Ley media: concentración que presenta un elemento químico de interés para la explotación en el yacimiento. Se da en %, gr/t y oz/t.
- Ley de corte o cut off: concentración mínima que debe tener un elemento en un yacimiento para que sea rentable.

Tipos de recursos minerales

- Minerales energéticos: carbón.
- Minerales metálicos: son todos los metales. Se caracterizan porque son poco abundantes en la corteza y están irregularmente distribuidos. Requieren de un procesamiento para la extracción del metal del mineral que lo contiene. El coste de la extracción y procesamiento es muy alto en relación con el coste del transporte. Se pueden reciclar.
- Rocas y minerales industriales: rocas usadas para la construcción (mármol, granito, arenas, gravas, etc.). Son muy abundantes y están regularmente distribuidos. Se utilizan frecuentemente sin necesidad de procesamiento, excepto en el caso de las rocas ornamentales. Los costes de transporte son bastante importantes en relación con el coste total.

Impacto de la minería

- Pérdida de la cubierta vegetal y suelo: induce la erosión, a riesgos de desprendimientos de tierra, etc. Como medidas de prevención podemos mantener o almacenar ese suelo, mantener sus pendientes poco tendidas, revegetar con herbáceas durante el trabajo y con vegetación autóctona al terminarlo.
- Contaminación del agua: tanto las aguas superficiales como las subterráneas. Se altera el pH, se arrastran sólidos que conllevan una degradación de la fauna y flora de las riberas, hay cambios en la morfología del río, etc. Como medidas de prevención aparece el tratamiento de circuito cerrado, en el que el agua utilizada no se vierte al río sino a unas balsas controladas. También sirve la neutralización del agua, el sellado de escombreras, la revegetación y la no explotación bajo e nivel freático.
- Contaminación del aire: aparecen problemas como la emisión de polvo y partículas debidas a machaques y voladuras, la contaminación acústica y la emisión de gases tóxicos asociados al carbón. Como medidas de prevención aparecen el estudio de los vientos predominantes para estudiar los posibles afectados, plantas de machaque protegidas, sellado de escombreras, no ejercer la actividad minera y la compactación de escombros de carbón, ya que se autoincendian al aire libre.
- Contaminación paisajística: aparecen problemas como la degradación de la calidad paisajística o la incidencia visual. Como medidas de prevención aparecen los diseños de la explotación en relación con la incidencia visual, restauración de la explotación minera una vez terminada la actividad o renunciar a ella. Todas las explotaciones mineras han de realizar un estudio de impacto ambiental (EIA).

Tema 3. Recursos hídricos.

El agua que nos encontramos en la hidrosfera puede estar en los tres estados de la materia, aunque como recurso es de interés en estado líquido (agua) y sólido (hielo).

Para conocer la cantidad de agua que hay disponible utilizamos el ciclo hidrológico, que idealiza la transferencia de las masas de agua de una zona a otra de la hidrosfera. Los dos motores encargados de mover

el ciclo son el Sol, que proporciona la energía necesaria para evaporar el agua y la gravedad, que se encarga de la condensación del agua evaporada. Tal condensación es responsable de las precipitaciones en la superficie terrestre y la circulación de agua de zonas más altas a otras más bajas. Al ser un ciclo natural, puede comenzar en cualquier parte.

El agua del océano se evapora y forma nubes, donde se condensa y forma precipitaciones para regresar así a la superficie. Una parte de esa agua vuelve a la atmósfera por evaporación antes de llegar a la superficie. Parte del agua restante que sí consigue llegar es interceptada por los tejados de las casas, copas de los árboles, etc. antes de llegar al terreno.

De la cantidad de agua que llega a la superficie terrestre parte se retiene en charcas, surcos del terreno, etc. lo que se conoce con el nombre de **almacenamiento superficial** del agua en el terreno. Otra parte empieza a circular por regueros y se va acumulando en los ríos, pasando a ser **agua de escorrentía superficial**. Otra parte se infiltra en el terreno (**agua de infiltración**) pudiendo quedar acumulada cerca de la superficie o en el fondo. La que queda en la superficie se evapora y forma parte de la transpiración de las plantas, a lo que se le llama evapotranspiración (ET, ETP). La que queda en el fondo se llama **escorrentía subterránea** y forma los acuíferos (reservas), pudiendo incorporarse al ciclo de varios modos:

- Cuando está cerca de la superficie lo hace por escorrentía.
- Por un pozo, o al extraerla con bombeo para el riego.
- Si el nivel freático (NF) corta la superficie del terreno, suelta agua por un manantial en el punto de corte.
- Por aportes directos a un río.

Balance hídrico

Sirve para cuantificar los distintos componentes del ciclo hidrológico:

Entradas – Salidas = variaciones en el almacenamiento

En una zona dada del terreno, las entradas son las precipitaciones y las salidas la evaporación y la escorrentía hacia otras zonas del terreno. Suponiendo equilibrio (lo que entra es igual a lo que sale) tenemos que:

$$\text{Precipitaciones} - (\text{Evaporación} + \text{Escorrentía}) = 100 - (80 + 20) = 0$$

Cuando las salidas son mayores que las entradas el sistema entra en desequilibrio y aparecen los problemas.

En los océanos se evaporan 503 Km³/año de agua, aunque parte regresa (458 Km³/año) y parte se queda en la atmósfera (45 Km³/año).

Recursos hídricos

Es la cantidad de agua que circula por los ríos en un año, además de las reservas acumuladas de agua superficial y subterránea. Los recursos hídricos explotables consisten en la parte de tales recursos que pueden utilizarse bajo unas condiciones técnicas y económicas aceptables.

El agua en la Tierra

El 97% se encuentra en los océanos, el 2.1% en casquetes de hielo y glaciares y el 0.7% en forma de agua dulce (el 0.61% en agua subterránea y el 0.09% en agua superficial).

El agua de la precipitación (caída en los continentes)

El 65% se evapotranspira, el 28% se pierde por escorrentía superficial que no pasa a formar parte de las aguas subterráneas (reserva) y el 7% pasa a formar parte de tales aguas subterráneas.

Aparecen tres situaciones en las que encontramos agua superficial:

- Escorrentía estrictamente superficial: parte de la precipitación que no se evapotranspira y no se infiltra en el terreno, siempre circula en superficie.
- Escorrentía superficial de origen subterráneo: descarga natural de los acuíferos.
- Reserva hidrogeológica renovable (escorrentía subterránea): almacén natural de agua. Son las únicas que se pueden regenerar por infiltración.

La cuenca hidrográfica

Es una fuente de recuperación del agua. Constituye la zona de terreno donde toda el agua circula hacia un cauce principal. La línea divisoria se encuentra normalmente en las zonas de cresta.

La confederación hidrográfica es el organismo que se ocupa de la gestión de los recursos de las cuencas hidrográficas asociadas a los grandes ríos (como la cuenca hidrográfica del Tajo).

Tipos de evapotranspiración

- ET (evapotranspiración): depende del tipo de litología del suelo, las horas de insolación y la orientación del terreno.
- ETP (evapotranspiración potencial): lo que se evapotranspira con las condiciones dadas de un terreno.
- ET real: es frecuente que no se den las evapotranspiraciones esperadas debido a que el terreno no tiene la suficiente agua.

Usos del agua

- Abastecimiento: consumo humano.
- Agricultura.
- Industrial, tanto la pequeña industria como las grandes centrales térmicas e hidroeléctricas.
- Recreativo: zonas de embalses o ríos para uso recreativo humano.
- Trasvases: para el abastecimiento en otra cuenca.
- Acuicultura: para piscifactorías.

Tema 4. Recursos paisajístico–culturales.

No existen valores económicos en ellos sino que se les da un uso de patrimonio geológico, entendiendo como tal al conjunto de recursos naturales no renovables de valor científico, cultural o educativo:

- Formaciones y estructuras geológicas (relieves, volcanes, etc.).
- Formas del terreno: geomorfología.
- Yacimientos paleontológicos.
- Yacimientos minerales pero con interés educativo o científico (minas abandonadas, etc.).

Tienen en común que nos permiten reconocer e interpretar la evolución de la historia geológica de la Tierra, así como los procesos geológicos que la han modelado.

Marco legal

Protege el nivel geológico, es la ley de conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna

Silvestres (Ley 4/1989 de 27 de Marzo):

Artículo 13:

Los Parques son áreas poco transformadas por la explotación u otra ocupación humana que, en razón a la belleza de sus paisajes, de su fauna o de sus formaciones geomorfológicas, poseen unos valores ecológicos, estéticos, educativos y científicos cuya conservación merece una atención preferente.

Artículo 16:

1. Los Monumentos Naturales son espacios o elementos de la naturaleza constituidos básicamente por formaciones de notoria singularidad, rareza o belleza, que merecen ser objeto de protección oficial.

2. Se consideran también Monumentos Naturales las formaciones geológicas, los yacimientos paleontológicos y demás elementos de la gea que reúnan un interés especial por la singularidad o importancia de sus valores científicos, culturales o paisajísticos.

Criterios de valoración del Patrimonio Geológico

- Criterios de valor intrínseco.
- Relacionados con el potencial uso que podemos hacer de ese recurso.
- Relacionados con la necesidad de protección.
- **Valor intrínseco**
- Abundancia/rareza de la figura singular.
- Extensión superficial.
- Grado de conocimiento o de investigación que exista sobre el tema (significado nacional e internacional en la investigación geológica).
- Utilidad como modelo de valor científico para ilustrar procesos.
- Diversidad de elementos de interés presentes.
- Edad: los procesos muy antiguos son difíciles de observar.
- Carácter de la localidad–tipo.
- Asociación del patrimonio geológico con restos o elementos arqueológicos, históricos, artísticos, etc.
- Asociación con otros elementos del medio natural (fauna y flora).
- Estado de conservación.
- **Relacionados con el uso**
- Posibles actividades a realizar (científicas, didácticas, coleccionismo, etc.).
- Condiciones de la observación.
- Accesibilidad.
- Extensión superficial.
- Proximidad a poblaciones.
- Número de habitantes del entorno.
- Condiciones socio–económicas del entorno.
- Posibilidad de la extracción de objetos.
- Estado de conservación.
- **relacionados con la necesidad de protección**
- Accesibilidad.
- Extensión superficial.
- Proximidad a poblaciones.
- Número de habitantes.
- Amenazas actuales o potenciales.
- Posibilidad de la extracción de objetos.
- Situación en el planteamiento vigente.

- Interés para la explotación minera (la ley de Minas se encuentra por encima de cualquier otra ley).
- Valor de los terrenos.
- Régimen de propiedad del lugar.
- Fragilidad.

Mapa de Parques Naturales

La mayoría de ellos integran la existencia de un patrimonio geológico importante:

- Ordesa y Monte Perdido: glaciares activos, interés por esos procesos.
- Sierra Nevada: alta montaña.
- Archipiélago de Cabrera: arrecife coralino, cuevas submarinas.
- Parque de Doñana: sistemas dunares importantes a nivel europeo, sistema de marismas, fauna muy rica en todo el entorno, poco accesible.
- La Pedriza: Parque Natural, paisaje berrocal con granitos en proceso de degradación. Consta de protección regional y es de interés local (Comunidad de Madrid). Usos científicos, recreativos y educativos.
- La Patagonia: pocos glaciares en avance, lo que hace que constituya una figura singular a nivel mundial. Forma parte del Patrimonio de la Humanidad (UNESCO).
- Aneto: glaciar activo español. Es de interés nacional y tiene hielos antiguos que permiten observar cambios climáticos. Usos científicos y recreativos.
- Antequera. Paisaje cárstico. De interés regional constituye un Parque Natural.
- Irlanda del Norte: basaltos columnares provocados por el frío. Interés extralocal.
- Atapuerca: excavaciones en zonas cársticas sin interés geológico. Figura de la protección local e internacional. Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Aparecen restos humanos del último millón de años.

II. Conceptos básicos de suelos

Tema 5. El suelo como unidad de estudio.

Un suelo es el resultado del equilibrio entre las formas y materiales geológicos y los agentes que actúan en el exterior (exógenos) en un tiempo determinado. Tales resultados tienen su inicio en la edafogénesis, o proceso de formación del suelo.

El material se altera y se regenera principalmente por gravedad. El material se ordenará formando un perfil edáfico compuesto por distintos horizontes paralelos entre sí y a la superficie del terreno. Una vez que el perfil se ha formado llegaremos a un estado de equilibrio dinámico apareciendo el suelo clímax.

Factores formadores de un suelo

- Roca original.
- Clima.
- Vegetación.
- Tiempo (a mayor tiempo, mayores posibilidades de alteración).

Procesos de alteración

Por alteración (meteorización o intemperización) entendemos la transformación total o parcial con o sin conservación de volumen de las rocas, los minerales de las rocas, formaciones superficiales previas, etc. al entrar en contacto con la atmósfera. Es un proceso previo a la edafogénesis pero no único.

La roca en contacto con la atmósfera, biosfera o hidrosfera sufre meteorización, que provoca:

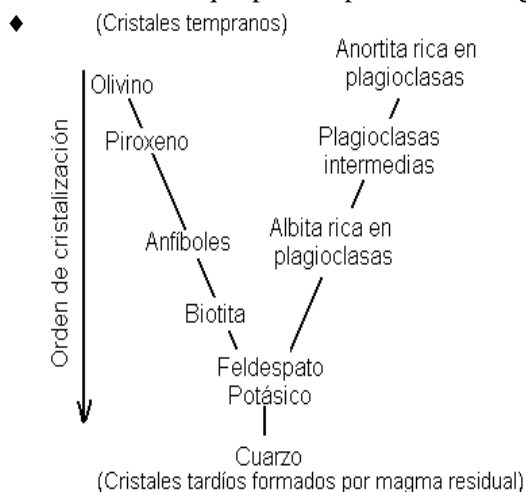
- Residuos (trozos de roca original).
- Minerales heredados.
- Minerales transformados.
- Minerales neoformados.
- Materiales solubles, que pueden perderse por procesos de lavado o se incorporan al suelo.

Todos estos materiales entran a formar parte en el proceso de formación del suelo.

• Procesos de alteración física

Provocan la disgregación mecánica de la roca asociada a una disminución de volumen de la misma, pero sin variación de la composición mineral. Provocan por tanto roturas en los minerales de las rocas debidas a dos tipos de tensiones:

- Endocinéticas: fuerzas generadas dentro de la propia roca. Hay varios tipos:
 - Descarga: se elimina material de la superficie de la roca por erosión, disminuyendo la presión sobre las rocas subyacentes. Tal disminución de la presión puede provocar la expansión y con ello producirse diaclasas y fracturas (sistemas de grietas paralelas a la superficie. Común en granitos).
 - Termoclastia: fracturación de la roca por cambios climáticos, en general diarios (calor del día y frío de la noche). Así, en los desiertos se descascarillan las rocas.
- ◆ Exocinéticas: fuerzas generadas fuera de la roca. Hay varios tipos:
 - ◆ Saturación por agua: importante en arcillas expansivas. Cuando recogen agua la expansión provoca la disgregación del mineral/roca en partículas. Esto genera erosión.
 - ◆ Crioclastia o cristalización del agua intersticial: congelación del agua entre los poros y fisuras, actuando a modo de cuña. Puede provocar la fracturación de bloques a gran escala o la disgregación de la roca a escala microscópica.
 - ◆ Cristalización de sales: proceso similar a la crioclastia que genera tensiones a escala microscópica.
 - ◆ Efecto mecánico de animales o plantas: son las raíces de los árboles, madrigueras de animales, etc. que pueden provocar la disgregación del material.



Procesos de alteración química

Se generan componentes minerales distintos a los originales. Dependen de la temperatura y la precipitación. La roca adopta sus componentes a nuevas condiciones de la atmósfera y la hidrosfera. Es fundamental para la formación del suelo ya que libera elementos cristalizados que reaccionan con componentes del suelo. En general, está caracterizada porque hay

transformaciones que afectan a la composición química y mineralógica mediante reacciones sencillas, exotérmicas e irreversibles en su mayoría que producen nuevos compuestos así como compuestos intermedios entre el original y el final.

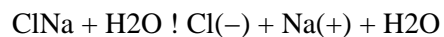
La producción de nuevos materiales depende del tipo de roca original, de la estabilidad de los minerales y de las condiciones del medio en que ocurre la alteración. La estabilidad de los minerales depende del orden de cristalización dado por la serie de Bowen.

La alteración química también depende del tipo de enlace químico existente en los minerales así como de sus características. Según su estabilidad decreciente ante los procesos de alteración química tenemos que: enlaces covalentes > iónico > metálico > puentes de H > fuerzas de Van der Waals.

También depende de las condiciones del medio, siendo las más importantes las de humedad (a mayor humedad, mayores procesos de alteración). Así, por ejemplo, el yeso o la caliza (muy solubles) son más estables en zonas áridas.

Mecanismos de alteración química

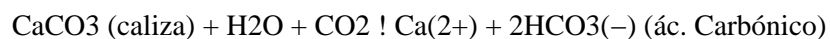
- ◆ **Disolución:** afecta a las rocas y minerales compuestos por sales solubles (yeso, halita, caliza, etc). Depende del pH del medio, de la temperatura y de la cantidad de agua:



- ◆ **Hidratación/deshidratación:** incorporación o salida de moléculas de agua de la estructura cristalina. Tendremos con ellas un mineral distinto en su estructura pero no en su composición, provocando además un aumento del volumen que tiene como efecto una disgregación mecánica del mineral:



- ◆ **Hidrólisis:** reacción de una sal con agua para dar lugar a un ácido y una base. Afecta a minerales de tipo silicatado (aluminosilicatos) que se comportan como sales débiles, resultando productos bastante inestables como lo son las arcillas de neoformación.
- ◆ **Carbonatación/decarbonatación:** afecta a casi todo tipo de rocas, sobretudo a las carbonatadas:



- ◆ **Oxidación/reducción:** afecta a los elementos que pueden presentar varios estados de valencia u oxidación (Mn, Fe, S, etc.). Se presentan en forma reducida en las rocas y sedimentos marinos (de tipo estuario) pero se oxidan en contacto con la atmósfera y se generan hidrogeniones que acidifican el pH del medio. Se produce un incremento del volumen del 22%.

Alteración de las rocas

En general se encuentra muy controlada por la porosidad y permeabilidad de la roca, lo que marca la cantidad de agua que entra y provoca el lavado de los elementos constituyentes. La **porosidad** viene expresada por el volumen de los huecos ocupados por el aire en relación con el volumen total de la roca. Normalmente se expresa en %, existiendo varios factores que determinan la porosidad:

- ◇ La forma de los granos.
- ◇ La disposición de los granos.
- ◇ La clasificación de los granos.

La **permeabilidad** es la porosidad eficaz, la cantidad de esos huecos que están interconectados entre sí y permiten que el agua circule por ellos.

Clasificación general de las rocas

Rocas sedimentarias

Formadas por la compactación de los sedimentos, se organizan en estratos y se distinguen:

- ◇ Clásticas: areniscas y conglomerados.
- ◇ Origen orgánico: carbón y calizas.
- ◇ Origen químico: calizas, sales, etc.

- ◆ **Las areniscas** se generan a partir de sedimentos lavados por lo que al final queda cuarzo. Su alteración se produce por la disolución del cemento quedando los granos sueltos. Las de origen calcáreo tienen una disolución importante del cemento pero las de cuarzo que se disuelvan. Las formadas por óxidos de hierro presentan la movilidad de este metal por todo el perfil de hidratación.
- ◆ **Las ortopizarras** dan minerales de la arcilla común muy orientados. El proceso de alteración es muy alto en la superficie ya que presentan grietas y muy bajo en profundidad. Están formados por la compactación de limos y arcillas, por lo que presentan muy baja permeabilidad.
- ◆ **Las calizas** son afectadas por la disolución del carbonato cálcico. No son solubles por sí solas, pero sí en presencia de agua y CO₂. Son secundariamente porosas por fracturación, lo que genera paisajes cársticos. En algunos casos las arcillas porosas experimentan disoluciones masimas.

Rocas ígneas

Hay dos tipos:

- ◇ Extrusivas: salen al exterior y cristalizan. También se llaman volcánicas (Olivino).
- ◇ Plutónicas: se forman en profundidad (Granito).

Las rocas volcánicas se enfrían más rápidamente, teniendo por tanto una estructura cristalina menos estable. Las plutónicas se enfrían más lentamente y como consecuencia su estructura cristalina es más estable. Químicamente se diferencian en:

- ◇ Rocas ácidas: más estables por tener una mayor proporción de Sílice.
- ◇ Rocas intermedias: algo menos estables.
- ◇ Rocas básicas: son las menos estables debido a que su contenido en Sílice es mucho menor.

- ◆ **Granitos:** son rocas ácidas compuestas por cuarzo, feldespatos y micas, con cristales bien consolidados. Son afectados por los procesos de alteración mecánica (descarga). La alteración química no afecta a los cristales de cuarzo, pero los feldespatos pasan a caolinitas y las micas a minerales de la arcilla, por lo que al final tenemos una disgregación del granito en la que solo queda cuarzo. Este proceso se llama arenización o arenización.
- ◆ **Basaltos y Andesitas:** son rocas intermedias y básicas, volcánicas de grano muy fino. Se encuentran muy consolidadas por lo que la alteración es a favor de fracturas o grietas, quedando al final minerales de la arcilla y óxidos de hierro.

Rocas metamórficas

Creadas a partir de rocas ígneas o de sedimentos gracias a la presión y la temperatura. Los minerales se presentan muy orientados como consecuencia de la presión, por lo que las rocas metamórficas presentan esquistosidad.

- ◆ **Gneis:** formado por cristales de grano grueso entre los que se encuentran el cuarzo, feldespatos, micas y granates. En las etapas finales de la alteración queda el cuarzo mientras que los otros minerales pasan a ser minerales de la arcilla. No presentan esquistosidad.
- ◆ **Esquistos:** como producto final de la alteración aparecen minerales de la arcilla. Se favorece la alteración mecánica, sobretodo la crioclastia. Presentan esquistosidad.
- ◆ **Mármoles:** formados a partir de caliza metamorfizada. Presenta procesos de disolución del carbonato cálcico, es decir, de carbonatación. No presenta esquistosidad.
- ◆ **Cuarcitas:** se alteran muy poco. Están formadas por cemento de sílice y cuarzo. Si se altera aparece la disolución del cemento y los granos de cuarzo, lo que es muy difícil que ocurra sin elevadas temperaturas, mucho tiempo y elevada pluviosidad.

Accidentes estructurales

- ◇ Planos de estratificación: son zonas de debilidad por las que circula el agua, aumentando así los procesos de alteración.
- ◇ Diaclasas: grietas en las que no hay desplazamiento.
- ◇ Fracturas: grietas en las que hay desplazamiento, debido al cual se produce un machacado del material.

Formaciones superficiales de alteración

Es un depósito que se genera como resultado de los procesos de alteración. Hay dos grupos:

Formaciones blandas

- ◇ Arenas y arcillas de alteración de rocas exógenas: son el resultado de la alteración de rocas plutónicas (granitos, dioritas) y de rocas máficas (gneis). No es frecuente que procedan de la alteración de rocas volcánicas. El proceso de alteración predominante es la hidrólisis de los minerales menos estables, como las micas y feldespatos, apareciendo arcillas de neoformación. Esta alteración se da en zonas tropicales, es decir, zonas húmedas y con elevadas temperaturas.
- ◇ Arenas y arcillas de decarbonatación: proceden de rocas calcáreas lavadas con agua cargada de CO₂. Aparecen en zonas templadas donde el suelo es rico en CO₂ y ácidos orgánicos. Como resultado final de la alteración aparece un material suelto en el que el material no soluble (cuarzo) se incorpora a las arcillas de neoformación. Al final queda un acúmulo de arcillas de distintas características:
- ◇ En climas húmedos con estación seca tendremos arcillas con colores rojos intensos producto de la alteración de carbonatos (terra rossa).
- ◇ En climas húmedos pero menos cálidos aparecen arcillas de colores pálidos como consecuencia de que no tienen óxidos e hidróxidos de hierro (terra fusca).

Encrostamientos

Al conjunto de encrostamientos se le denomina duricretas, que son capas endurecidas depositadas una sobre la otra. Las duricretas se encuentran formando nódulos o costras. Hay varios tipos:

- ◇ Calcretas: enriquecidas en CaCO₃.

- ◇ Silcretas: enriquecidas en Si.
- ◇ Ferricretas: enriquecidas en Fe.
- ◇ Gipsicretas: enriquecidas en yeso.
- ◇ Manganocretas: enriquecidas en Mn.
- ◇ Bauxitas: enriquecidas en Al.

Tipos de concentración

- ◇ Concentración absoluta: la cantidad de un elemento aumenta como consecuencia de la adición de este por el exterior.
- ◇ Concentración relativa: cuando el aumento en la cantidad del elemento se produce de forma relativa por la pérdida de alguno de los otros elementos.

Calcreta

En los encrostamientos calcáreos tenemos en cuenta varios factores:

- ◆ La presión de CO₂: tenemos una disolución de 200mg/l de CaCO₃ a 50 mg/l de presión. Queda demostrado que conforme aumenta la presión de CO₂ en el agua, aumenta la solubilidad del CaCO₃. Aparece una zona en la que se puede disolver (aguas agresivas) y una zona en la que precipita (aguas incrustantes).
- ◆ El pH: valores ácidos favorecen la disolución del CaCO₃, mientras que los valores básicos disminuyen su solubilidad. Al representar pH frente a la concentración de carbonato que precipita observamos que la recta resultante está relacionada con la temperatura. A temperaturas altas, la solubilidad del CaCO₃ es menor, por lo que disminuye la PCO₂ y aumenta el pH.

Las variaciones de temperatura o de la PCO₂ es lo que influye que pasemos de una disolución de CaCO₃ a un precipitado del mismo. La precipitación aparece en zonas donde se encontraba antes disuelto, luego las calcretas aparecen en zonas donde hay formación de CaCO₃.

La forma en que precipita el carbonato es lo que determina que aparezca una calcreta o caliche. Hay varias hipótesis sobre la formación de caliches:

- ◇ En zonas muy áridas se produce un ascenso por capilaridad del agua rica en carbonatos, de modo que cuando llega a la superficie se produce la evaporación y la consecuente precipitación del carbonato en zonas muy superficiales.
- ◇ Por el lavado lateral y descenso del agua. Sucede en zonas ricas en calizas en las que en época de lluvia aparece un aporte de agua en todo el material carbonatado con lavado de materiales. El agua se incorpora a las formaciones de material suelto y en momentos de una mayor acidez, las aguas carbonatadas precipitan formando nódulos en la superficie.

Silcreta

Acumulación de sílice que ha formado un encrostamiento. Pueden aparecer en forma de nódulos, en ocasiones de tamaño métrico, o en forma de capas continuas de un espesor que va desde unos cuantos centímetros hasta 1 metro.

Como son difícilmente alterables, muchas veces forman el techo de cerros testigo. En general se necesita un pH > 9 y mucho tiempo para que se formen. El grado de cristalinidad aumenta conforme pasa el tiempo, siendo la acumulación primaria en forma de ópalo, que pasa a cristobalita y acaba en forma de cuarzo.

Ferricreta

Son materiales enriquecidos en óxidos e hidróxidos de Fe. Para su formación es necesario que el Fe se remobilice y sea transportado por el agua hasta el lugar de precipitación. A partir de sales ferrosas solubles en condiciones reductoras, el agua es capaz de transportarlo. Cuando precipita, las condiciones son oxidantes, es decir, el medio se encuentra oxigenado.

El Fe también puede aparecer en forma de pinolitos, que son concentraciones de este elemento de forma nodular en zonas concéntricas y bien diferenciadas y sueltas o en agrupaciones. También aparece en formas vesiculares, más o menos tubulares en las que hay caolinita en el centro y óxido de hierro en las paredes.

Bauxita

Acumulaciones de aluminio que aparecen como producto final de una alteración muy intensa. Aparece en forma de pinolitos.

Necesita de un clima húmedo continuado donde la precipitación sea mayor a la evaporación, las temperaturas medias superen los 25°C, el material original sea de grano grueso, lo que permite una buena circulación del agua (permeabilidad) y tiempo para su formación. Normalmente las encontramos en zonas tropicales.

Tema 6. Organización del suelo.

Perfil edáfico

El suelo se distribuye en la vertical por acción de la gravedad y es un sistema abierto en el que aparecen tres fases de la materia:

- ◆ **Fase sólida:** formada por los agregados minerales y la materia orgánica que interacciona con los minerales. Se distinguen: materiales orgánicos e inorgánicos.
- ◆ **Fase líquida:** existen poros que pueden estar rellenos de agua, con iones en disolución o en suspensión.
- ◆ **Fase gaseosa:** de composición similar al aire atmosférico salvo en aquellas zonas en las que la actividad de los organismos libera CO₂. Por eso es bueno airear el suelo (eliminamos el exceso de CO₂).

Si rellenamos todos los poros con agua tendremos condiciones reductoras, por lo que los organismos presentes serán anaerobios y aparecerá la muerte de las raíces de las plantas. En un suelo normal, el 50% se corresponde con la fase sólida, el 25% con la gaseosa y el otro 25% con la líquida. De la fase sólida el 95% se corresponde con la materia mineral y el resto con la materia orgánica.

En el perfil de un suelo observamos los distintos materiales según sus propiedades y los clasificamos según varias características:

- ◇ Color.
- ◇ Propiedades morfológicas (textura, estructura, etc.).
- ◇ Propiedades asociadas (plasticidad, adherencia, dureza, etc.).

Para distinguir estos horizontes debemos observar los procesos principales que han formado el suelo. Estos son:

◇ **Eluviación:** movilización, transporte y pérdida de los materiales. Corresponde a los horizontes superiores, más superficiales.

◇ **Iluviación:** representa la inmovilización y acumulación de sustancias en otras zonas del suelo. Corresponde a horizontes subsuperficiales.

El agua es el vehículo de transporte de los materiales. Siempre que haya eluviación no tiene por qué darse la iluviación, pero el hecho de que aparezca iluviación indica que han tenido que darse procesos de eluviación.

Horizontes genéticos

Son los distintos horizontes de los que se compone un suelo. Tenemos horizontes principales que se nombran con una letra mayúscula a la que se le añade una letra minúscula que indica el proceso que ha originado el horizonte. También se utilizan números para indicar su posición dentro del suelo.

Horizontes principales

◇ **H (histos):** son acumulaciones de materia orgánica sin descomponer (más de 20–30% de materia orgánica) en un medio saturado en agua durante la mayor parte del tiempo. Este material se conoce como turbas.

◇ **O (orgánico):** capa de hojarasca asociada a los bosques que no interacciona con la materia inorgánica.

◇ **A:** horizonte mineral oscurecido por aporte de materia orgánica. Se forma bajo el horizonte O. Es uno de los más superficiales y de color oscuro como consecuencia de la materia orgánica.

◇ **E:** horizontes de eluviación. Horizonte mineral muy lavado, de colores claros.

◇ **B:** zona de iluviación. Horizontes minerales superficiales ya formados en el suelo por enriquecimiento en arcillas, óxidos de hierro, etc. Colores marrones, rojizos, etc. Es uno de los horizontes donde mejor se desarrollan las estructuras (prismáticas, cúbicas, etc.).

◇ **C:** material original afectado solo por la meteorización, antes de que se produzcan los procesos edáficos.

◇ **R:** roca mineral sin disgregar (roca dura).

Horizontes de transición

No sabemos cuando se produce el cambio de un horizonte a otro. Se nombra combinando las letras de los dos horizontes afectados.

Horizontes mezcla

Aparecen cuando dentro de un horizonte tenemos restos de otro claramente identificable.

Subíndices principales

◇ **p:** horizonte labrado, generalmente asociado al horizonte A.

◇ **h:** procede de la palabra humus, una acumulación importante de materia orgánica. Se produce tanto en horizontes A como en B, de color oscuro.

◇ **w (weathering = meteorización):** horizonte donde se han producido procesos de alteración importantes. Generalmente asociado al horizonte B, lo que nos indica que existen arcillas formadas in situ. Colores pardos y rojizos. Se desarrollan muy bien estructuras edáficas.

◇ **t:** asociado a procesos de translocación. Indica una acumulación importante de

- arcillas mediante la iluviación. Asociados a horizontes B.
- ◊ **k**: acumulación de carbonatos. Frecuentemente asociados a horizontes B y C.
- ◊ **y**: acumulación de yeso.
- ◊ **z**: acumulación de sales más solubles que el yeso como NaCl, y KCl. Asociados a horizontes B.
- ◊ **s**: acumulación de sesquióxidos (óxidos e hidróxidos de Fe y Al). Asociado a horizontes B, muestra colores rojizos.
- ◊ **m**: cementación. Asociado a otras siglas (por ejemplo Ckm: cementación debida una acumulación de carbonatos).
- ◊ **g**: aparecen manchas oscuras embutidas en una masa rojiza debida a la reducción del Fe.
- ◊ **r**: condiciones de reducción muy fuerte, más que en el anterior. Masas de colores grisáceos que indican la presencia de condiciones reductoras.

III. Génesis y evolución del suelo

Tema 7. Procesos formadores de suelos.

En el suelo existe un equilibrio dinámico con la atmósfera, la biosfera y la litosfera. A partir de una roca original y mediante un proceso de alteración, aparecen transformaciones del material además de la creación de nuevas sustancias. Todos estos nuevos materiales se organizan para dar lugar a un perfil edáfico. Hay varios factores formadores de un suelo:

- ◊ Factor geológico: influenciado por el tipo de roca y su grado de alteración.
- ◊ Factor geomorfológico (topografía): influenciado por el relieve, la pendiente y la geomorfología que se haya desarrollado.
- ◊ Factor biótico: influenciado por el tipo de vegetación que tengamos, por la fauna y la actividad humana.
- ◊ Factor climático: influenciado por la temperatura, la humedad y el viento.
- ◊ Factor tiempo: debe haber tiempo suficiente para que se de la evolución de los materiales.

Se pueden hacer secuencias del suelo en relación a cada uno de estos factores, dependiendo de cual de ellos varíe:

- ◊ Tiempo: cronosecuencias.
- ◊ Geología: litosecuencias.
- ◊ Geomorfología: toposecuencias o catena.
- ◊ Factor biótico: biosecuencias.
- ◊ Clima: climosecuencia.

Factor climático

Factor determinante ya que regula el aporte de agua al suelo, así como la temperatura:

- ◊ La humedad es muy importante en los procesos de hidrólisis y en los de disolución.
- ◊ La temperatura marca la velocidad de las reacciones químicas.

Indicadores climáticos

- ◊ Contenido en materia orgánica: existe una relación directa entre el contenido de materia orgánica y las precipitaciones, de modo que al aumentar las precipitaciones lo hace el contenido de materia orgánica. Sin embargo, a elevadas temperaturas disminuye el contenido en materia orgánica.
- ◊ Contenido en arcillas: cuando existen elevadas precipitaciones existe una mayor presencia de arcillas. Del mismo modo, al aumentar la temperatura lo hace la

formación de arcillas de modo exponencial.

- ◇ Mineralogía de las arcillas: depende de la alteración. A elevadas precipitaciones y temperaturas aparece la caolinita, mientras que si las precipitaciones aumentan drásticamente aparecen óxidos de Fe y Al.
- ◇ Color del suelo: a un mayor número de precipitaciones, el suelo es más rojizo.
- ◇ Contenido en CaCO_3 : al aumentar las precipitaciones disminuye su concentración como consecuencia del lavado.
- ◇ Grado de alteración mineral: elevadas temperaturas y precipitaciones se traducen en una mayor meteorización. Una roca queda reducida a cuarzo y arcillas procedentes de los minerales originales alterados.

Climosecuencia de Strakhov

Se aprecia la evolución de todo un terreno estable:

- ◇ Zonas polares: pocas precipitaciones y bajas temperaturas. Desarrollo mínimo del suelo, con suelos tipo permafrost (permanentemente helados).
- ◇ Zonas de tundra: bajas temperaturas y suelos poco desarrollados. Alteración mínima del material.
- ◇ Taiga: elevadas precipitaciones que provocan procesos de alteración. Desarrollo de suelos poco potentes.
- ◇ Desiertos y semidesiertos: bajada de las precipitaciones y evaporación, ya que la temperatura es demasiado elevada en relación con la precipitación. Poca alteración del material original.
- ◇ Bosques tropicales: aumento de las precipitaciones y temperaturas elevadas. La tasa de evaporación es menor, lo que provoca una importante alteración del material. Desarrollo de suelos muy potentes.

Factor biótico

- ◇ Fauna: removilización y alteración de suelos debido tanto a una variada gama de animales excavadores (marmotas, ratones, lombrices, etc) como no excavadores (larvas de insectos, colémbolos, nemátodos y ácaros).
- ◇ Hombre: acción indirecta como la destrucción o alteración vegetal.
- ◇ Vegetación: sirve como protección frente a la erosión, favorece la alteración de la roca, sintetiza materia orgánica, cohesiona las partículas y actúa como filtro ante la lluvia, la luz y el viento.

Factor geomorfológico

El transporte del material se realiza pendiente abajo, dándose procesos de erosión en las zonas altas y procesos de acumulación en zonas bajas (valles). Aparece una secuencia predecible de materiales a lo largo de la ladera:

- ◇ En las zonas altas los suelos se encuentran poco desarrollados, son suelos de tipo residual.
- ◇ En la media ladera tenemos un transporte y lavado continuo del material.
- ◇ En la zona de ruptura de la pendiente aparece el depósito de todo el material arrastrado.
- ◇ En el pie de la ladera aparecen suelos acumulativos muy desarrollados, donde abunda el material más fino.
- ◇ En zonas con relieves convexos, el agua circula hacia lugares cóncavos y es ahí donde se deposita el material.
- ◇ En las zonas altas se produce una infiltración vertical importante, mientras que en las zonas bajas no suele aparecer.

La misma cantidad de rayos solares cubren áreas de suelo diferentes como resultado de la inclinación, por lo que las distintas áreas se calentarán de distinto modo. Además de la inclinación también influye la orientación de la ladera, así las zonas con orientación Sur (solana) tienen más cantidad de luz y con un mayor poder calorífico, por lo que se produce una alteración de la materia orgánica muy rápida. En zonas con orientación Norte (umbría), la temperatura es menor, por lo que aparece más vegetación que favorece los procesos de eluviación e iluviación.

Topofunciones (distinto a toposecuencia)

Muestran la dependencia de algunas propiedades del suelo en relación con la topografía. En general, para todas las propiedades del suelo existe la misma relación con la pendiente (al aumentar la pendiente disminuye la propiedad). Ejemplos:

- ◇ Espesor del suelo: a pendientes elevadas, menor espesor.
- ◇ Presencia de arcillas: altos valores en suelos planos.
- ◇ Desarrollo del horizonte Bt: mayor en horizontes planos.
- ◇ Contenido en materia orgánica: mayor en suelos planos. En zonas elevadas apenas existe cubierta vegetal y en consecuencia m. orgánica.
- ◇ % de carbonatos y sales: menor cantidad en pendientes elevadas debido al lavado de los materiales.

Toposecuencia o catena

Muestran la evolución del suelo respecto de su situación en el paisaje:

- ◇ Zonas de cumbre.
- ◇ Zonas de ladera.
- ◇ Zonas de deposición.

Podemos distinguir 5 unidades principales en relación con 5 evoluciones del suelo:

- ◆ Zonas de cumbre: relativamente planas y con una elevada intensidad de procesos de eluviación. Suelos poco evolucionados y con desarrollos poco potentes.
- ◆ Ruptura convexa de la pendiente: ruptura entre la zona de cumbre y la de ladera. Prevalece la erosión. Suelos erosionados no desarrollados.
- ◆ Zonas de ladera: laderas con pendiente uniforme donde se produce un lavado oblicuo de los materiales. Prevalece la alteración física y los suelos son poco evolucionados, con características erosivas.
- ◆ Zonas de ruptura cóncava de la ladera: zona de contacto entre la ladera y el valle. Presenta lavado superficial de los elementos y deposición del material arrastrado por la ladera.
- ◆ Zona de depresión: zona deposicional con gran acumulación del material. Suelos muy desarrollados.

Factor geológico

En general, la roca representa la fuente mineral que se incorporará y formará parte de un suelo. Hay varias características de la roca que influyen en el tipo de suelo que se formará, como lo son la composición mineralógica, la permeabilidad y la granulometría.

Factor tiempo

Para la formación de un suelo existen diversos procesos ocasionados por distintas velocidades según el tiempo de desarrollo. En general, la velocidad de formación de un suelo es muy

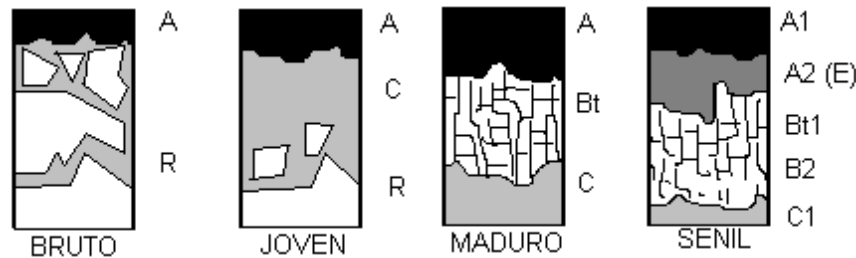
lenta, por lo que si se pierde un suelo es prácticamente irrecuperable a una escala temporal humana.

Suelos con un material suelto e inestable se desarrollan antes que los que tienen un material compacto y estable (1mm/año frente a 0.001 mm/año). En un gráfico de evolución del suelo apreciamos que en los primeros momentos tenemos un desarrollo más rápido. La formación de un suelo se acelera por el clima (humedad, elevadas temperaturas y precipitaciones), por la presencia de vegetación, la permeabilidad del suelo (mejor en suelos sueltos) y topografías planas.

Con el tiempo conseguiremos un mayor desarrollo y diferenciación de los horizontes.

- ◇ Las propiedades asociadas a los horizontes A es la presencia de materia orgánica. Se estabiliza aproximadamente entre los 200–100.000 años.
- ◇ En los horizontes B aparece la génesis de la arcilla, lavado de carbonatos y eluviación, que son procesos muchos más lentos que los que aparecen en los horizontes tipo A (el desarrollo de los horizontes A es mucho más rápido que el de los horizontes B).
- ◇ En los horizontes K aparece la acumulación de carbonatos, siendo tal acumulación favorecida con el transcurso del tiempo, lo que hace que se encuentren a mayor profundidad.

El tipo de desarrollo de un suelo permite analizar el grado de evolución de un suelo:



- ◇ Bruto: sin desarrollo.
- ◇ Joven: desarrollo del horizonte C.
- ◇ Maduro: desarrollo del horizonte Bt, con formas prismáticas.
- ◇ Senil: desarrollo del horizonte E debido a un mayor lavado.

Cronofunción

Muestra la evolución de una propiedad en función del tiempo. Así, conforme pasa el tiempo, los suelos presentan más evolución, mayor espesor del horizonte Bt, % de arcillas, retención de agua y capacidad de cambio, así como un mayor contenido en carbonatos.

Cronosecuencia

Secuencia del suelo en la que el factor que varía es el tiempo. En general, la edad de un suelo se puede datar radiométricamente, aunque existen otros métodos en relación a la posición que ocupan en un suelo las distintas superficies. Así, si el terreno original es erosionado por la corriente de un río, la parte más moderna corresponderá a la parte baja del surco (superficie mediana).

Si queremos datar el suelo en función de su estructura analizaremos el grado de evolución de los horizontes de cada superficie (bruto, joven, maduro o senil). Aún así, una de las formas

más sencillas y eficaces de datar un suelo es medir su concentración de carbonatos, reflejo de procesos de eluviación.

Una de las cronosecuencias más representativas estudia la evolución de un suelo y sus propiedades en un sistema de terrazas fluviales. La secuencia temporal está solucionada siempre que hayan sucedido procesos de alteración destacados. Tendremos por ejemplo, terrazas fluviales secuenciadas en el tiempo, en las que las zonas más elevadas serán las más antiguas. Además, cuando la corriente de agua pasa por las terrazas va dejando distintos materiales, por lo que a partir de la secuencia de terrazas tendremos una secuencia de suelo.

Manifiesto de las propiedades

Cada propiedad del suelo no se manifiesta de mismo modo al mismo tiempo, ya que algunas evolucionan más lentamente y tardan más tiempo en alcanzar una estabilidad posicional.

Un suelo se encuentra en estado clímax o estacionario cuando todas sus propiedades se encuentran en condiciones estables, es decir, cuando la última de sus propiedades (la de evolución más lenta) alcanza la estabilidad. Es una situación teórica discutida, ya que la temperatura y la humedad influyen en la estabilidad del suelo al producirse cambios climáticos con su variación. Llegará por tanto un momento en el que el suelo no cambie o lo haga muy poco si los cambios climáticos son poco apreciables.

Tema 8. Procesos edafogenéticos.

Los procesos de alteración estudiados en el tema anterior tienen como función preparar la roca original para que reaccione con la materia orgánica y se desarrolle el suelo. Los procesos edafogenéticos tienen lugar dentro del propio suelo y son responsables de la adquisición de la identidad del mismo.

La actuación de las raíces, el hielo, etc. es continua durante el desarrollo del suelo, pero también hay otros procesos como son:

- ◇ Adiciones.
- ◇ Transformaciones.
- ◇ Translocaciones.
- ◇ Pérdidas.

Adiciones

- ◇ **Incremento de la materia orgánica** directamente relacionado con la presencia de vegetación, lo que será responsable del oscurecimiento de los horizontes superficiales.
- ◇ **Aporte directo del material** por medio de los ríos (acumulación en terrazas), coluviones por gravedad, procesos eólicos o aportes humanos (suelos desarrollados sobre restos de basura, etc.).
- ◇ **Aporte de agua**, esencial para la mayoría de los procesos. El agua puede provenir de la superficie, del nivel freático o de las precipitaciones.
- ◇ **Aporte de O₂**, que condiciona la aireación del suelo. El oxígeno está relacionado con los procesos redox que intervienen en la formación del suelo.

Transformaciones

Son consecuencia del clima (temperatura y precipitaciones), por lo que predomina la alteración química. Hay varios tipos de transformaciones:

- ◇ **Melanización:** responsable de que los horizontes A tengan un color oscuro como resultado de la impregnación de la materia orgánica con la materia mineral.
- ◇ **Empardecimiento o brunificación:** responsable del color pardo del suelo debido a la alteración de los minerales originales, sobretodo los que liberan Fe y permiten la formación de hidróxidos férricos en forma de gel, que se mezclan con las arcillas. Aparecen en zonas templadas y húmedas.
- ◇ **Rubefacción:** proceso que proporciona una coloración rojiza al perfil. Representativo de climas más cálidos con períodos de sequía intenso. La alteración de los minerales originales dará lugar a óxidos de hierro (hematites).
- ◇ **Fersralitización:** procesos dados en suelos con formación de silicatos de la arcilla, que serán de Fe, Si y Al. Lo que ocurre es la aparición de arcillas de neoformación (versiculitas) a partir de la roca original.
- ◇ **Ferratilización:** proceso indicador de la alteración máxima de la roca y el suelo. Se da en climas tropicales de altas precipitaciones y un drenaje intenso del agua. Al final tenemos un lavado de los materiales, quedando sólo los más estables (cuarzo y óxidos e hidróxidos de Fe y Al). En zonas en las que la alteración no ha sido tan intensa quedan arcillas más estables (caolinitas). Este proceso provoca la aparición de tonalidades rojizas debidas a los óxidos de Fe.
- ◇ **Gleyzación y pseudogleyzación:** ambos procesos están condicionados por la existencia de capas de agua que saturan permanentemente el suelo, es decir, condiciones de hidromorfía. Esta agua se desplaza lentamente y se ve empobreciendo en oxígeno y acidificando al estar en contacto con la materia orgánica, apareciendo por tanto condiciones reductoras (pH ácido y baja concentración de oxígeno).

En estas condiciones se favorece la movilización del Fe en forma reducida (Fe^{2+}), que se distribuye por todo el perfil y acumulándose en perfiles inferiores, donde es responsable de una coloración grisácea o verdosa. En momentos de sequía desaparecen las condiciones reductoras y se produce la oxidación del Fe (pasa a Fe^{3+}). Cuando sólo hay condiciones reductoras los suelos son de tipo gley, pero cuando existen condiciones oxidantes de forma periódica aparecen los tipo pseudogley:

GLEY	Fe^{2+} Gris, verdoso, azulado Medio reductor		PSEUDOGLEY	Fe^{2+}, Fe^{3+} Gris, verdoso, azul con moteado rojizo Medio reductor-oxidante
-------------	---	--	-------------------	---

- ◇ **Piritización:** formación de piritas de sulfuro de Fe. Ocurre en zonas salobres ricas en sulfatos y con grandes aportes de materia orgánica. Siempre hay condiciones de hidromorfía. Las piritas se forman como consecuencia de la reducción de los sulfatos a sulfuros.

Translocaciones

Indican el cambio de posición de un componente dentro del suelo. El movimiento de las sustancias se produce de forma vertical gracias al agua en las zonas llanas, aunque también pueden producirse deslizamientos en zonas altas.

El agua de precipitación se va desplazando por la superficie y se introduce en el terreno hasta lugares profundos. Por medio de esta agua se transporta material desde los horizontes superficiales hasta los inferiores. Los tres procesos principales por los que podemos eluviar los horizontes superiores son:

- ◇ Lixiviado.
- ◇ Queluviación, apareciendo formas pseudosolubles que forman componentes organometálicos.

◇ Transporte del material en suspensión.

Hay varios procesos de translocación:

- ◇ **Lavado de los perfiles superiores:** se produce el arrastre y la eliminación de los iones disueltos en el suelo.
- ◇ **Desbasificación:** es un lavado muy intenso en el que la mayoría de las bases de cambio (Ca, Mg, Na y K) son lavadas y sustituidas por hidrogeniones de cambio (H⁺).
- ◇ **Salinización:** acumulación de sales más solubles que el yeso (NaCl) en el suelo. Este proceso está asociado a climas áridos y semiáridos.
- ◇ **Gypsificación:** proceso responsable de la acumulación de yeso en el perfil del suelo, formando masas blancas con formas romboédricas distinguibles al microscopio. El yeso es muy soluble y por tanto muy móvil. Proceso asociado a regiones áridas.
- ◇ **Decarbonatación/carbonatación:** el proceso principal es la decarbonatación o pérdida del carbonato cálcico de los horizontes superiores, pasando a zonas más profundas. Cuando el carbonato está solubilizado en el perfil es posible que se produzca su precipitación dando horizontes tipo Ck y Bk, siempre que aumente el pH y la temperatura y disminuyan las precipitaciones. Los carbonatos resultantes se acumulan dando lugar a nódulos o revestimientos alrededor de los bloques de arcillas, fracturas, etc.
- ◇ **Iluviación de la arcilla (ilmerización):** migración mecánica de las arcillas de horizontes superficiales hasta los horizontes inferiores (E, Bt1). Se pone de manifiesto con cortes del suelo y si las arcillas son de neoformación, no se producen tantas pérdidas en los horizontes superiores.

Las arcillas se movilizan debido a precipitaciones importantes, pasando entonces a dispersarse en suspensión. Se fijan en el horizonte B, ya que existen macroporos llenos de aire donde se produce la succión del agua, quedando así capas de arcilla pegadas de forma paralela a las paredes internas del poro (estas capas de arcilla se denominan **clayskin**). Además se pueden acumular alrededor de los bloques de material, pasando entonces a denominarse revestimientos, cutanes de arcillas o arcilanes, dependiendo de su tipo de formación. En el caso de los arcilanes, el agua cargada de arcillas llega al agregado y entra por los microporos formándose películas brillantes de arcilla sobre estos. Son necesarias condiciones de fases húmedas para que exista un exceso de agua que permita el arrastre de las partículas acumuladas en fase de sequía.

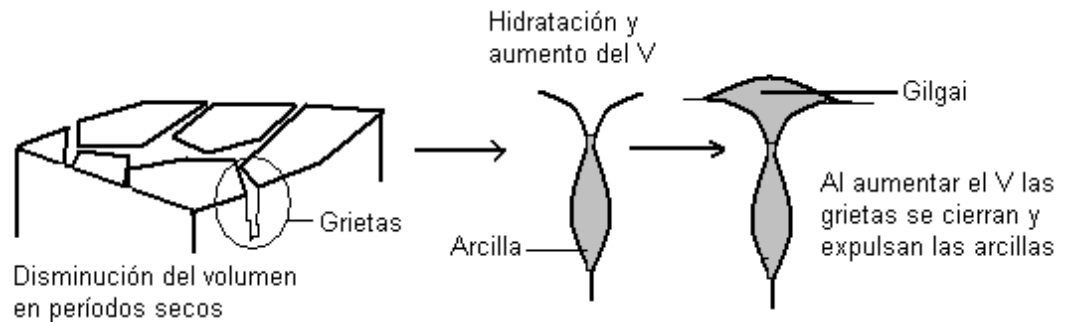
- ◇ **Podsolización:** incluye la queluviación de Fe, Al y materia orgánica (humus) e implica la translocación desde los horizontes superficiales hasta los más profundos. Las condiciones más adecuadas son las de alta acidez, clima húmedo y frío y una alta permeabilidad de la roca. Habrá entonces un lavado muy intenso llamado desbasificación.

En el medio ácido la materia orgánica evoluciona lentamente y va liberando compuestos orgánicos de carácter ácido. La progresiva acidez provoca la inestabilidad de los minerales, excepto del cuarzo, por lo que el medio queda enriquecido de los minerales más insolubles (Fe y Al). Estos dos minerales se acaban fijando en la parte inferior del perfil, ya que según vamos descendiendo se forman complejos organominerales capaces de fijarlos. Se acumulan formando horizontes Bs (sesquióxidos).

- ◇ **Arcilloturbación (edafoturbación):** proceso de translocación de los materiales del suelo en todo su conjunto. No permite el análisis de perfiles ya que ocurre en todo el perfil, por lo que se homogenizan las propiedades de todos los horizontes. Aparecen entonces suelos homogéneos donde los cambios no son apreciables ya que los constituyentes no varían en profundidad (mismo % de arcillas, m.orgánica y pH en

todo el perfil).

Se produce cuando tenemos arcillas de tipo expansible, que en épocas húmedas se hidratan (se hinchan) y en épocas secas se secan (menor volumen). Aparecen entonces grietas de tipo poligonal. Las presiones que se producen por el cambio de volumen provocan que se removilicen las partículas del suelo, formándose películas de aspecto ceroso y brillante (**slickenside**) en el interior de las grietas. En ocasiones, el material de los horizontes superiores y el de las propias paredes del suelo caen en las grietas y cuando estas se cierran parte del material sale al exterior, formándose una especie de montículos llamados **gilgai**.



- ◇ **Cementación:** indica la acumulación de grandes cantidades de material, produciéndose su cementación o encroscamiento. Los materiales suelen ser carbonatos y yesos (materias muy solubles y capaces de precipitar). Aparece en los horizontes Ckm.

Pérdida de los componentes

Se produce de varias maneras:

- ◇ **Lixiviado:** se produce la migración continuada de un elemento del suelo. En general tenemos un lavado del componente en todo el perfil, por lo que acabará abandonándolo por completo.
- ◇ **Erosión:** se produce en los horizontes superficiales (A, E) quedando truncado el perfil del suelo. Más tarde evoluciona como un nuevo suelo mediante procesos de formación distintos dependiendo de la temperatura, humedad, et.
- ◇ **Evaporación:** supone la pérdida de ciertos componentes gaseosos.
- ◇ **Pérdida de CO₂:** se produce por la mineralización de la materia orgánica. Como consecuencia la posibilidad de que se disuelvan los carbonatos disminuye.

Temas 9 y 10. Componentes inorgánicos del suelo.

En la mayoría de los suelos al estudiar su fase sólida se observa que predominan los componentes inorgánicos (90–95%), los cuales tienen su origen en la roca a partir de la cual se formó el suelo. En función de las modificaciones de la roca original, los minerales tienen tres orígenes:

- ◇ **Minerales heredados:** mineral original no transformado encontrado en el suelo.
- ◇ **Minerales transformados:** procedentes de la alteración química del mineral original.
- ◇ **Minerales neoformados:** formados por precipitación directa en el suelo.

Las fracciones granulométricas más gruesas (arena y limo) tienen un predominio de minerales heredados y algunos transformados, pero ninguno neoformado. La formación de un suelo está integrada en algún punto del ciclo de Wilson. Los minerales más abundantes en el suelo son los silicatos, exceptuando las zonas más áridas y semiáridas en las que predominan los carbonatos y yesos. Los granos de minerales que encontramos originalmente en un suelo dependen del tipo de roca original, ya sea ígnea, sedimentaria, etc.

El tamaño de las partículas en cada horizonte está muy relacionado con su grado de meteorización, por lo que habrá una relación entre las fracciones granulométricas y la mineralogía de esos componentes. Las propiedades físicas y químicas del suelo están controladas por la fracción arcilla (los granos más finos). La fracción arena y limo reflejan la mineralogía de los materiales geológicos de los que procede el suelo. El estudio microscópico de la fracción arena gruesa tendrá utilidad en el estudio de la génesis del suelo, por lo que podremos conocer cuál era la roca madre, la procedencia de los minerales, el grado de meteorización y de evolución del suelo (a mayor cantidad de meteorización y más evolución aparece menos cantidad de fracción gruesa).

Los componentes arena y limo varían mucho de un suelo a otro y se encuentran controlados por el tipo de material original y las condiciones del medio, sobretudo el clima. El hecho de que los distintos tipos de rocas estén formadas por una pequeña variedad de minerales hace que el número de los mismos que encontramos en el suelo sea también pequeño (de 20 a 25 minerales, aunque son muy frecuentes los suelos con menos de 10). Los minerales más abundantes son los silicatos, minerales de la arcilla, feldespatos, micas, cuarzo, anfíboles, piroxenos, óxidos de Fe, calcita y yeso.

Todos estos minerales de la fracción gruesa se estudian al microscopio óptico. Cuando los granos están formados por más de un mineral, pueden ayudarnos a reconocer el tipo exacto de roca original, aunque podemos llegar a tal tipo de reconocimiento incluso con el estudio de granos aislados. La mineralogía de la fracción gruesa (arenas) nos informa sobre la reserva de nutrientes del suelo en función de la composición química de los minerales de ese suelo (así un suelo de cuarzo carece por completo de nutrientes).

Características de los minerales de la arcilla

El término arcilla se utiliza para designar minerales con un tamaño de partícula muy pequeño, la mayoría pertenecen al grupo de los filosilicatos, aunque un cuarzo de tamaño similar también debería considerarse una arcilla. Pueden tener tres orígenes:

- ◇ Heredado: si tiene micas (arcilla micácea).
- ◇ Transformado de minerales resistentes (illita!vermiculita).
- ◇ Neoformado: precipitado de los productos de meteorización de otros minerales.

Los minerales de la arcilla influyen por completo en las propiedades físicas y químicas del suelo según su proporción, su tamaño de partícula, alta superficie específica y porque pueden intercambiar cationes con el medio (CIC:capacidad de intercambio catiónico).

Estructura de los filosilicatos

La subclase de los filosilicatos está marcada por la presencia de tetraedros de SiO_4 que se polimerizan por la unión de sus tres vértices formando láminas pseudo hexagonales de extensión infinita. El grupo aniónico que funciona como base estructural es el $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{(2-)}$.

En las distintas láminas el Si puede estar sustituido parcialmente por Al, pudiendo alcanzar el 50% de sustitución (porque la unión Al-Si-Al tiene distinta energía potencial que la unión Si-O-Si). Debido a tal sustitución las láminas pasa a llamarse tetraédricas (de siloxana) y son totalmente polares, con todos sus Si en el mismo plano.

En todos los filosilicatos las capas tetraédricas se unirán a otra agrupación atómica en forma de lámina formada por cationes de Fe, Mg y Al, que se encuentran en coordinación octaédrica con grupos OH^- y átomos de O_2 , que en su conjunto forman la capa octaédrica. Un tetraedro

de la capa tetraédrica se une con un octaedro de la octaédrica perdiendo la primera un grupo OH⁻ y aportando la segunda un grupo OH⁻.

Grupos bilaminares (OT)

En la naturaleza encontramos dos minerales con estructura de capa octaédrica:

- ◇ Gibsita (Al₂(OH)₆): el Al se encuentra en el centro del octaedro rodeado por grupos OH⁻. A los filosilicatos con capas octaédricas de este tipo se les llama dioctaédricos.
- ◇ Brucita (Mg₃(OH)₆): todas las posiciones octaédricas se encuentran ocupadas por el Mg trivalente, por lo que a los filosilicatos con estas capas octaédricas se les llama trivalentes o trioctaédricos.

Los filosilicatos más sencillos se componen de una capa tetraédrica (T) y una octaédrica (O), son los filosilicatos T:O o 1:1. Estas capas son eléctricamente neutras, sin ningún tipo de carga residual y se unen mediante fuerzas de Van der Waals. También se les llama bilaminares y podrá haber bilaminares trioctaédricos y dioctaédricos.

Grupos trilaminares (TOT)

Otro tipo de agrupación la constituyen dos capas tetraédricas y una octaédrica en medio. Son los llamados filosilicatos T:O:T, 2:1 o trilaminares. Estas capas también son eléctricamente neutras y se unen entre sí mediante fuerzas de Van der Waals.

Una característica importante de los filosilicatos es que cada lámina por separado está cargada eléctricamente, lo que controla la mayoría de sus propiedades, fundamentalmente el intercambio catiónico.

Generación de cargas

Las cargas están compensadas en la estructura, pero en ocasiones aparecen cargas residuales. La mayoría de los filosilicatos tendrán carga negativa, exceptuando algunos bilaminares de carácter anfótero. Dentro de las capas tetraédricas es posible la sustitución de Si por Al (sustitución isomorfa) lo que será responsable de descompensar la carga, ya que sustituimos un catión tetravalente por otro trivalente, generando así una carga residual.

En la capa octaédrica se pueden dar sustituciones isomorfas, por ejemplo de Al(3+) por Fe(2+) o Mg(2+), generándose así una carga residual en la lámina. Una lámina queda más fuertemente cargada cuando la sustitución se produce en la capa tetraédrica, ya que si se produce en la octaédrica, las capas tetraédricas son capaces de amortiguar la diferencia de carga.

Las estructuras que resultan de las sustituciones suelen ser estables a pesar de las alteraciones. Cuando se genera la carga en los minerales, se compensa con la introducción de cationes de intercambio (K⁺). Las cargas por sustituciones isomorfas con características de cada mineral concreto en función del número de sustituciones. Son de carácter permanente independientemente del ambiente y sus condiciones (carga permanente).

La carga por fórmula unidad varía de 0 a 2 (0=pocas sustituciones y 2=muchas sustituciones). Existe otro tipo de carga en los filosilicatos denominada carga variable y que se encuentra localizada en los bordes del cristal y se debe a la rotura de enlaces y a la disociación de los protones de los grupos OH⁻, por lo que es dependiente del pH. Los grupos OH⁻ coordinados con el Al podrán unirse a otros protones en condiciones de extremada acidez:

$\text{AlOH} + \text{AlO}^- + \text{H}^+$ (condiciones alcalinas)

$\text{AlOH} + \text{H}^+ + \text{AlOH}_2^+$ (condiciones ácidas)

Las cargas negativas de la lámina quedarán compensadas por la entrada de cationes en la interlámina ya que estos cationes pueden intercambiarse al no estar muy fuertemente unidos. Además se evita su pérdida por lavado debido a su posición interlamilar, actuando entonces como reserva catiónica. Pueden usarse como filtro de determinados metales o contaminantes, sirviendo a modo de depuradores.

Minerales del grupo de la Caolinita

Son aluminosilicatos bilaminares dioctaédricos pobres en sílice ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Los distintos tipos se diferencian por el orden en el que se apilan las capas (desorden turbostático) y por el grado de hidratación (n).

El desorden turbostático

Las láminas hexagonales pueden ordenarse unas sobre otras o bien caer giradas. La estructura más ordenada es la de la **caolinita**, que no tiene moléculas de agua ni desorden en su estructura. La más desordenada es la **halloysita**, que presenta dos moléculas de agua. Los minerales de este grupo apenas presentan sustituciones isomorfas, por lo que únicamente generan cargas de tipo variable.

La caolinita es de los pocos minerales que pueden llegar a tener carga positiva al no presentar sustituciones. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja debido a que su estructura tiene una carga muy pequeña ($\text{CIC} = 1-10$ moles+/Kg). Los suelos ricos en caolinita son muy poco fértiles, ya que uno de los parámetros que controla la fertilidad es la CIC. La caolinita presenta baja plasticidad, cohesión superficie específica ($5-20$ m²/g). Son características de suelos con alta meteorización y su formación se ve favorecida porque solo requiere Si y Al. También puede ser heredada debido a su estabilidad en el medio exógeno.

La halloysita tiene una CIC ligeramente superior ($5-40$ mol+/Kg) y presenta normalmente un aspecto tabular debido a que las láminas se enrollan sobre si mismas. Se forma por meteorización de calizas volcánicas y vidrios volcánicos.

Minerales del grupo de la Illita

Tienen una estructura de tipo trilaminar, con la fórmula $(\text{KA}_2(\text{AlSi})_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$.

El K se encuentra en coordinación 12 y su fijación a la interlámina es bastante fuerte, lo que se manifiesta por la no expansión de las láminas al mojarlas, por lo que no podrá intercambiarse con otros cationes. Las **illitas** tienen prácticamente la misma fórmula general que la **moscovita**, con la diferencia que en las illitas puede haber algo de sustitución del Al octaédrico por Fe y Mg. Además las illitas tienen menos K que las moscovitas.

El K no es intercambiable y no se encuentra disponible para las plantas, por lo que su CIC es baja ($10-40$ mol+/Kg). Pero el K se va liberando poco a poco de la estructura a medida que las illitas se meteorizan, por lo que los minerales de este grupo se consideran fuentes potenciales de K para las plantas.

Las arcillas de tipo illítico pueden aparecer en la mayoría de los suelos, siendo un

constituyente importante. Abundan en el medio exógeno y generalmente son heredadas o neoformadas.

Minerales del grupo de las Esmectitas

Minerales de tipo trilaminar que se diferencian del anterior grupo al tener un menor número de sustituciones isomorfas y menos densidad de carga. Esta menor carga implica una mayor CIC, porque los cationes estarán unidos con menor fuerza a la estructura siendo así fácilmente intercambiables.

El tipo de sustitución isomorfa determina el nombre del mineral, siendo el más frecuente la **montmorillonita**, que presenta una capa octaédrica con Mg. En la **beidellita** la carga se genera en la capa tetraédrica debido a sustituciones de Si por Al. Otro tipo de minerales frecuentes son los interstratificados, que presentan una alternancia en capas de esmectitas con illitas. Su estudio es muy complejo ya que la interstratificación puede ser muy variable.

Una propiedad destacable de este grupo es la capacidad de expansión y contracción por el humedecimiento y secado. Se debe a que los cationes interlaminares pueden hidratarse provocando una separación de las láminas de entre 12–15 Å. La CIC es de entre 80–150 mol+/Kg y su superficie específica es de unos 600–800 m²/g. Las esmectitas tienen además una elevada plasticidad y cohesión lo que les proporciona una alta actividad coloidal. Se generan por procesos de meteorización poco intensos y se pueden neoformar en un suelo siempre que existan medios ricos en Si, Fe y Mg con drenaje suficiente. El término de **bentotita** se aplica a las esmectitas formadas a partir de rocas volcánicas.

Minerales del grupo de las Vermiculitas

Minerales con estructura trilaminar muy similar a la de las micas, proviniendo muchos de ellos de la alteración de estas últimas. Se diferencian de las micas por su menor carga. Estas cargas se generan por sustituciones de Si por Al en la capa tetraédrica en un 0.6–0.9 por fórmula unidad, siendo compensadas parcialmente por sustituciones en la capa octaédrica de Fe(3+) por Mg(2+). La carga neta siempre será negativa.

El espacio interlaminares tiene generalmente átomos de Mg hidratados por lo que su sustitución se hace más sencilla al estar menos fuertemente unidos a las láminas. Las moléculas de agua que rodean al Mg están dispuestas en una capa superior y otra inferior.

Al igual que las esmectitas, las vermiculitas presentan procesos de expansión aunque en menor grado (12–13.5 Å), su CIC = 120–150 mol+/Kg y su superficie específica es de 600–800 m²/g. Aparecen en suelos con meteorización intensa, fundamentalmente a partir de rocas ígneas básicas. Así por ejemplo, la moscovita puede transformarse en una vermiculita si pierde el K en un medio rico en Mg (este proceso se conoce como vermiculitización), formándose enormes cantidades de interstratificaciones de tipo illita–vermiculita.

Las vermiculitas son minerales poco estables en el suelo por su fácil alteración.

Minerales del grupo de las Cloritas

Presentan una estructura de tipo 2:1:1, ya que en la zona de interlámina aparece otra capa octaédrica en lugar de una lámina de cationes (T:O:T:O).

Las variaciones composicionales son inmensas porque en ambas capas octaédricas pueden darse varias sustituciones, además de en las tetraédricas. En la capa octaédrica interlaminar habrá sustituciones de tal forma que se generará una carga neta positiva. Las cloritas con una capa interlaminar de tipo brucítico (con Mg) se denominan cloritas primarias, porque se componen fundamentalmente de materiales originales. Las cloritas gibsíticas (con Al) se llaman cloritas secundarias ya que se forman principalmente por meteorización. Es frecuente la aparición de minerales interestratificados.

La estructura no es de tipo expansible y su CIC es baja porque la capa octaédrica interlaminar no es intercambiable (10–40 mol+/Kg) y su superficie específica tiene un valor de entre 70–150 m²/g. La clorita es un mineral poco frecuente en los suelos debido a su poca estabilidad.

Minerales fibrosos de la arcilla

Básicamente son dos minerales (**poligorskita** y **sepiolita**) y tienen estructuras radicalmente diferentes al resto de minerales. Consta de alternancias en las posiciones de los tetraedros, de modo que se disponen 4 tetraedros con el oxígeno apical hacia arriba y otros 4 hacia abajo. De esta manera se forman columnas quedando grandes huecos en la estructura, lo que confiere a estos minerales un aspecto fibroso en lugar de laminar. Los huecos pueden albergar agua y cationes intercambiables.

Poligorskita

Es un silicato de Mg y Al hidratado debido a que en los huecos se alojan moléculas de agua. Pueden aparecer pequeñas cantidades de Fe. La estructura en cadenas con grandes cavidades hace que tenga una elevada superficie específica (250–400 m²/g).

Tienen gran aplicación en la industria debido a su estructura. Aunque son minerales poco frecuentes en el suelo tienen gran importancia en la formación sobre rocas sedimentarias de origen lacustre (Cuenca de Madrid).

Sepiolita

Muestra una alternancia de 6 tetraedros. En los huecos se alojan moléculas de agua y cationes intercambiables. Sus propiedades y ambientes de formación son similares a los de la poligorskita.

Aluminosilicatos amorfos y paracrystalinos

Son dos tipos de minerales, la Alófana y la Imogolita. Se empezaron a estudiar en suelos desarrollados sobre material volcánico.

Alófana

Término genérico que describe aluminosilicatos altamente desordenados o amorfos. La estructura tiene forma de una serie de esferas huecas de entre 3.5–5.5 nm de diámetro. Su composición química es muy variable y se habla en concreto de una serie de mineraloides, no de minerales. Es una solución sólida de Si, Al y agua. Presenta una gran superficie específica y una CIC bastante alta, aunque depende mucho del pH al ser su carga variable.

Los suelos con alófana retienen gran cantidad de agua porque se hidrata en una proporción

cercana al 100% de su peso. Generalmente se seca de forma poco reversible. Presenta tixotropía, propiedad que hace referencia a la licuefacción que presenta al ejercer cierta presión sobre el material (se comporta como un fluido).

Imogolita

Es un neosilicato formado por tetraedros aislados y con una estructura paracristalina que forma finos tubos con varios nm de lado. Sus propiedades son muy similares a la de la alófana, desarrollándose muy fácilmente sobre suelos volcánicos.

Zeolitas

Conjunto de minerales pertenecientes a los tectosilicatos, con polimerización total de sus tetraedros. Son aluminosilicatos en los que existe sustitución de Si por Al y la compensación de cargas resulta de la entrada de cationes alcalinos y alcalinotérreos. Se caracterizan por la elevada presencia de agua.

Los tetraedros forman una red que genera una gran cantidad de cavidades y sistemas de canales conectados entre si. Las propiedades y el comportamiento de las zeolitas dependen del sistema de canales. Su utilización medioambiental es como tamices moleculares, ya que retienen a ciertos cationes pero dejan pasar a otros (el material contaminante quedaría atrapado debido a su composición atómica).

También son capaces de absorber agua de forma reversible y tienen una CIC de entre 100–300mol+/Kg. Presentan cationes intercambiables de Ca, Na y K. Su génesis está relacionada con la de las arcillas y se forma con bastante facilidad a partir de cenizas y vidrios volcánicos, aunque también se forman en abundancia en zonas sedimentarias.

Óxidos e Hidróxidos

Como resultado de la meteorización de las rocas se liberan átomos de Fe, Al, Mn, etc. que en el ambiente exógeno dan lugar a la neoformación de óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos que podrán ser cristalinos, paracristalinos o amorfos (rojos, verdes y marrones, respectivamente).

Su estudio es muy complejo debido a su caracterización mineralógica amorfa, carecer de estructura cristalina y no difractar. Tienen una alta CIC y su % en el suelo es de elevada importancia. Son elementos cromóforos de distinta coloración dependiendo de su estado de oxidación. Pueden ser de color negro debido a su contenido de materia orgánica. Generalmente aparecen asociados a las arcillas y formarán agregados con ellas. Pueden formar capas cementadas (encrostramientos) si se presentan en gran cantidad. Los principales óxidos e hidróxidos son de Fe, Mn y Al.

Celestina

Es un mineral formado por sulfato de estroncio (SrSO_4) que aparece en determinados medios edáficos. Forma nódulos en suelos ricos en yeso. Es un mineral de neoformación.

Baritina o Barita

Es un mineral formado por sulfato de bario (BaSO_4) que suele ir asociado a condiciones de hidromorfía si tenemos una capa freática salina.

Pirita

Es un mineral formado por sulfuro de hierro (FeS_2) asociado a medios fuertemente reductores. Aparece en forma de agregados redondeados denominados framboides (forma de frambuesa). Es fácilmente oxidable si el ambiente del horizonte reductor pasa a oxidante, dando entonces lugar a sulfatos.

Jarosita

Es un mineral formado por sulfato hidratado ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$) que aparece en horizontes oxidados, típico de marismas y rías drenadas.

Apatito

Es el mineral más común en suelos ricos en fósforo. Predomina en los suelos ya desarrollados junto con las arcillas.

Calcita y Yeso

Aparecen en zonas áridas y semiáridas en proporciones de hasta un 60–70%, pero incluso en proporciones inferiores, ambos minerales tienen mucha influencia en el suelo (por ejemplo en la respuesta vegetal). En estos suelos los minerales de la arcilla suelen ser heredados y pueden aparecer:

Carbonatos

Principalmente calcita, dolomita y ankerita, carbonatos de Ca y Mg que se disuelven fácilmente en agua siempre que contenga CO_2 , ya que se convierte en un agua ácida agresiva para los carbonatos. El carbonato se disuelve y se moviliza por todo el perfil. Como la actividad biológica del suelo produce elevadas cantidades de CO_2 , los carbonatos serán bastante móviles. Pueden ser heredados de rocas carbonatadas o neoformados en un medio rico en bicarbonato o calcio.

Yeso

Su propiedad característica es su elevada solubilidad en agua pura (2.6 g/l). En condiciones normales su solubilidad es mayor a la de la calcita, aunque menor que las sales.

El yeso se deshidrata con facilidad dando lugar a anhidrita y cuando precipita forma principalmente cristales lenticulares y porfidoblásticos, aunque el yeso fibroso cristaliza en forma de filones y su origen es siempre heredado. En los suelos con yeso la cantidad, forma y características del empaquetamiento de los cristales condiciona las propiedades físicas de dichos suelos: si aumenta la proporción de yeso aumenta la resistencia del horizonte frente a la penetración de las raíces, por lo que horizontes con más de un 60% en yeso son estériles para las plantas debido a su mayor compactación, sobretodo si están secos. La baja capacidad de retención de agua y la ausencia de nutrientes también limita la aparición de las plantas.

Generalmente reflejarán condiciones de aridez o semiaridez, aunque el yeso puede ser heredado de sedimentos evaporíticos. La disolución continuada del yeso en un mismo punto puede producir colapsos (estructuras cársticas). En estos medios áridos y semiáridos también pueden aparecer sales más solubles que el yeso (ClNa , Cl_2Mg , Na_2SO_4 y otras más complejas). La solubilidad de estas sales es de entre 250–400 g/l y su presencia provoca la

inhibición del crecimiento vegetal en el suelo.

Tema 11. Componentes orgánicos del suelo.

Los suelos minerales se forman a partir de materiales sin materia orgánica, pero posteriormente se incorporará y tendrá un papel importante aun siendo un componente minoritario. Aparecerá en mayor o menor medida en todos los suelos. Interviene de forma activa en la formación del suelo, condiciona su comportamiento en relación con las plantas y microorganismos del suelo ya que tiene gran influencia en el movimiento y almacenamiento del agua, influye en el intercambio catiónico y además es una fuente importante de nutrientes.

Dentro de la materia orgánica de un suelo se distingue:

- ◇ **Materia orgánica no humificada:** compuesta por la biomasa animal y vegetal que se transforma por la actividad microbiana.
- ◇ **Humus:** dentro de él distinguimos a su vez:
 - ◇ Sustancias no húmicas: incluyen todos los materiales orgánicos con características químicas identificables (azúcares, aminoácidos, polisacáridos y proteínas). La mayoría son fácilmente biodegradables, por lo que presentan una vida corta dentro de los suelos.
 - ◇ Sustancias húmicas: no presentan características físicas y químicas definidas (fórmula química, punto de fusión, etc.). Proporcionan el color oscuro al suelo y tienen carga negativa, además tienen carácter ácido, son hidrófilos y químicamente complejos, con un elevado peso molecular. Son compuestos relativamente oxidados y estables a la biodegradación que se generan en el propio suelo por la transformación de otros materiales.

El contenido en carbono orgánico de un horizonte es un dato muy útil que muestra la acumulación de materia orgánica, lo que es un criterio importante para la clasificación de los horizontes (Hístico=20–30% de m.orgánica). El % en C orgánico de un suelo permite diferenciar suelos minerales de suelos orgánicos. Otra medida importante es la relación C/N lo que proporciona una idea del grado de descomposición de la materia orgánica (en suelos agrícolas C/N=8–14). Existen 4 fuentes de la materia orgánica:

- ◆ Acumulación de restos y residuos de plantas y animales.
- ◆ Descomposición de tejidos orgánicos por acción mecánica de la fauna y los microorganismos.
- ◆ Degradación o descomposición de moléculas orgánicas complejas a otras más sencillas. Este proceso se llama biodegradación si en él intervienen los microorganismos.
- ◆ Reorganización de algunos productos de degradación, sintetizándose otros nuevos.

Cuantitativamente, la mayor parte de la materia orgánica del suelo procede de los vegetales y el resto de animales. Los tejidos vegetales se componen en un 75% de agua y un 25% de materia seca, de la cual un 10% son compuestos minerales y el resto compuestos orgánicos. A nivel de elementos químicos, los compuestos orgánicos estarán formados por orden de importancia por H, C y O; constituyendo aproximadamente el 90% de los tejidos vegetales. El 10% restante se corresponde con N, S, P, K, Ca, y Mg.

Estos elementos químicos están integrados en las estructuras de hidratos de C (30–80%), ligninas (10–30%), proteínas (1–15%) y ceras, grasas y resinas (1–8%). Diferenciamos tres etapas sucesivas en la transformación de los compuestos orgánicos:

- ◆ **Transformación inicial:** alteración de los restos vegetales en su composición y estructura antes de caer al suelo (hojas y tallos atacados por microorganismos en el mismo árbol).

Consiste en la pérdida de sustancias orgánicas y elementos minerales.

- ◆ **Acumulación y destrucción mecánica:** la hojarasca, ramas, etc. se acumulan en el suelo y se degradan poco a poco por la acción mecánica de animales que reducen el tamaño de los residuos, mezclándose entonces con la fracción mineral.
- ◆ **Alteración química:** se produce una intensa transformación de los materiales orgánicos, que se mezclarán con los materiales del suelo y se infiltrarán. Los restos orgánicos perderán rápidamente su estructura celular y se convertirán en un material amorfo cada vez más negro de composición totalmente distinta a la original. Poco a poco, los restos se desintegrarán y se introducirán en los distintos niveles del suelo, entrando en contacto íntimo con la fracción mineral.

Sustancias húmicas

Pueden tener dos orígenes:

- ◆ Degradación química y biológica de los residuos y restos de plantas y animales.
- ◆ Actividad de síntesis de los organismos del suelo.

Ambos procesos hacen que la materia orgánica original se transforme en unos compuestos más estables en el suelo. Se puede producir una descomposición de la materia orgánica no humificada, lo que conlleva que un 60–80% del C orgánico del suelo sea devuelto a la atmósfera en forma de CO₂, debido al proceso de la mineralización (proceso que tarda aproximadamente 1 año).

Tal mineralización consiste en la transformación de un elemento desde una forma orgánica a una inorgánica gracias a la actividad de los microorganismos. Además de producirse CO₂ se liberan elementos minerales solubles como los nitratos y fosfatos. Los iones minerales liberados podrán ser asimilados por las plantas. Hay por tanto dos procesos contrapuestos:

◇ Humificación: responsable de la acumulación de materia orgánica en el suelo.

◇ Mineralización: responsable de la destrucción de la materia orgánica.

Dependiendo de las características de cada suelo y del tipo de materia orgánica predomina uno de los dos procesos, pero siempre se darán conjuntamente en mayor o menor medida. Así, la materia orgánica total de un suelo en un momento dado será la diferencia entre la masa total recibida y la biomasa mineralizada.

El carbono orgánico no mineralizado comienza un proceso de oxidación más lenta, sufriendo profundas transformaciones hasta ser incorporado por sustancias húmicas o formar parte de la biomasa microbiana. Tal biomasa está formada por microorganismos menores de $5 \times 10^3 \text{ m}^3$ que intervienen en los procesos de humificación responsables de la formación de compuestos no sintetizables por las células vivas. La humificación puede ser rápida si la materia orgánica es sencilla en composición y más lenta cuando interviene la biomasa microbiana.

Independientemente de la velocidad del proceso el producto final serán sustancias húmicas y la proporción de las mismas en el suelo dependerá de factores internos (compuestos químicos de restos vegetales) y externos (tipo de microorganismos, textura del suelo, pH, etc).

Los elementos precisos para el metabolismo vegetal son tomados en forma mineral por las raíces, por lo que si no existiera un ciclo biogeoquímico de renovación de la materia mineral los suelos se volverían estériles rápidamente.

Naturaleza de las sustancias húmicas

Se estudian separándolas unas de otras mediante su fraccionamiento basado en la solubilidad que tienen en medios ácidos y alcalinos. Las técnicas de separación no permiten aislar compuestos químicos únicos sino que separan mezclas de compuestos con propiedades similares y un mismo comportamiento ante los mismos reactivos. De forma empírica se dividen en ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas:

- ◇ **Ácidos fúlvicos:** se comportan de igual manera antes reactivos alcalinos, pero no precipitan en HCl ya que son solubles en él.
- ◇ **Ácidos húmicos:** se pueden separar con reactivos alcalinos, pero no son solubles en HCl.
- ◇ **Huminas:** compuestos extremadamente difíciles de aislar.

Características de las sustancias húmicas

Son sustancias amorfas de carácter ácido muy polimerizadas ($P_m=10.000-50.000$ g/mol), que presentan un núcleo de carácter aromático unido a una serie de grupos reactivos en la periferia responsables de sus propiedades. También puede haber cadenas alifáticas.

Las características y la naturaleza de las sustancias húmicas están relacionadas con los parámetros ambientales del suelo. El humus tiene carga eléctrica negativa que dependerá del pH, por lo que se trata de una carga variable originada por la rotura en los bordes de las moléculas y en los grupos funcionales. Básicamente ocurre una disociación o unión de protones al grupo hidroxilo (OH^-), carboxilo (COOH^-), amino (NH_2^-) o fenólico ($\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$).

Estas sustancias húmicas hacen que el suelo tenga un poder tamponador además de una elevada CIC dependiente del pH ($100-300$ mol⁺/Kg) y superficie específica ($800-900$ m²/g).

Tipos de humus

Se clasifica en tres tipos en función de su grado de evolución:

- ◇ Mor: la materia orgánica está poco transformada.
- ◇ Moder: la materia orgánica está algo más evolucionada.
- ◇ Mull: materia orgánica muy evolucionada. El horizonte es de color negro y muy rico en ácidos húmicos.

Interacciones entre los compuestos orgánicos e inorgánicos

Estas interacciones dan lugar a la formación de complejos organominerales que se establecen con dos tipos de materia orgánica:

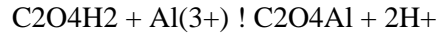
- ◇ Materia orgánica viva: la fracción biótica del suelo.
- ◇ Materia orgánica coloidal no viviente: la fracción abiótica del suelo.

Las interacciones más importantes se producen con la fracción abiótica del suelo y afectan al humus. La asociación entre los componentes orgánicos e inorgánicos tiene lugar en dos etapas:

- ◆ Se produce una mezcla mecánica por bioturbación controlada por la fauna del suelo. Posteriormente los micelios de los hongos entrelazarán las partículas de arena y limo.
- ◆ Se establecen uniones entre la materia orgánica y la inorgánica mediante enlaces químicos, formándose complejos organominerales y quelatos.

La expresión de complejo organomineral hace referencia al resultado de una reacción química

llamada complexación en la que se une un anión complexante (parte orgánica) y un determinado elemento mineral del suelo (ión):



Los grupos funcionales de la materia orgánica van a tener distinta afinidad por los iones metálicos. Al anión complexante se le llama ligando. Cuando tenemos 2 o más grupos funcionales orgánicos de un mismo ligando coordinados con un ión metálico se forma un anillo llamado quelato. La estabilidad de los complejos organominerales depende del tipo de enlace que exista entre la fracción mineral y la parte orgánica:

- ◇ Enlace iónico: complejo estable.
- ◇ Puente de H: complejo débil.

Los complejos organominerales se clasifican en:

- ◇ **Complejos arcillo–húmicos:** se produce la unión de un mineral de la arcilla con la materia orgánica. La unión puede darse entre minerales de la arcilla con carga negativa y grupos funcionales de carácter catiónico, o bien entre minerales de la arcilla con carga positiva y grupos funcionales aniónicos. También puede darse la unión entre minerales de la arcilla con carga negativa y grupos funcionales aniónicos si entre ellos existen cationes.
- ◇ **Complejos organo–metálicos:** se produce la unión de la materia orgánica con los metales. Tienen importancia medioambiental porque hay muchos elementos químicos con poder contaminante capaces de formar estos complejos.

Propiedades principales de la materia orgánica

A) Propiedades físicas

- ◇ Proporciona un color oscuro al suelo.
- ◇ Proporciona una estructura estable al suelo ya que las sustancias húmicas tienen un gran poder aglomerante que ejercen sobre la materia mineral, produciendo flóculos. Aparecen entonces estructuras favorables para el suelo.
- ◇ Proporciona al suelo una gran retención de agua, lo que favorece el asentamiento de la vegetación.
- ◇ Aumenta la temperatura del suelo, ya que el color negro absorbe más radiación.
- ◇ Protege al suelo frente a la erosión gracias a que los restos vegetales y animales de la superficie lo protegen de la erosión eólica e hídrica y el humus hace de aglomerante de las partículas.
- ◇ Protege al suelo de la contaminación porque la materia orgánica es capaz de absorber elementos de tipo contaminante, evitando que lleguen a los acuíferos.

B) Propiedades químicas

- ◇ Las sustancias húmicas tienen propiedades coloidales debido al pequeño tamaño y elevada carga. La fase coloidal interacciona con las soluciones del suelo y las raíces.
- ◇ Presentan una elevada CIC, por lo que son una buena reserva de nutrientes.
- ◇ Influyen en el pH del suelo, ya que tienden a acidificarlo.
- ◇ La materia orgánica es un agente de alteración del suelo por su carácter ácido.

C) Propiedades biológicas

- ◇ La materia orgánica es un aporte importante para todos los microorganismos que viven en el suelo, así como una fuente de energía.

IV. Propiedades Físico–Químicas del suelo

Tema 12. Propiedades químicas del suelo

Los elementos químicos que nos encontramos en el suelo pueden encontrarse en tres posiciones distintas:

- ◇ En la fase sólida: estos elementos están inmovilizados en las estructuras minerales.
- ◇ En la interfase sólido-líquida: los elementos se sitúan en la superficie de las partículas o en su área de influencia. Están unidos a la superficie por enlaces químicos.
- ◇ En la fase líquida: el agua presenta elementos en solución además de partículas sólidas. Estos iones de las soluciones del suelo precipitan cuando éste se seca y vuelven a la solución cuando se moja.

La reacción de un ión con el agua se llama hidratación y consiste en que el ión queda rodeado por moléculas de agua. Las reacciones de hidratación son importantes porque los iones hidratados se unen con menos fuerza a la superficie de las partículas. Los elementos de la fase líquida presentan una gran movilidad entre los horizontes del suelo (translocación) y pueden salir de los mismos (lixiviación). La concentración de iones en el suelo es baja, excepto en los suelos salinos.

Fenómenos de adsorción

La adsorción se define como la asociación de la materia (átomos, moléculas e iones) a la superficie de un determinado sólido. Se produce en la interfase sólido-líquida y aparecen distintos tipos de enlaces:

- ◇ Fuerzas entre moléculas sin carga: las adsorciones se producen mediante fuerzas de Van der Waals y puentes de H.
- ◇ Fuerzas entre iones y átomos: intervienen enlaces iónicos y covalentes.

Los materiales sobre los que se produce la adsorción son los minerales de la arcilla y los compuestos orgánicos. Los procesos de adsorción se producen por la interacción de la carga de la superficie de estos compuestos y los iones de la disolución.

Carga de los sólidos

La carga puede proceder de:

- ◇ La estructura de un mineral: entonces es independiente de las condiciones ambientales y se denomina carga permanente, donde las sustituciones son isomorfas.
- ◇ De la rotura en los bordes y los grupos funcionales superficiales del mineral, son cargas variables dependientes del pH.

Las cargas variables son importantes si tenemos una elevada superficie específica, por lo que las arcillas presentan una gran cantidad de estas cargas, ya que su tamaño de grano es pequeño y son planas. Los óxidos e hidróxidos también presentan una gran cantidad de cargas variables. Son importantes cuando tenemos grupos OH⁻ en la superficie de los cristales, ya que generan fácilmente H⁺ en medios ácidos y se disocian en medios básicos.

En los compuestos orgánicos también se generan cargas por la disociación de grupos OH⁻ o la unión de H⁺ a grupos funcionales (hidroxilo, carboxilo, amino y fenólico).

Variación de la carga con el pH

- ◇ A pH ácido: tenemos cargas positivas permanentes y cargas negativas variables. La

carga global es positiva si la carga positiva aumenta y la negativa disminuye. La carga global es cero en el punto isoeléctrico.

- ◇ A pH básico: tenemos cargas permanentes y otra cantidad de cargas dependientes del pH, generándose grandes cantidades de cargas negativas.

Complejos de superficie

Es el resultado de la unión de un grupo funcional de la superficie de la partícula con un ión o una molécula de la solución. Podemos tener dos tipos:

- ◇ Complejos de esfera interna: el ión de la solución que forma el complejo no está hidratado. Son estables porque la unión entre el ión y la superficie es de tipo iónico o covalente.
- ◇ Complejos de esfera externa: el ión se encuentra hidratado y se produce un enlace electrostático, con menos fuerza que uno iónico o covalente.

En los complejos de esfera interna la adsorción es de tipo específica porque depende de las configuraciones electrónicas de los grupos funcionales y del ión no hidratado. En los complejos de esfera externa la adsorción no es tan específica, siendo el ión bastante variable.

Distribución de iones en un sistema arcilla-agua

Los enlaces electrostáticos con los iones hidratados en complejos de esfera externa presentan una elevada variabilidad en el tipo de ión. Los iones hidratados compensan las cargas de la arcillas pero no están situados en una posición fija en la superficie de las mismas.

Los cationes de la solución están sometidos a dos tipos de fuerzas:

- ◇ Atracción del campo eléctrico creado por la superficie de la arcilla cargada negativamente.
- ◇ Los cationes tienden a difundirse desde la superficie de la lámina de la arcilla hacia la solución exterior al existir un gradiente de concentración.

A una determinada distancia de la superficie de la partícula se igualan las concentraciones de cationes y aniones, lo que permite establecer dos zonas:

- ◆ Doble capa difusa: zona de influencia de la partícula.
- ◆ Solución exterior: donde se igualan ambas concentraciones.

El espesor de la doble capa difusa es tanto menor cuanto mayor es la valencia de los iones y cuanto mayor sea la concentración de la solución externa. La doble capa se ve afectada por la capa de los iones intercambiables, así como por la concentración de la solución exterior y la humedad del suelo. Esto presenta ciertas limitaciones ya que la concentración de iones es alta porque:

- ◇ El modelo asume que los iones son cargas puntuales, y no lo son.
- ◇ El modelo asume que no existen interacciones entre los iones de la solución.

Teorías sobre la doble capa

- ◇ Doble capa rígida (Helmoltz): los iones de la solución del suelo son fuertemente atraídos sobre la superficie descompensada de las partículas, formando una capa rígida de signo contrario al de las partículas.
- ◇ Capa difusa (Gouy): los iones de la solución del suelo son fuertemente atraídos sobre la superficie descompensada de las partículas, formando una nube. Los iones son más fuertemente retenidos conforme más próximas se encuentran las partículas.

- ◇ Capa rígida y difusa (Stern): los iones de la solución del suelo son fuertemente atraídos sobre la superficie descompensada de las partículas. Los inmediatamente próximos son fuertemente retenidos formando una capa rígida, mientras que los más alejados quedan menos retenidos formando una nube.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se define como el número de moles de iones positivos que se adsorben y pueden ser intercambiados por unidad de masa seca del suelo bajo condiciones estándar. Se expresa en mol+/Kg y depende de factores como la carga superficial del mineral, de su superficie específica y de la cantidad de cargas permanentes y variables.

Como la carga negativa neta de una partícula procede de las cargas permanentes y variables, la CIC está determinada por el pH. Así el valor de la CIC de un suelo ácido será menor que el de otro con una solución tampón, por lo que la CIC se determina a pH 7 u 8.2. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) es la CIC a un determinado pH del suelo con una solución que no sea tampón.

Tipos de cationes intercambiables

Los cationes intercambiables más abundantes son $\text{Ca}(2+)$, $\text{Mg}(2+)$, $\text{Na}(+)$, $\text{K}(+)$, $\text{Al}(3+)$, $\text{NH}_4(+)$, $\text{H}(+)$ y $\text{Li}(+)$. Proceden de:

- ◇ La meteorización de las rocas.
- ◇ Los procesos de mineralización de la materia orgánica.
- ◇ Aportes externos de soluciones que circulan por el suelo.

La presencia o predominio de unos cationes u otros está condicionada por el medio. No existe una secuencia de adsorción que tenga una validez general, aunque una secuencia típica para la adsorción de cationes es:



Reacciones de intercambio catiónico

Las reacciones de intercambio catiónico presentan ciertas características:

- ◇ Son casi siempre reversibles.
- ◇ Son estequiométricas.

La presencia de superficies cargadas en cualquier tipo de partículas va a suponer que existen iones de carga contraria compensándola. Estos cationes están generalmente hidratados, formando complejos de esfera externa en la superficie, por lo que son intercambiables. En estos procesos de intercambio definimos:

- ◇ Materiales adsorbentes: son componentes del suelo que acumulan material en su superficie formando complejos de esfera interna o externa.
- ◇ Cambiadores: componentes del suelo en cuyas superficies se acumulan iones de forma reversible porque en ellos se forman complejos de esfera externa (arcillas y materia orgánica).
- ◇ CIC: propiedad de un cambiador para adsorber los cationes de la fase líquida formando complejos de esfera externa. A la vez que adsorben los cationes se produce la destrucción de complejos de esfera externa, por lo que se establece un equilibrio dinámico entre los cationes de la solución externa y los cationes que ocupan sedes de intercambio.

Las sedes de intercambio son las posiciones de la superficie del cambiador en las que se establece el enlace que da lugar a un complejo de esfera externa. Así, una sede de intercambio será ocupada progresivamente con distinta probabilidad por diferentes cationes en función de la concentración de esos cationes en la solución exterior. Esta posibilidad de intercambio catiónico tendrá un efecto importante en el comportamiento del suelo:

- ◇ Controla la disponibilidad de nutrientes por las plantas.
- ◇ Interviene en los procesos de floculación y dispersión de las arcillas y así tienen importancia en la formación de agregados.
- ◇ Determinan el papel del suelo como depurador natural ya que permiten la retención de determinados elementos contaminantes.
- ◇ Son reacciones muy rápidas.
- ◇ Cumplen la ley de acción de masas, la dirección de la reacción está controlada por la cantidad de cationes.

El intercambio aniónico

Se produce en suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos o en suelo ácidos de zonas tropicales, o en general, en suelos en los que la carga de sus materiales sea variable. Es importante que exista una elevada concentración de óxidos de Fe y Al.

Los suelos de caolinita son propicios para que haya un intercambio aniónico porque es de los pocos minerales de la arcilla que tiene toda su carga variable, y en condiciones ácidas presenta carga positiva. Al aumentar la capacidad de intercambio aniónico disminuye la CIC.

La adsorción de aniones en el suelo puede tener efectos importantes en la nutrición de las plantas, ya que determinados compuestos como los sulfatos no estarán disponibles para tal nutrición.

Acidez y Basicidad del suelo

El término reacción de un horizonte hace referencia al grado de acidez y basicidad de un suelo y se expresa mediante un valor de pH. Este término se utiliza más que el pH de un suelo.

La forma más habitual de determinar la reacción de un suelo es midiendo el pH en una suspensión de agua y suelo. El grado de acidez y basicidad está controlado por la cantidad y tipo de cationes adsorbidos en el suelo. Los efectos perjudiciales de la acidez se manifiestan a $\text{pH} < 5.5$, los cuales se encuentran relacionados con la toxicidad del Al y la baja abundancia de nutrientes. Los suelos con carbonato cálcico tienen un valor de $\text{pH} = 7.5 - 8.5$, usándose el término de suelo alcalino o sódico cuando el $\text{pH} > 8.5$.

El valor del pH del suelo afecta a las propiedades físicas y gaseosas del suelo, y condiciona el crecimiento vegetal. La movilidad de los elementos en el suelo varía en función del valor del pH, en la medida de que el suelo sea orgánico o mineral, aunque en general los elementos son más móviles a pH ácidos que básicos. La acidez de un suelo está condicionada por la presencia de $\text{Al}(3+)$, que es capaz de formar hidróxidos. Además, la presencia de H^+ en el suelo solo tiene importancia en condiciones de acidez ($\text{pH} > 4$), siendo su presencia característica de suelos orgánicos.

En general, la notación simplificada de la acidez de un suelo se hace en función de los protones, aunque realmente la acidez tiene su origen en la hidrólisis del Al. Los suelos presentan una determinada CIC, lo que hace que se comporten como tampones o mecanismos

de protección frente a variaciones bruscas de la acidez o basicidad. Debido a esto el poder tamponador de un suelo aumenta con el contenido de arcillas y materia orgánica (responsables de una elevada CIC). La capacidad de un suelo de actuar como un depurador natural está relacionada con esta capacidad tamponadora, ya que el suelo es capaz de admitir residuos dependiendo de su CIC.

Aireación del suelo

Las condiciones de aireación de un suelo van a depender de la eficacia que tenga ese suelo en el intercambio de gases con la atmósfera. La presencia de oxígeno resulta fundamental para la respiración de las plantas y de todos los organismos. Pueden darse dos situaciones:

- ◇ **Mala aireación del suelo:** se generan condiciones reductoras y se dan en suelos con un drenaje impedido o en suelos en los que la circulación de las aguas por medio de los poros sea lenta. Debido a esto, la entrada de oxígeno en el suelo va a ser progresivamente menor y el poco oxígeno disponible será utilizado por las plantas y los organismos, que son incapaces de renovarlo.
- ◇ **Buena aireación del suelo:** la composición de los gases del suelo presenta una analogía con la composición atmosférica (79% de N₂ y 21%/20% de O₂ o CO₂ respectivamente). Las cantidades de CO₂ y O₂ varían dependiendo de las condiciones de aireación.

Mecanismos de intercambio gaseoso

El intercambio de gases se produce en la interfase suelo-atmósfera, siendo su composición gaseosa idéntica siempre que ambos se encuentren en equilibrio. Tal equilibrio se rompe por el consumo de oxígeno por parte de las plantas y los microorganismos del suelo y la consecuente formación de CO₂. Tal actividad provoca que exista una distinta concentración de estos dos compuestos en la atmósfera que en el suelo, lo que causa una transferencia de gases entre ambos sistemas por tres mecanismos:

- ◇ Difusión de moléculas de gas: proceso debido a que se establecen gradientes de presión parcial en los gases de unos puntos a otros. La difusión es un mecanismo lento que se produce desde los puntos de mayor concentración hasta los de baja concentración, continuándose a lo largo del proceso hasta llegar a un estado de equilibrio.
- ◇ Flujo de masa de una mezcla de gases: el flujo de gases ocurre por gradientes de presión, cambios de temperatura o variación del volumen de los poros disponibles. Este mecanismo es importante en suelos de tipo expansible.
- ◇ Transporte de oxígeno disuelto en agua: el agua que circula por el suelo puede llevar oxígeno disuelto, permitiendo así la circulación de este gas.

El intercambio de gases se ve afectado por diversas causas:

- ◇ El grado de estructuración del suelo.
- ◇ Porosidad total del suelo.
- ◇ Distribución de la porosidad: si la porosidad está dentro de los agregados o entre los agregados, es decir, que tiene que existir permeabilidad para que se facilite el flujo de gases.

***Nota importante:** un suelo puede ser muy poroso pero tener una permeabilidad baja debido a que no existe comunicación entre dichos poros.

Química de los procesos rédox en el suelo

Los suelos van a contener una gran cantidad de especies químicas con diferentes estados de valencia u oxidación. Los estados de oxidación dependen de las condiciones del suelo, siendo las reacciones rédox reversibles y causantes de una diferencia de electrones entre las especies:

En el suelo existe un equilibrio entre los agentes oxidantes y reductores. La materia orgánica se encuentra reducida y tiende a oxidarse, es decir es reductora (cede electrones), debido que al oxidarse reduce a otros compuestos. El oxígeno es el aceptor de electrones más importante del suelo cuando las condiciones son aerobias, por lo que es el principal oxidante. También hay otros compuestos elementos con capacidad de reducirse u oxidarse en función del ambiente: Fe, Mn, S, N₂ y C.

Potencial rédox

Es un potencial eléctrico que mide de forma cuantitativa el poder oxidante o reductor de un sistema. Se expresa en función de un valor de referencia mediante un electrodo de H que tiene un potencial nulo. Cuando un sistema tiene un potencial rédox positivo las condiciones son oxidantes y viceversa.

Diagramas potencial rédox-pH (Eh-pH)

Las condiciones rédox de un suelo van a depender de la actividad de los electrones, es decir, del Eh y el pH. Además tales condiciones varían de forma lineal, por lo que la dependencia de Eh-pH se representa mediante una serie de gráficos llamados diagramas Eh-pH. En ellos se establecen campos de estabilidad para determinadas especies químicas y así se puede interpretar su comportamiento bajo ciertas condiciones. Informan por tanto de la movilidad de los elementos en el suelo.

Las especies con Fe y S se encuentran condicionadas por los valores de Eh-pH. Ambos elementos se combinan entre si para formar pirita (sulfuro de hierro) o jarosita (sulfato de hierro). La pirita es estable en un amplio rango de pH siempre que las condiciones sean reductoras, mientras que la jarosita requiere que las condiciones sean oxidantes y ácidas.

Tema 13. Propiedades físicas del suelo.

A) Textura del suelo

La granulometría de un suelo expresa las propiedades relativas de las distintas partículas de minerales con un tamaño inferior a 2 mm. Las diferentes proporciones se agrupan en clases de tamaños similares (fracciones granulométricas). Para estudiar la granulometría es necesario destruir los agregados del suelo.

La textura es una expresión sintética de las características granulométricas de cada horizonte. Los términos de granulometría y textura son sinónimos, siendo una característica muy estable del suelo. Las distintas fracciones utilizan una serie de valores límite para diferenciarse:

- ◆ **>2mm:** elementos gruesos. A partir de este tamaño las fuerzas de unión entre los granos actúan con dificultad, por lo que las partículas no se mantienen cohesionadas.
- ◆ **200 m:** límite superior para las arenas finas según el ISSS. Por debajo de este tamaño los granos formadores de las rocas originales aparecen separados. Esta fracción es de gran importancia para los estudios mineralógicos.
- ◆ **50 m:** límite superior para el tamaño limo según la USDA. El predominio de limos confiere a los suelos características físicas desfavorables, por lo que suelen ser poco estables.

- ◆ **20 m:** límite superior para el tamaño limo según el ISSS.
- ◆ **<2 m:** tamaño arcilla, con elevada CIC y superficie específica.
- ◆ **<0.2 m:** tamaño arcilla pero con comportamiento coloidal.

Clases texturales

Las distintas combinaciones de las proporciones de arena, limo y arcilla presentes en un horizonte se pueden agrupar en unas pocas clases texturales. Tales clases texturales proporcionan una idea de síntesis de la granulometría general de un suelo y son útiles para determinar sus características. En estas clases se prescinde de los contenidos en grava del suelo, estudiándose sólo las fracciones con un tamaño de grano <2mm.

Al establecer las distintas clases texturales se busca agrupar suelos con un comportamiento similar ante el agua y las plantas, fijando así límites de similitud entre los distintos suelos. Con estas clases también se considera que la importancia de ciertas fracciones es mayor que otras que se encuentran en su mismo %. Para representar las clases texturales se utilizan los triángulos de textura.

La cantidad de arcilla de un suelo es mucho más determinante para su comportamiento que el resto de las fracciones, lo que se pone de manifiesto en la denominación de las clases texturales:

- ◇ Con una pequeña cantidad de arcilla se utiliza el término aciloso en la caracterización del suelo.
- ◇ Con un 20% de arcillas se utiliza el término franco arcilloso.
- ◇ Para el contenido en limo no se utiliza el término limoso hasta que su presencia en el suelo no supere el 40%.
- ◇ Para las arenas se precisa de un 44% para utilizar el término arenoso, pero sus propiedades no se manifiestan hasta alcanzar el 70%.

Análisis granulométricos

Se realizan en el laboratorio mediante una segregación de las partículas agrupadas en las distintas fracciones. Para que los granos estén separados se requiere la destrucción de los materiales que los mantienen unidos en forma de agregados. Los resultados obtenidos se expresan de forma gráfica de distintas formas:

- ◇ Diagramas texturales.
- ◇ Diagramas representativos de un perfil.
- ◇ Diagramas semilogarítmicos.
- ◇ Diagramas circulares o de barras.

La importancia de las distintas fracciones se debe principalmente al tamaño, el número y la superficie específica de las partículas, la cual es muy importante para determinar la reactividad de un suelo. La superficie específica de una partícula varía de forma inversamente proporcional a su tamaño.

La acción de las distintas fracciones tiene una determinada significación según el predominio de una u otra:

- ◆ **Elementos gruesos:** disminuye la cohesión de los horizontes con arcilla, lo que favorecerá la penetración de las raíces. Si se encuentran en una proporción suficientemente elevada, la permeabilidad del suelo aumenta. Si se encuentran en la superficie frenan la erosión y las pérdidas de agua. Si son abundantes se dificulta la movilidad de los organismos y disminuye

la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes. Ejercen además un efecto abrasivo sobre la maquinaria y la deformación de las raíces.

- ◆ **Arena gruesa:** presentan una importante cantidad de macroporosidad, por lo que la permeabilidad suele ser alta. Los suelos suelen ser poco compactos y fáciles de labrar, con un almacenamiento bajo de nutrientes debido a su baja CIC. La capacidad de retención de agua también es baja.
- ◆ **Arena fina:** propiedades intermedias entre arena gruesa y tamaño limo.
- ◆ **Limo:** los suelos con limo pueden presentar costras superficiales y en ellos la infiltración de agua es lenta y su estructura poco estable. La permeabilidad será media o baja y su compactación media. La erosión es bastante alta, teniendo una capacidad media para el almacenamiento de agua y nutrientes.
- ◆ **Arcilla:** los suelos serán químicamente fértiles debido a su elevada CIC. La capacidad de retención de agua es elevada y la permeabilidad baja, ya que aunque muestran una elevada porosidad los poros no se encuentran comunicados. La compactación es alta, por lo que no serán fáciles de labrar y las raíces de las plantas no penetran con facilidad.

B) Estructura del suelo

Los granos que forman el suelo se van a poder unir de forma natural los unos a los otros formando unidades secundarias de mayor tamaño que muestran cierto carácter persistente. A estas unidades secundarias se les llama agregados y son el resultado de las alteraciones físico-químicas entre las partículas del suelo, la materia orgánica y los minerales de la arcilla.

La estructura del suelo depende directamente de la formación de agregados y de los huecos asociados a los mismos. Se habla de estructura como una propiedad del suelo, pero no lo es. Aparece en suelos secos de forma masiva.

En los agregados aparece material inerte que se corresponde con los granos de la fracción arena unidos entre si mediante la acción de la materia orgánica, arcillas y otros materiales cementantes. Los agregados se diferencian por los huecos o superficies de debilidad que presentan. Para estudiar la estructura de un suelo tenemos en cuenta:

- ◇ Las superficies de debilidad: cantidad y calidad del desarrollo de la estructura o pedialidad.
- ◇ La forma de los agregados: en función de la forma definimos el tipo de estructura y en función del tamaño definimos la clase.
- ◇ La dureza y fiabilidad de los agregados.
- ◇ La persistencia de los agregados: si son o no duraderos en el tiempo.
- ◇ Los espacios huecos: porosidad dentro y entre los agregados.

Un suelo se encuentra bien estructurado cuando se desmenuza con facilidad al estar seco, casi de forma espontánea. Un agregado verdadero debe ser estable frente al agua, es decir, la unión de sus partículas deben mantenerse después de ser humedecido. Los agregados pueden ser estables a largo plazo, aunque son frágiles porque pueden ser destruidos por el laboreo, cultivo, etc. La estructura del suelo va a controlar muchas de sus propiedades:

- ◇ Las características de la superficie del suelo: cuando aparece una buena estructura es difícil la formación de costras superficiales, que evitan la infiltración del agua. Una buena estructura del suelo hace que aumente la infiltración y que disminuya la escorrentía torrencial y, por tanto, el riesgo de erosión. Además aumentan las reservas de agua del suelo.
- ◇ Los huecos (porosidad): un horizonte que tenga buena estructura permite una buena circulación de agua, aire y nutrientes. Favorece también la presencia de organismos

aerobios y de fauna por el efecto feedback. Las raíces de las plantas penetran con facilidad.

- ◇ Compacidad del suelo: los suelos con una buena estructura son poco compactos y se favorece el laboreo y el crecimiento vegetal.
- ◇ Erosionabilidad: suelos con una buena estructura son menos susceptibles ante la erosión.

Niveles de organización estructural

Diferenciamos entre macroestructuras, o estructuras distinguibles en el campo, y microestructuras o estructuras de un tamaño más pequeño que sólo pueden apreciarse mediante el microscopio óptico. El grado de desarrollo de la estructura (pedialidad) se describe por distintos criterios (consideramos el suelo como seco):

◇ Suelos apediales: distinguimos a su vez:







- ◆ Los de estructura granular simple con granos sueltos. No suele haber granulometrías finas. Típica de suelos arenosos.
- ◆ Los de estructura continua o maciza: suelos en los que no se observan agregados. El suelo aparece como un bloque sin fisuras.
 - ◇ Suelos pediales: distinguimos a su vez:
- ◆ Con pedialidad débil: agregados escasamente formados y superficies de debilidad poco definidas.
- ◆ Con pedialidad moderada: agregados bien formados y diferenciados con una duración moderada.
- ◆ Con pedialidad fuerte: agregados muy bien formados y separados por planos de debilidad claramente formados.

Los agregados pueden tomar diversas formas:

- ◆ **Estructura laminar:** se produce cuando los agregados se desarrollan en las dos direcciones de la horizontal, con un desarrollo vertical mínimo. Estas estructuras suelen deberse a la presencia de materiales sedimentarios heredados que forman capas. La presencia de esta estructura impide la penetración de las raíces, el agua y el aire.
- ◆ **Estructura prismática:** cuando los agregados forman bloques en la vertical. Es típica de horizontes enriquecidos con arcilla. Los planos de debilidad que separan unos agregados de otros corresponden a grietas de retracción (parecidas a las que se forman en las charcas cuando se secan) que dan lugar a estructuras prismáticas.
- ◆ **Estructura columnar:** es parecida a la prismática pero los prismas están rematados en la parte superior formando una especie de cúpula. Típica de suelos alcalinos.
- ◆ **Estructura en bloques angulares:** los agregados son de forma polilédrica y están limitados por superficies más o menos planas con aristas bastante pronunciadas. Las caras de estos agregados se suelen ajustar bien a la de los agregados vecinos. Típica de horizontes ricos en arcilla.
- ◆ **Estructura en bloques subangulares:** son agregados de forma poliédrica que están limitados por superficies redondeadas, por lo que las caras de unos agregados no se ajustan bien a la de los otros. Típica de horizontes ricos en arcilla.
- ◆ **Estructura granular o granular compuesta:** los agregados apenas tienen poros en su interior y presentan forma redondeada, por lo que no se ajustan bien unos a otros. Aparecen por tanto horizontes poco compactos, aunque la compacidad individual de cada agregado es elevada. Es la estructura más favorable para el crecimiento de las raíces, típica de medios muy ricos en materia orgánica.
- ◆ **Estructura migajosa:** parecida a la granular pero los agregados son porosos y no compactos. Típica de horizontes con materia orgánica evolucionada (moll).

- ♦ **Sin estructura:** los agregados no han llegado a diferenciarse.

Cuando los agregados se encuentran por debajo de los 0.2mm hablamos de microestructura e incluso de estructuras ultramicroscópicas. La utilización de este límite no es arbitraria, porque las estructuras desarrolladas mediante agregados de tamaño menor serán poco eficaces para el movimiento del agua. Los niveles de organización distinguibles en una estructura son:

5mm		Agregado
200-100 m		Microagregado
50 m		Clusters o flóculos
1-5 m		Dominios
0.05 m		Cristales de arcilla
0.002 m		Líneas de arcilla

Mecanismos de formación de agregados

El origen de los agregados se encuentra en la carga eléctrica superficial de las partículas, la cual provoca unas fuerzas en la superficie responsables de las distintas interacciones que se producen entre los componentes del suelo con el agua, las partículas minerales y los grupos funcionales de la materia orgánica. Las uniones serán de tipo electrostático.

La fuerza de mayor importancia para la estabilización de las unidades en microagregados se debe al enlace entre la superficie de las arcillas y los distintos componentes del suelo. En los suelos con granos sin carga eléctrica la fuerza será mínima, produciéndose un empaquetamiento de los granos condicionado por la actividad de la fauna y la distribución de tamaños. Para un buen empaquetamiento el contacto entre los granos es importante, por lo que en ese horizonte no se podrán dar cambios de volumen.

En suelos arenosos puede existir algo de cohesión entre los granos gracias a las fuerzas de tensión superficial condicionadas por las películas de agua que hay entre los granos. Las fuerzas de atracción y repulsión entre los granos determinan la fábrica del suelo y aunque sea la arcilla la que controla la fábrica, se deben tener en cuenta las fracciones del resto de componentes.

La formación de los agregados se debe a una interacción prolongada de las diferentes partículas de arena con coloides o polímeros orgánicos y dominios de arcilla. En sistemas de agua-arcilla con predominio de fuerzas de repulsión las partículas estarán individualizadas y el sistema será disperso. Cuando terminan las fuerzas de atracción entre ellas, se producen flóculos y clusters, que son el primer paso en la formación de los agregados. La floculación en si no implica la formación de agregados, pero sí es una condición previa. La formación de agregados requiere la formación de clusters y su posterior cementación. Para la formación de clusters y dominios los enlaces más importantes son los de tipo inorgánico entre arcillas, mientras que para la estabilización de los agregados son más importantes los enlaces orgánicos (cementos húmicos).

El Fe también puede actuar como elemento de unión entre la arcilla y la materia orgánica y puede originar revestimientos alrededor de los granos de cuarzo y feldespatos, llegando a una cementación concrecionada. Los mecanismos de formación de agregados están condicionados por diversos factores:

- ◆ **Sistemas de cultivo:** condicionan la formación de agregados porque el cultivo recubre el suelo y controla todas sus propiedades. Además de realizar un gran aporte de materia orgánica, las raíces de las plantas ensanchan los huecos del suelo y lo desecan.
- ◆ **Los microorganismos:** ejercen un efecto de unión de las partículas por mecanismos de adsorción. Segregan productos mucosos que envuelven las partículas haciendo que se unan entre ellas. Además intervienen en la evolución de la materia orgánica a humus.
- ◆ **Las lombrices:** remueven el suelo ingiriendo gran cantidad de material y cuando los excretan forman pequeños agregados resultantes de la mezcla íntima de materia orgánica y mineral. Abren canales en el suelo que facilitan el movimiento del agua y aire, además del paso de raíces y organismos.
- ◆ **La mineralogía de las arcillas:** en suelos con arcillas expansibles los procesos de expansión–retracción favorecen la formación de agregados.
- ◆ **Los ciclos de hielo–deshielo:** los suelos húmedos sufren un enfriamiento lento y finalmente una congelación que favorece la formación de estructuras. Cuando el proceso de congelación es muy rápido se destruyen los agregados y aparece una masa pulverulenta en la superficie.
- ◆ **Las características de la lluvia:** en función del tipo de lluvia y su intensidad podremos tener una destrucción de los agregados cuando no hay una suficiente cobertura vegetal. Se generan costras superficiales.

Concepto de densidad aparente

Se define como la masa de suelo por unidad de volumen que ocupa la muestra en el campo. El suelo tiene dos tipos de densidades:

◇ La densidad real.

◇ La densidad aparente, que tiene en cuenta el volumen ocupado por los poros.

La densidad aparente refleja el contenido total de poros de un suelo, es decir, la compactación y la permeabilidad. Nos ayuda a transformar datos en el laboratorio, ya que los % en peso se pueden expresar como % en volumen real en campo. Se debe medir en cada horizonte y está relacionada con la estructura del suelo, por lo que depende de los mismos factores.

Se trata de un valor importante pero con limitaciones debido a que no proporciona información del tamaño de los huecos y de si están interconectados entre si; tampoco sobre el tipo de fuerzas que dan lugar a la estructura. Ambos son aspectos importantes a la hora de predecir el movimiento del agua a través de los poros, es decir, la permeabilidad.

Estabilidad de los agregados

La estabilidad representa la resistencia a que se modifiquen o destruyan los agregados. El agente principal es el agua, ya que hincha los agregados y los dispersa; además, los agregados de la superficie del suelo son dispersados por el impacto de las gotas de lluvia.

Cuando los agregados se mojan, el agua va entrando por su porosidad de forma que comprime el aire que hay en el poro, lo que hace que se desquebraje el agregado.

Porosidad

El volumen de la fase gaseosa y líquida de suelo cuando se encuentra seco define el espacio ocupado por los huecos del suelo, la relación entre el volumen de los huecos y el volumen total o porosidad.

La geometría de los poros y sus conexiones controlan el comportamiento del agua y

proporciona una mayor información del comportamiento del suelo que el valor numérico de la porosidad.

Consistencia del suelo

La resistencia mecánica de un suelo a deformarse o fluir bajo la acción de fuerzas mecánicas depende de su contenido en humedad. Expresa el estado físico del suelo con un contenido determinado de humedad. La consistencia se debe a la fuerza de cohesión entre las partículas y está condicionada por la estructura:

- ◇ Cuando el suelo está seco es sólido.
- ◇ Al añadirle agua, el suelo asume un proceso de expansión y es semisólido.
- ◇ Al añadir más agua, el suelo pasa a ser plástico.
- ◇ Al saturar de agua, el suelo pasa a ser líquido.

El paso de un tipo de suelo a otro está determinado por el contenido en agua, existiendo tres límites:

- ◇ De expansión: define el contenido en agua por debajo del cual el cambio de volumen del suelo deja de ser proporcional a la variación del contenido en agua. A partir de ese valor, la proporción es normal.
- ◇ Plástico: el índice de plasticidad es el límite líquido menos el plástico. Los límites de plasticidad son elevados en presencia de arcilla y materia orgánica.
- ◇ Líquido.

Sellado y encroscamiento

Cuando las gotas de lluvia caen en la superficie pueden romper los agregados, por lo que se liberan todas las partículas que lo forman (arenas, láminas de arcilla, etc.). Las partículas más finas ocuparán los huecos o poros del suelo y se formará un sello superficial que al secarse originará una costra superficial.

C) Color

El color es una propiedad muy utilizada en la clasificación de suelos por ser muy fácil de observar. Nos permite ver rasgos importantes y se mide en comparación con la tabla Munsell. La coloración de un horizonte nos informa acerca de:

- ◇ Colores oscuros/negros: presencia de materia orgánica. Si el color negro se localiza en nódulos o películas alrededor de los granos se debe a la presencia de óxidos de Fe o Mn.
- ◇ Colores blanquecinos: presencia de carbonatos, yeso o sales solubles en horizontes eluviales como consecuencia del lavado.
- ◇ Colores pardo–amarillentos: presencia de óxidos de Fe hidratados.
- ◇ Colores rojizos: presencia de óxidos de Fe de tipo hematites.
- ◇ Colores grises o pardo–rojizos: presencia de cationes de Fe debidos a la oxidorreducción.
- ◇ Colores grises, verdosos y azulados: presencia de compuestos ferrosos y arcillas con Fe(2+). Suelos saturados de agua.

Calor del suelo

Depende de la incidencia de los rayos solares, la presencia de nubes, vegetación y de cómo el suelo asimile esa radiación (debido a propiedades físicas como el color). La temperatura del suelo está directamente relacionada con la temperatura de la capa de aire que se encuentra

inmediatamente encima, por lo que variará de forma estacional y diaria.

La distribución de la temperatura en profundidad proporciona el perfil térmico del suelo. La medida de la temperatura del suelo es algo reciente y se acepta que la temperatura a 50 cm de profundidad es la equivalente a la atmosférica + 1°C.

Tema 14. Propiedades hidrológicas del suelo.

La fase líquida del suelo está formada por agua en forma de distintas soluciones. El agua procede fundamentalmente de la atmósfera, nivel freático, etc. y las soluciones con iones proceden de la alteración de los minerales y la materia orgánica.

El agua ejerce importantes funciones para la formación del suelo, ya que interviene en los procesos de alteración química y física en la traslocación. También tiene gran importancia en la fertilidad del suelo. Para un buen desarrollo del suelo se necesita de gran cantidad de agua.

La fase líquida circula a través de los poros y queda retenida en algunos espacios, por lo que está en constante competencia con la fase gaseosa para poder ocupar esos huecos. Los diferentes cambios climáticos de una zona determinada y más concretamente las precipitaciones, varían el % de agua en relación a los gases del suelo.

Tipos de agua

Cuando el agua atraviesa el suelo queda distribuida y sometida a distintas fuerzas, cuya intensidad depende del tipo de material que atraviese. Podemos encontrar **agua estructural** (forma parte de las estructuras de los minerales) y **agua en estado vapor**. La humedad de un suelo es la cantidad total de agua que obtenemos en una muestra en el laboratorio.

Aparecen varios tipos de clasificación:

◆ Desde un punto de vista físico

a) Agua higroscópica: retenida por fuerzas de tipo eléctrico debido a que las moléculas de agua son bipolares las caras de los cristales tienen carga eléctrica. No es un agua utilizable por las plantas (no es agronómica) porque la fuerza de succión es inferior a la fuerza que une el agua con los granos de mineral. Suele estar absorbida directamente de la humedad atmosférica por lo que forma una fina película alrededor de los granos.

b) Agua capilar: cuando tenemos dos fluidos no miscibles (agua y aire) se produce una atracción entre sus moléculas debidas a la tensión superficial, que unida a la tendencia de las moléculas de agua a adherirse a los sólidos hará que sea retenida por los poros llenos de aire.

Cuando un terreno recibe gran cantidad de agua, el suelo poroso se saturará de agua que descenderá por gravedad. La parte que no desciende queda retenida por la capilaridad y es aprovechable por las plantas ya que la fuerza de succión de las raíces es mayor que la fuerza capilar. Aparece por tanto dos tipos de agua:

◇ No absorbible: se introduce en tubos capilares <0.2 m, por lo que la fuerza capilar será muy fuerte.

◇ Absorbible: se introduce en tubos capilares de entre 0.2–8 m, por lo que constituye una reserva de agua para las plantas.

◆ Agua gravitacional: agua no retenida en los suelos porque no son capaces de hacerlo. Hay

dos tipos:

- De flujo lento: circula por poros de entre 8–30 μm ; si el tamaño es menor, el agua es de tipo capilar absorbible. Tarda entre 10 y 30 días en atravesar un suelo y durante este tiempo es absorbible por las plantas.
- De flujo rápido: poros mayores de 30 μm . El agua no queda retenida y pasa rápidamente al subsuelo, pudiendo llegar al nivel freático.

2) Desde un punto de vista agronómico

Podemos definir varios términos:

- ◇ **Capacidad máxima:** todos los poros del suelo están saturados, por lo que no existe fase gaseosa.
- ◇ **Capacidad de retención:** cantidad máxima de agua que puede retener el suelo y presenta el almacenamiento de agua en él. Se produce después de las precipitaciones, cuando el agua gravitacional abandona el suelo y experimenta pérdidas por evaporación y absorción radicular. Debido a esto es difícil de medir, por lo que para compensar esta dificultad se propuso el término de capacidad de campo.
- ◇ **Capacidad de campo:** cantidad de agua de un suelo cuando se pierde el agua gravitacional de flujo rápido (2 días después de las últimas lluvias).
- ◇ **Punto de marchitamiento:** representa la cantidad de agua que no pueden absorber las plantas una vez que el suelo se ha secado (agua higroscópica y capilar no absorbible).
- ◇ **Agua útil:** agua aprovechable por las plantas. Representa el agua de la capacidad de campo en el punto de marchitamiento.

Estos términos son aplicables y característicos de cada tipo de suelo:

- ◇ Suelos arenosos: baja capacidad de campo. Una gran parte del agua es útil para las plantas debido a que el punto de marchitamiento también es bajo.
- ◇ Suelos arcillosos: alta capacidad de campo, pero con poca agua útil ya que el punto de marchitamiento también es alto.
- ◇ Suelos intermedios: mayor cantidad de agua útil debido a una elevada capacidad de campo y un punto de marchitamiento bajo.

Distribución vertical

En un perfil edáfico en el que el agua se encuentra en equilibrio distinguimos dos zonas:

1) De aireación o vadosa: mezcla de agua y aire en la porosidad. Está parcialmente saturada excepto cuando existe infiltración. Su límite superior es la superficie del suelo y el inferior es la zona de saturación. Distinguimos a su vez:

- Subzona de evapotranspiración: abarca desde la superficie del suelo hasta donde sucede la evapotranspiración. Su profundidad será variable debido al tamaño de las raíces y su profundidad.
- Subzona intermedia o potencia intermedia: abarca cientos de metros en zonas muy áridas y no aparece en las húmedas. Parece ser que la saturación se encuentra en la superficie. Es la zona de tránsito del agua gravitacional.
- Subzona capilar: no es muy potente y su presencia está controlada por el equilibrio entre la fuerza capilar y el paso de agua.

2) Zona de saturación: todos los poros están llenos de agua. El límite superior es la zona conocida como superficie freática, que define el lugar geométrico de todos los puntos donde el agua se encuentra sometida a presión atmosférica. Por debajo de ella los puntos estarán sometidos a la presión atmosférica más la presión correspondiente a la columna de agua que se encuentra encima. Por encima de ella el agua se encuentra sometida a una presión inferior a la atmosférica debido a que la fuerza capilar tiene sentido opuesto.

Estado energético del agua en el suelo

La energía del agua en el suelo es igual de importante que su cantidad, ya que controla el movimiento del agua. El agua tiene distintos tipos de energía y la medida se suele expresar en unidades de potencial. Los tipos de energía más importantes son la potencial, gravitacional, cinética, química, atómica etc. siendo la suma de todas ellas la energía libre del agua en el suelo. Como resultado de la misma, el agua se desplaza o permanece en reposo, ya que la energía que tiene un cuerpo determina el grado de tendencia al cambio.

Al conjunto de fuerzas que retienen el agua en el suelo se le denomina **potencial de succión** y tiene signo negativo y consta a su vez del potencial matricial y el osmótico. Frente al potencial de succión se encuentra el **potencial gravitacional**, de signo positivo y responsable de mover el agua hasta zonas más profundas:

- Potencial matricial: es debido a la capilaridad y las fuerzas de absorción. Estas últimas son debidas a que la superficie de muchas partículas del suelo tienen carga eléctrica y las moléculas de agua son polares, por lo que se produce una atracción entre las moléculas de agua y las superficies cargadas de los sólidos. En los microporos del suelo el agua es retenida por fuerzas capilares.
- Potencial osmótico: es debido a las sales que se encuentran en solución en el agua del suelo. Si ponemos en contacto dos soluciones con concentraciones distintas de estas sales, la más concentrada tiende a atraer agua y este efecto es conocido como potencial osmótico. Se da en importancia en suelos de tipo salino.

Métodos para la medida de la humedad y potenciales

Para medir la humedad el método más utilizado es el de la pérdida de peso de una muestra con un contenido desconocido de agua al calentarla con una estufa. La humedad se define como:

$$H = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} \times 100$$

Este contenido en humedad del suelo es importante que se exprese en función de la fuerza con la que el agua se encuentra retenida, porque el comportamiento del agua es distinto dependiendo del tipo de fuerza. Cuando el agua se encuentra retenida por fuerzas muy pequeñas puede ser absorbida por las plantas, pero cuando está fuertemente retenida no se mueve a lo largo del perfil y no puede ser asimilada por las plantas.

Para medir el potencial de succión existen dos métodos:

- **Método de campo o tensiométrico:** consiste en introducir un tensiómetro en el suelo. Este aparato tiene en la punta una bujía porosa de material cerámico y se encuentra cerrado herméticamente lleno de agua. Lleva además acoplado un manómetro que nos permite medir diferencias de presión. Cuando está en contacto con el suelo, éste succiona parte del agua de la bujía, lo que nos da un incremento de presión asociado a tal fenómeno de succión.
- **Placa de P o membrana de Richards:** la muestra de suelo se somete a una serie de presiones. Cuando alcancemos una presión igual a la de succión, el agua saldrá con incrementos mínimos de presión por un tubo de desagüe. Se mide en unidades PF: logaritmo decimal de las fuerzas de succión en g/cm². Las medidas de humedad de un suelo se deben acompañar de las fuerzas a las que se encuentra sometida el agua. Ejemplo:

35%	_____	PF = 2.5
20%	_____	PF = 4.2
10%	_____	PF = 6

Dinámica del agua en el suelo

El agua puede ascender a lo largo del perfil debido a las fuerzas de capilaridad. Este efecto es de gran importancia en suelos áridos en los que la fuerza de capilaridad está condicionada por la humedad existente en los distintos horizontes. Los horizontes más profundos tienen una mayor humedad que los más superficiales.

El agua también se mueve de forma lateral cuando aparecen relieves inclinados en zonas montañosas.

Permeabilidad

Facilidad de circulación del agua en el suelo. Es un factor muy importante que controla toda la actividad biológica, además de los procesos edafológicos. Está condicionada por la estructura y la textura del suelo y se evalúa por la velocidad de infiltración del agua en el suelo:

- En los suelos arenosos hay una mayor velocidad de infiltración.
- En los suelos arcillosos hay una menor velocidad de infiltración.

Se utilizan distintos valores o anotaciones para definir el grado de humedad:

- dm/h: elevada permeabilidad.
- cm/h: permeabilidad moderada.
- mm/h: baja permeabilidad.

La velocidad de infiltración es siempre igual para un mismo suelo, alcanzando su valor máximo cuando está seco. A medida que el suelo se va saturando de agua va admitiendo una menor cantidad de agua hasta que se llega a una situación con valores constantes en la permeabilidad.

Perfil hídrico

Existe un gradiente de humedad en el suelo debido a que en un momento dado los horizontes se diferencian por su contenido e agua. A la curva que representa las variaciones de humedad en función de la profundidad se le denomina perfil hídrico, el cual varía a lo largo del año. Si analizamos uno de estos gráficos podremos comprender como varía el perfil hídrico en determinados momentos del año con vegetación en superficie:

- Antes de las primeras lluvias, la parte superficial del suelo no tiene apenas agua mientras que en los horizontes más profundos el agua se encuentra fuertemente retenida, por lo que no se evapora y no está disponible para las plantas.
- En el primer momento en que se producen las lluvias los horizontes superiores alcanzan su contenido mayor en agua.
- A las pocas horas de dejar de llover la zona de saturación total se va desplazando hacia horizontes inferiores. Se acumula agua en todo el perfil, aunque en las zonas más superficiales se va eliminando el exceso de agua mediante el consumo por parte de las plantas, la evaporación y la infiltración.
- Un par de horas después se sigue eliminando agua de las zonas superficiales, quedando muy poca cantidad que es aprovechada por las plantas.
- Tres o cuatro horas después el perfil continúa estabilizándose (la mayor parte se encuentra en fase de capacidad de retención). Las plantas siguen absorbiendo agua de las zonas más superficiales, donde la consecuente falta de agua provoca la aparición del punto de marchitamiento.
- Si en los siguientes días o meses no hay lluvias, todo el perfil del suelo se encontraría en punto de marchitamiento.

Balance hídrico

Valoración del agua del suelo a lo largo de todo el año. Se evalúan los aportes, las pérdidas y las retenciones, de tal modo que el agua retenida es igual al agua recibida por las precipitaciones menos el agua perdida por evaporación, transpiración o escorrentía.

De los aportes de agua que llegan al suelo, parte se infiltran y parte se pierden por procesos de escorrentía. De la cantidad que se infiltra parte se pierde por evaporación, parte por paso al nivel freático y otra parte por el consumo de las plantas. Lo que queda es retenido por el suelo.

V. Clasificación de suelos

Temas 15 y 16. Clasificación de suelos.

Hay numerosas clasificaciones de suelos atendiendo a ciertos criterios:

- Base geológica: en función del tipo de roca original del suelo.
 - Base química: en función del catión dominante, caracteres químicos, etc.
 - Base climática: hay a su vez tres tipos:
- Suelos zonales: evolución dependiente del clima.
 - Suelos intrazonales: evolución independiente del clima.
 - Suelos azonales: suelos poco evolucionados en los que no está claro el factor responsable.
- Base mixta: caracteres aclimáticos con base geológica, etc.
 - Base genética: se basa en las propiedades de origen genético.
 - Base morfométrica: utilizan propiedades medibles en el suelo, ya sea en el laboratorio o en el campo.

Las dos clasificaciones más aceptadas son:

- Soil Taxonomy (soil survey staff)–
- FAO/UNESCO.

Se basan en determinadas características diferenciadas elegidas para clasificar los distintos tipos de suelo.

Principios generales para la clasificación

Las clasificaciones de carácter nacional están siendo abandonadas, aunque se suelen utilizar como términos complementarios en otro tipo de clasificaciones. Tanto la clasificación de la Soil Taxonomy como la de FAO/UNESCO utilizan caracteres diferenciados, medibles de forma cuantitativa y muy numerosos. Dan lugar a diferentes clases definidas de forma muy rigurosa y precisa. Al utilizar estos criterios las diferentes clases son mutuamente excluyentes. Evitan cualquier tipo de subjetividad ya que no se basan en criterios cualitativos y no utilizan consideraciones genéticas, que son siempre subjetivas.

Debido a la importancia de los procesos formadores de un suelo se utilizan muchos caracteres diferenciados que son el resultado de tales procesos. Por ello, aunque las clasificaciones son de tipo morfométrico habría que considerarlas como de origen morfogenético. También se utilizan propiedades importantes para el uso del suelo. Una de las ventajas de usar estas clasificaciones es que se refieren tanto a suelos vírgenes como para suelos agrícolas, pero la nomenclatura está definida por criterios genéticos y puede dar lugar a ciertas confusiones, por lo que ahora se utilizan los horizontes diagnósticos.

Existen otros caracteres diferenciados como lo son las propiedades diagnósticas, que son importantes para la clasificación de suelos y van a estar definidos constitutivamente. Ambas clasificaciones utilizan el mismo criterio nomenclatural para cada suelo:

- Los horizontes diagnósticos se utilizan en el primer estadio de la clasificación.
- Las propiedades diagnósticas se utilizan para establecer subdivisiones de menor rango.

Cada clasificación reconoce horizontes y propiedades diagnósticas diferentes,

pero algunos son comunes a ambas. La FAO/UNESCO ha utilizado muchos nombres populares de los suelos y la Soil Taxonomy utiliza caracteres basados en los regímenes de temperatura y humedad.

Clasificación de la FAO/UNESCO

Al principio intentó definir las diferentes clases de suelos a escala muy pequeña, aunque recientemente realizó una nueva revisión y se basa en un sistema de clasificación similar al anterior, pero con clasificaciones a escala mayor. Es una de las clasificaciones más aceptadas.

A.1) Horizontes diagnóstico superficiales

- **Horizonte mólico:** rico en materia orgánica (>1%) por lo que es de color oscuro (croma<3.5 cuando está húmedo y un value<5.5 cuando está seco). Son horizontes de gran espesor, con más de 10cm si se encuentra sobre roca o más de 20cm y 1/3 de solum cuando el solum es mayor de 75cm (el solum es la parte biológicamente activa del suelo que aparece en los horizontes A y B y tiene procesos edafogenéticos). Además presenta más de un 50% de saturación en bases y suele tener una buena estructura.
- **Horizonte úmbrico:** parecido al anterior pero con un grado de saturación en bases <50%. Son iguales a simple vista.
- **Horizonte ócrico:** tiene un color demasiado claro para ser alguno de los dos anteriores o demasiado poco carbono orgánico, o es demasiado delgado. Son duros y macizos, sobretodo cuando se secan.

A.2) Horizontes diagnóstico subsuperficiales

- **Horizonte álbico:** de tipo E, donde las arcillas y los óxidos de Fe han sido eliminados. El color blanquecino está determinado por los granos primarios de cuarzo y feldespato.
- **Horizonte árgico:** elevado contenido en arcillas acumuladas de forma iluvial, aunque pueden ser generadas por procesos petrogenéticos. Cuando las arcillas son de iluviación las partículas forman revestimientos (cutanes).
- **Horizonte espódico:** de color oscuro y muy rico en materiales iluviales. Constituido por materia orgánica, Fe_3Al_2 y Fe_2O_3 y con una gran capacidad de cambio dependiente del pH. Gran área superficial, por lo que retienen mucho agua. Suelen estar por debajo de horizontes tipo álbico.
- **Horizonte cálcico:** acumulación secundaria de carbonato cálcico en un horizonte de tipo C o B, incluso A (por erosión). Su presencia se manifiesta por colores blanquecinos y el análisis mediante HCl. Están enriquecidos en carbonato cálcico en 15cm como mínimo en un contenido mínimo del 5%. Si descansa sobre materiales calizos aparece >50% en carbonatos, aunque esta condición no tiene porqué cumplirse. Los carbonatos se acumulan formando cutanes, nódulos o venas. Cuando la acumulación es tan grande que las demás propiedades del horizonte desaparecen se le denomina **horizonte hipercálcico** (>50%).
- **Horizonte petrocálcico:** mismas condiciones que el anterior pero más endurecido.

- **Horizonte vértico:** >30% de arcillas expansibles. La hidratación y deshidratación de las mismas hace que aparezcan cuñas, agregados prismáticos y slickensides. Su consistencia es dura y cuando están secos muestran grietas de más de 1cm de anchura y >50cm de profundidad.

B) Propiedades diagnóstico

- **Cambio textural brusco:** fuerte aumento del contenido de arcillas entre los horizontes.
- **Carbonatos secundarios:** generados en el perfil, forman nódulos y revestimientos.
- **Lenguas albilúbricas:** son penetraciones anchas (>15mm) de un material de tipo alábico, que entra de forma irregular en un horizonte arcilloso.

C) Materiales diagnóstico: son materiales originales en los que los procesos edáficos no han tenido una importancia relevante.

- **Flúvicos:** suelos formados con materiales fluviales recientes. Presentan superficies estratificadas.
- **Antropogeomórficos:** resultantes de la actividad humana (escombreras, anteras, etc.). los de tipo úrbico son materiales terrígenos que proceden de las construcciones.

D) Clasificación FAO/UNESCO

- Base de referencia: primer nivel de clasificación con 30 grupos de suelos.
- Sistema WRB: segundo nivel de clasificación. Se le ponen adjetivos a los 30 tipos de suelo anteriores.

27 de estas clases ya estaban definidas en la antigua clasificación de la FAO, apareciendo 3 nuevas clases. El nombre de las unidades de suelo es binomial, en el que la primera palabra refleja el grupo y la segunda la característica principal del mismo. Los suelos se agrupan en función de su característica más importante:

- **Histosoles:** suelos orgánicos muy ricos en materia orgánica (>20%) sin descomponer en gran parte. La mayoría están saturados de agua durante largos períodos. Tienen horizontes místicos o fólicos. Típicos de turbas y turberas.
- **Vertisoles:** suelo de elevado contenido en arcillas (>20%) y los cambios de humedad producen movimientos. Tienen horizontes de tipo vértico con cuñas, grietas y gilgai.
- **Fluvisoles:** desarrollados a partir de materiales flúvicos recientes. Tienen un perfil estratificado y su contenido en materia orgánica decrece de manera irregular (puede que tengan más en zonas profundas que en las superficiales). Presentan baja evolución y tienen horizontes tipo mólico, ócrico, úmbrico, hístico, taquídico, yérmico, sálico o sulfúrico.
- **Calcisoles:** importantes acumulaciones de carbonatos, con horizontes tipo ócrico o vértico que son cálcicos o petrocálcicos. También de tipo ártico, pero impregnados de carbonatos.
- **Gypsisoles:** parecidos a los anteriores pero con horizontes gýbsicos o petrogýbsicos.