

Los procesos de formación del suelo

El suelo es el corazón de la capa viva que se desarrolla sobre los continentes. Es el lugar donde se producen y se retienen los nutrientes de las plantas. Tal como ya destacamos en el capítulo 10, el suelo también retiene y almacena el agua que utilizan las plantas. En el capítulo 9 explicamos que el gran papel del clima era el de variar el aporte de agua y calor que se recibe en el suelo. Esta misma energía calorífica y este agua son los responsables del desmenuzamiento y de las alteraciones químicas que se dan en la roca, las cuales aportan la materia mineral al suelo (capítulo 12) y que es la fuente de gran parte de los nutrientes que obtienen las plantas para vivir.

Pero el clima en su actuación sobre la roca no puede hacer por sí solo un suelo capaz de albergar una rica cobertura vegetal. Las plantas por sí mismas, junto con otras formas diferentes de vida animal, juegan un importante papel en la determinación de las cualidades de una capa edáfica en particular. Estas características se han desarrollado a lo largo de siglos por interacción de los procesos orgánicos con los procesos físicos y químicos del suelo. Los primeros incluyen en su ámbito la síntesis de los componentes orgánicos, los cuales serán añadidos, en último término al suelo. Las plantas utilizan los nutrientes minerales para construir su complejo orgánico de moléculas. Con la muerte de los tejidos vegetales estos nutrientes serán de nuevo liberados y agregados al suelo, donde serán otra vez utilizados por las plantas vivas. El concepto de ciclo de los nutrientes surgirá de nuevo en el capítulo 24 como una de las claves para comprender el desarrollo del suelo.

La dinámica del suelo

El suelo se constituye como una capa dinámica, en el sentido de que una gran cantidad de complejas reacciones fisicoquímicas se llevan a cabo simultáneamente en su interior. Puesto que las condiciones climáticas y la cobertura vegetal varían enormemente de un lugar a otro del planeta, los efectos combinados de ambos en la actividad de formación del suelo se expresarán directamente en los diferentes ámbitos. Cualquier persona puede ob-

servar que el suelo gris pálido que mantiene un bosque de píceas en Maine, es completamente diferente en cuanto a composición y estructura del suelo pardo oscuro de las praderas agrícolas de Iowa. No obstante en cada una de estas localidades, el suelo ha alcanzado unas características físicas y químicas relacionadas con los mecanismos de control del clima y los procesos de formación del suelo predominantes en tales lugares.

El geógrafo está interesado profundamente por las diferencias entre los suelos de los diversos lugares. La capacidad de un determinado tipo de suelo para producir alimento a partir de los cultivos, define claramente qué áreas del globo mantienen la mayor parte del contingente poblacional humano. A pesar de los cambios en la distribución de la población que últimamente se han producido gracias a la tecnología y a la industrialización, la mayor parte de los habitantes del planeta viven todavía sobre suelos que les suministran alimentos. Por otra parte, muchos de ellos mueren porque el mismo suelo no aporta una dieta adecuada para todo aquel que lo requiere.

Las substancias del suelo se pueden hallar en sus tres estados —sólido, líquido y gaseoso—. La porción sólida está compuesta tanto por substancias orgánicas como inorgánicas (minerales). La porción líquida presente en el suelo consiste en una compleja solución susceptible de provocar numerosas e importantes reacciones químicas. Los gases que se encuentran en los poros abiertos del suelo no sólo están formados por gases atmosféricos, sino también por aquellos que son liberados a partir de la actividad biológica y las reacciones químicas que en él se desarrollan. La ciencia del suelo, conocida también como *pedología* o *edafología* es obviamente un amplio y complejo cuerpo de conocimientos. Nosotros no haremos más que cubrir unos pocos aspectos, de entre los más importantes de esta ciencia.

La naturaleza del suelo

Hasta ahora hemos ido utilizando la palabra “suelo” sin darle una definición precisa. *Suelo*, como término utiliza-

do en pedología, es una capa superficial natural que contiene en su seno materia viva y que mantiene o es capaz de mantener una cubierta vegetal. Las substancias del suelo incluyen tanto la materia orgánica como la inorgánica (mineral) y posteriormente, tanto materia viva como muerta. La materia viva del suelo está constituida no solamente por las raíces vegetales, sino también por diferentes tipos de organismos, incluyendo entre ellos a los microorganismos. Su límite superior es el aire atmosférico, o bien las capas de aguas poco profundas. Sus límites horizontales pueden ser aguas profundas o las regiones carentes de vegetación, tanto por el exceso de roca o por la permanencia del hielo.

El límite inferior del suelo es a menudo difícil de definir en términos sencillos y precisos. El no-suelo por debajo del suelo puede ser el lecho rocoso o cualquier forma de regolito y sedimentos desprovistos de raíces vivas y de otros signos que indiquen cualquier actividad biológica. Por el contrario, el suelo muestra evidentes señales de este tipo de actividad.

Los suelos muestran normalmente diversos *horizontes*, que son diversas capas horizontales separadas entre sí mediante diferencias en su composición física o química, contenido orgánico, estructura, o una combinación exclusiva de todas estas propiedades. Los horizontes se desarrollan por interacciones, en el tiempo, del clima, los organismos vivos y la configuración de la superficie terrestre (relieve).

La palabra "suelo" es utilizada por los ingenieros civiles y los geólogos para dar a entender cualquier capa superficial de material mineral no consolidada y de menor resistencia si la comparamos con el lecho rocoso, fuerte y duro. Nuestra definición excluye cualquier otra forma de formación superficial que no mantiene el crecimiento de los vegetales.

Aunque muchas clases de suelos —aquellos que presentan horizontes— requieren un largo período de tiempo para desarrollarse, una capa capaz de mantener una vida vegetal puede comenzar a existir muy rápidamente. Un ejemplo de ello lo constituye una acumulación de aluvión en el lecho de inundación de un río. En estos ámbitos la materia madre puede incluir en su seno materia orgánica y nutrientes formados en cualquier otra parte y que han sido transportados por el río hasta la nueva localización. Generalmente, el material parental bruto en un suelo con horizontes necesita de uno o dos siglos, al menos, para formarse. El tiempo necesario por un suelo para alcanzar el estado de equilibrio con el medio se estima normalmente en cientos de años.

Concepto de Pedon*

La moderna ciencia del suelo utiliza el concepto de *polípedon*, que es la unidad más pequeña y característica del suelo de un área dada. A un polípedon se le asignan un conjunto de propiedades únicas y singulares, y que difieren de aquellas que corresponden a polípedons adyacentes. El polípedon está concebido en términos de espacio geométrico, como el conjunto de pedons. Un *pedon* es una columna de suelo cuya profundidad viene

*A lo largo de este capítulo y del siguiente, numerosas etapas y frases han sido extraídas palabra por palabra de la siguiente fuente bibliográfica: Soil Survey Staff (1975) *Soil Taxonomy*. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook n. 436, Government Printing Office, Washington D.C.

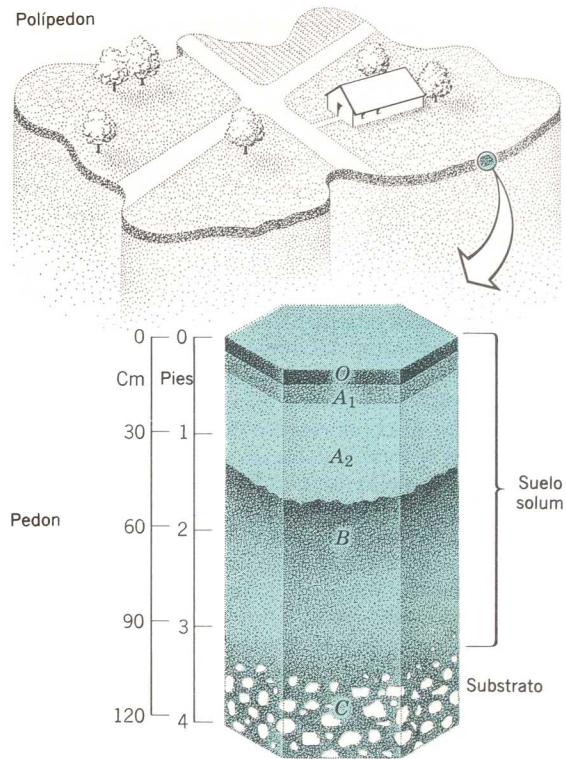


FIGURA 22.1. Concepto de pedon y polípedon.

comprendida entre la superficie del suelo y su límite inferior en alguna forma de regolito o lecho rocoso. Tal como se representa en la figura 22.1 los científicos del suelo a menudo conciben el pedon como una figura de seis lados, una columna hexagonal. El área superficial de un pedon oscila entre 1 y 10 m². El *perfil del suelo* es una muestra de los diferentes horizontes del suelo sobre una cara del pedon. Como se puede deducir fácilmente, el mismo perfil se podrá observar en los seis lados de esta figura. En la práctica, el edafólogo cava un profundo hoyo en el que queda expuesto el perfil del suelo.

La figura 22.1 muestra diversos horizontes, que se diferencian unos de otros por el color o la textura. Los horizontes del suelo están designados por un grupo de letras mayúsculas, comenzando con la *A* en la parte superior; las subdivisiones de cada horizonte vienen representadas por números. En la misma figura vemos los horizontes *A*, *B* y *C*; sobre el horizonte *A* se halla un horizonte orgánico que está designado con la letra *O*. (Véase también la figura 22.6.)

La *columna de suelo* está compuesta por los horizontes *A* y *B* del perfil del suelo. Éstos son las capas más características y dinámicas. El horizonte *C*, por contraste, es el material madre o substrato. La columna de suelo ocupa la zona en donde las raíces vivas de las plantas ejercen un control sobre los horizontes; el horizonte *C* ocupa un lugar situado por debajo del nivel de actividad de las raíces.

El color del suelo

Para las personas poco familiarizadas con la edafología, el color —fácilmente perceptible a cierta distancia— es la propiedad más evidente del suelo. El color pardo oscuro,

hasta el negro, es para el viajero una nota característica de los suelos del paisaje agrícola desde Iowa a Nebraska; el color rojo vivo del suelo en los altiplanos de Piedmont (Georgia) no escapa a ningún observador. Cierta tipo de relaciones con el color del suelo resultan bastante simples. Por ejemplo, el color negro suele indicar la presencia de abundante materia orgánica (humus); el color rojo, indica normalmente la existencia de sesquióxidos de hierro (hematitas). Otras veces, el color del suelo puede ser el resultado de un tipo de substrato, pero es más frecuente que sea una propiedad generada por el proceso de formación del suelo.

La definición del color del suelo ha sido determinada mediante unas bases objetivas con libros de colores normalizados (Munsell) adaptados a las necesidades de la ciencia del suelo. El color viene condicionado por otras variables. Uno es el tono, o color dominante del espectro puro, dependiente de la longitud de onda (véase figura 4.3). Una segunda variable es el valor, el grado de oscuridad o luminosidad del color. El tercero es el croma, la pureza o intensidad del color del espectro. Mediante el empleo de libros de colores normalizados, el observador puede conocer el color del suelo según un código alfanumérico, con el que se define el color, el valor y el croma.

Tipos de textura de los suelos

En el capítulo 12 se expuso una escala de tamaños de las partículas minerales (tabla 12.2). La misma escala se emplea para definir la textura del suelo. Los diferentes tipos de *textura de un suelo* se basan en la variación en cuanto a la proporción de arena, limos y arcillas, expresada en tanto por ciento de cada elemento. El sistema más difundido es el empleado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S. Department of Agric-

cultura) y es el que se muestra en el diagrama triangular de la figura 22.2. Los porcentajes de cada uno de los tres componentes están expuestos simultáneamente. Los vértices del triángulo representan el 100 % de cada uno de los tres tipos de partículas –arenas, limos y arcillas. La *franca* es una mezcla en la que no predomina ni uno de los tres elementos sobre los otros dos, de manera que aparecerá en el centro de la figura. Un tipo de suelo cuyos componentes, punto A del triángulo, contengan un 65 % de arenas, un 20 de limos y un 15 de arcillas, tendrá una textura que será calificada de *franca arenosa*. Otro suelo cuya textura esté representada por el punto B de la figura y que contenga un 33 1/3 por ciento de arenas, un 33 y 1/3 % de limos y un 33 y 1/3 de arcillas, será calificada de *franca arcillosa*. La figura 22.3 muestra cinco ejemplos con diferentes texturas. Sus posiciones están indicadas en el diagrama de la figura anterior.

La textura resulta importante pues determina la capacidad de retención de agua y la transmisión de sus propiedades al suelo. Así, mientras las arenas pueden drenar fácilmente el agua, en un suelo arcilloso los poros son demasiado pequeños para un adecuado drenaje. El suelo que tenga un elevado contenido en arcillas y limos dificultará la penetración de las raíces a través del perfil.

Recordemos del capítulo 10 que la capacidad de retención (capacidad de campo) de un suelo, es su facilidad para retener agua en contra de la fuerza de gravedad. La figura 22.4 muestra cómo la capacidad de retención varía con la textura del suelo. Los terrenos puramente arenosos retienen muy poca agua, mientras que, por el contrario, los suelos arcillosos retienen la máxima capacidad de agua. Los francos retienen cantidades intermedias de agua y por su parte las arenas dejan pasar el agua hacia su interior mucho más rápidamente que como lo hacen las arcillas. Cuando se calcula la cantidad de agua que se ha de aplicar en planes de irrigación, se han de tener en cuenta todos estos factores. Las arenas alcanzan su máxi-

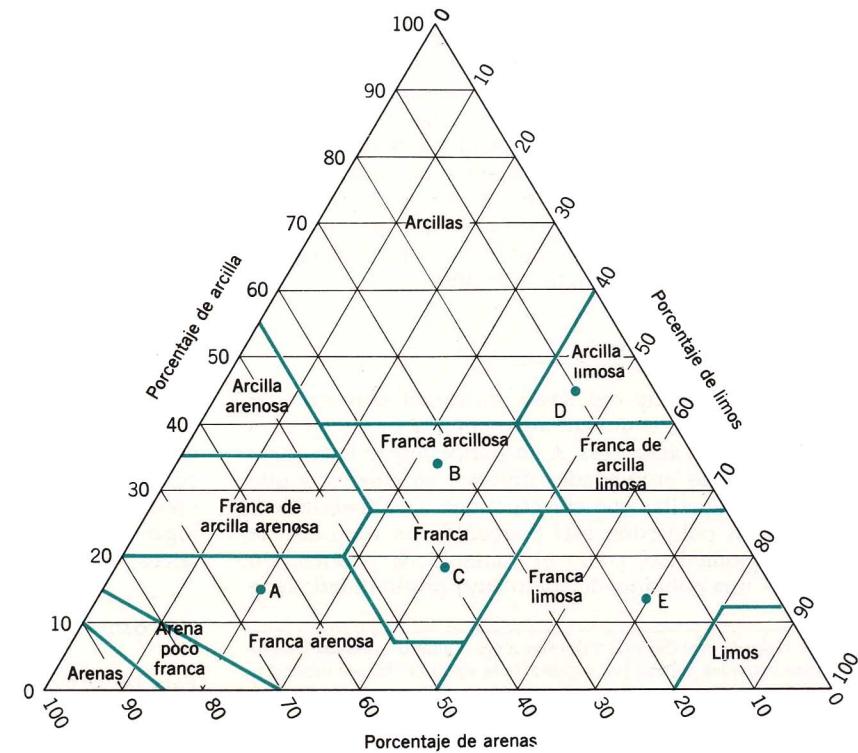


FIGURA 22.2. Tipos de textura de suelos mostrados mediante áreas delimitadas por líneas gruesas, dentro de un diagrama triangular. (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.)

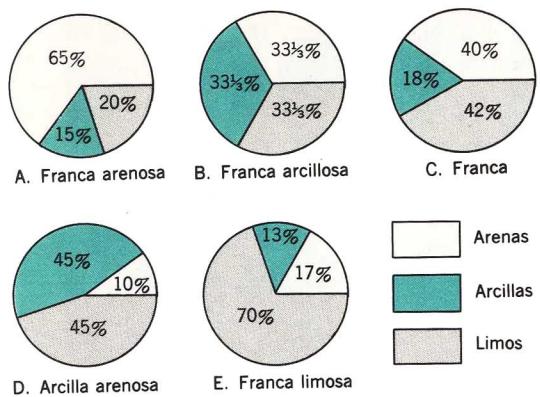


FIGURA 22.3. Composiciones frecuentes de cinco tipos de textura de suelos. Estos ejemplos están representados mediante puntos con letra en la figura 22.2 (Departamento de Agricultura de EE.UU.)

ma capacidad para retener agua muy rápidamente, por lo que el agua adicional será desechada. Los arcillosos muy frances absorben el agua muy lentamente y si la irrigación es muy intensa, el agua se perderá por escorrentía superficial. De la misma forma, los suelos arenosos necesitan una irrigación más frecuente que los suelos ricos en arcillas. El contenido orgánico de un suelo afecta también enormemente su capacidad de retención. Las texturas francesas intermedias suelen ser generalmente mejores para la agricultura, puesto que drenan bien el agua y presentan además propiedades favorables a su retención.

La textura del suelo es un hecho inherente al mismo suelo y depende en su mayor parte de la composición de su sustrato. Algunos tipos de materia madre aportan una gran variedad en cuanto a los tamaños de sus partículas; otros producen suelos muy arenosos o por el contrario muy arcillosos.

Los edafólogos agrónomos utilizan una medida de almacenamiento de agua denominado *punto de marchitación*. El suelo que tenga una cantidad de agua menor que la de su punto de marchitación impide que ésta sea absorbida lo suficientemente rápida para abastecer las

necesidades de las plantas. Por debajo de este punto, el follaje de las plantas no adaptadas a condiciones de sequía se marchitarán. Tal como se indica en la figura 22.4, el punto de marchitación depende de la textura del suelo.

Consistencia del suelo

Como *consistencia de un suelo* se quiere indicar el grado de compacidad de un suelo seco, y el de plasticidad de un suelo húmedo, así como el grado de coherencia o dureza del suelo cuando retiene pequeñas cantidades de humedad o cuando está completamente seco. La compacidad de un suelo húmedo se puede evaluar presionando una porción de suelo entre los dedos pulgar y cualquier otro, entonces, separando los dedos se mide la extensión de suelo que queda adherida a la piel. La plasticidad se evalúa rodando una pequeña cantidad de suelo húmedo hasta que quede configurada a modo de vara o cilindro. Si la plasticidad es elevada, el suelo podrá ser enrollado hasta obtener un delgado grosor. La consistencia de un suelo seco está expresada por diferentes niveles de dureza que puede oscilar desde un suelo suelto (no coherente) hasta uno extremadamente duro. La cimentación suele darse generalmente en un horizonte determinado y no está afectado por la humectación. Puede variar desde un suelo ligeramente cimentado, fácilmente rompible con las manos, hasta una cimentación más duradera y que se asemeja a la roca sólida. Este fenómeno se debe a la acumulación de partículas minerales, como el carbonato calcico, sílice u óxido de hierro.

Estructura del suelo

La *estructura del suelo* se refiere a la presencia de agregados (terrones o agrupaciones arracimadas) de partículas del suelo. Cada agregado se halla separado de otros contiguos por superficies naturales delgadas (hendiduras). En algunos casos los agregados están revestidos con finas películas de material que los ayuda a mantenerse aparte. En otros casos, están simplemente retenidos juntos por fuerzas de cohesión interna. Un agregado natural del suelo se denomina *ped* (un agregado ocasionado por ruptura durante el arado, se denomina *clod*). La estructura del suelo se define en términos de configuración, tamaño y durabilidad de los *peds*.

Se reconocen cuatro tipos primarios de estructura del suelo: laminares, prismáticos, nusiformes y esféricos. Éstos están ilustrados en la figura 22.5. La estructura laminar del suelo consiste en placas –partículas delgadas y aplastadas– en posición horizontal. En la estructura prismática, los *peds* están formados por columnas verticales con lados planos que pueden tener una sección entre 0,5 y 10 cm de grosor. La estructura nusiforme o en bloques está compuesta de *peds* angulares, equidimensionales con superficies planas que encajan con las superficies de los *peds* contiguos. En la estructura esférica, los *peds* son más o menos redondeados delimitados por superficies que no encajan con los *peds* adyacentes. En la variedad granular de la estructura esférica, mostrada en la figura 22.5, los *peds* son pequeños y el suelo es muy poroso.

Una descripción de la estructura del suelo incluye no solamente la forma de los *peds* sino también su tamaño (fino, medio y grueso) y su dureza (ligera o fuerte). La estructura del suelo es una propiedad física de gran importancia para la agricultura puesto que influye en la

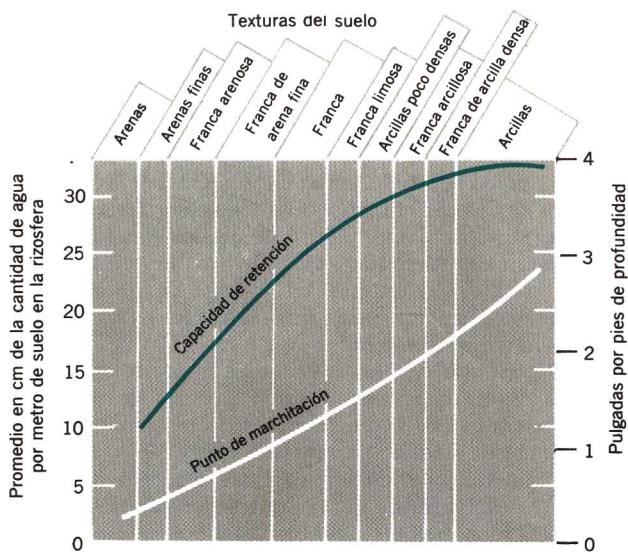
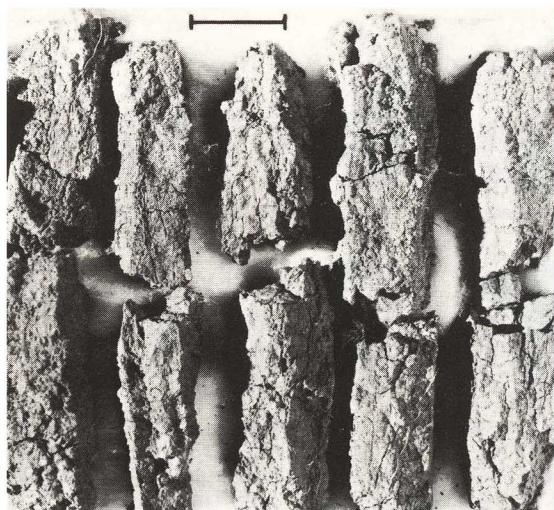


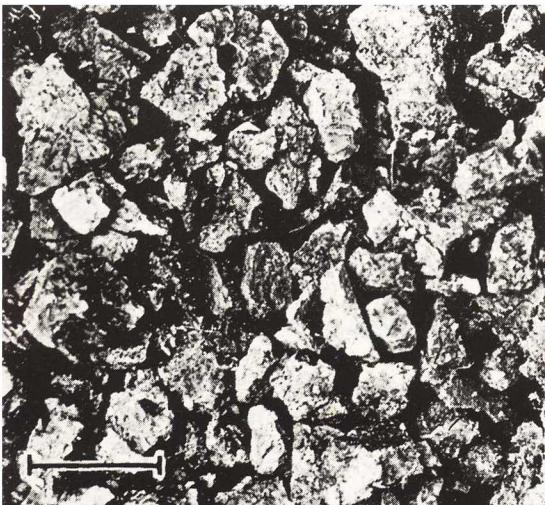
FIGURA 22.4. La capacidad de retención y el punto de marchitación varían de acuerdo con la textura del suelo.



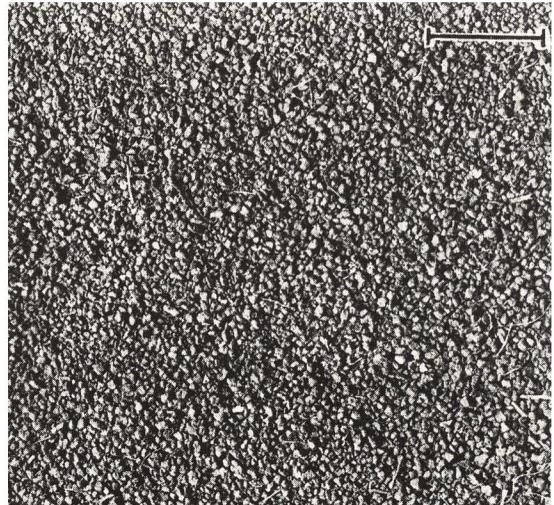
A. Laminar



B. Prismática



C. En bloques (angulosa)



D. Esferoidal (granular)

FIGURA 22.5. Cuatro estructuras básicas del suelo. La barra negra de cada fotografía representa 2,5 cm (1 pulgada) (División del Servicio del Suelo, Departamento de Agricultura de EE.UU.)

facilidad de filtración del agua a través del suelo seco, la disponibilidad del suelo a ser erosionado y las facilidades que ofrece para el cultivo.

Relacionado con la estructura del suelo está la presencia de unas delgadas películas o recubrimientos denominados *cutans* (pieles), peds del suelo o también gruesos granos minerales individuales. Los *cutans* de arcilla (*argillans*) no son más que recubrimientos arcillosos de los peds o granos de arena (Lámina L.6). Estos recubrimientos consisten en partículas de arcilla, por ejemplo, que han sido arrastradas hacia el interior, por infiltración del agua. Otros tipos de *cutans* lo pueden formar finos recubrimientos de óxido de hierro o manganeso sobre granos de mineral y películas de materia orgánica.

En la estructura del suelo también resulta importante la naturaleza de los espacios vacíos entre los peds. La medida y el grado de interconexión entre los vacíos son datos importantes a fin de determinar la facilidad con que el agua y el aire se desplazan por el interior del suelo.

Los horizontes del suelo

Los horizontes del suelo varían enormemente en cuanto a grosor y en sus características. En algunos casos los límites tanto superior como inferior de un horizonte pueden estar claramente definidos; en otros los límites son graduales y difusos (Láminas L.4 y L.5). En general los horizontes del suelo son de dos clases: horizontes orgánicos y horizontes minerales.

Los *horizontes orgánicos* designados por la letra mayúscula O se superponen a los horizontes minerales y están formados por acumulaciones de materia orgánica procedente de plantas y animales (figura 22.6). Normalmente, la parte superior del horizonte orgánico, designada por O₁, está formada por materia vegetal en sus formas originales reconocibles a simple vista. Por debajo del O₁ hallamos el horizonte O₂, compuesto de restos de partes de plantas y animales no reconocibles a simple vista. Los materiales de este horizonte se suelen denominar *humus*.

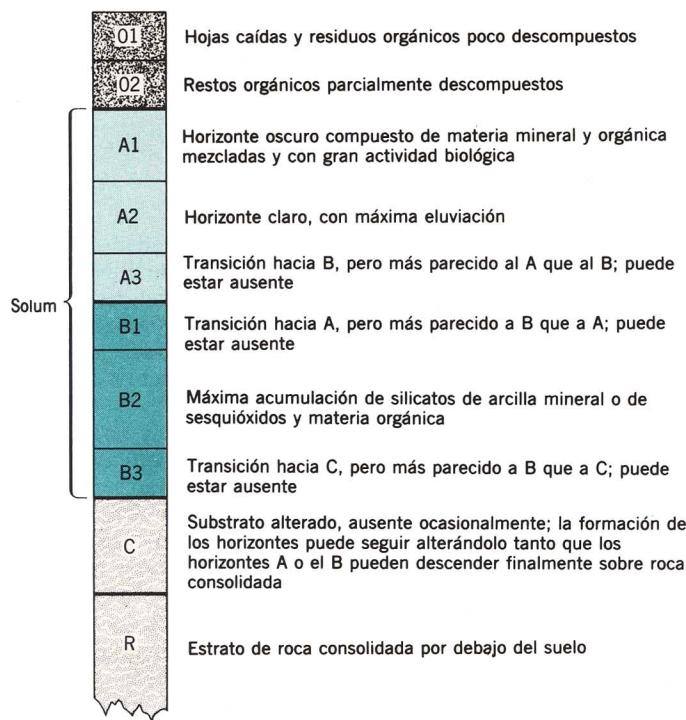


FIGURA 22.6. Nomenclatura de los horizontes de un hipotético perfil de suelo, que podría representar un suelo forestal de un clima húmedo y fresco. (Roy W. Simonson, Servicio de Conservación del Suelo, Departamento de Agricultura de los EE.UU.)

mus; éste consiste, de manera general, de tejidos vegetales en parte oxidados por los organismos consumidores (capítulo 24). El proceso por el cual se forma el horizonte O_2 es conocido como *humificación*.

Los *horizontes minerales* están formados predominantemente por materia mineral inorgánica en que se reconocen dos grupos básicos: 1) los minerales del esqueleto y 2) arcillas y los minerales producto de la alteración relacionados con ellas. Los *minerales del esqueleto* se hallan formados en su mayoría de partículas del calibre de arenas o tierras de aluvión, y son los materiales que dominan el volumen total de la mayoría de los suelos. Los materiales del esqueleto pueden estar compuestos de granos individuales de un único material –cuarzo por ejemplo– o granos formados por agregados de diferentes minerales. Las arcillas minerales y los productos de la meteorización emparentados con éstos están definidos en el capítulo 12. Ellos forman la fracción mineral del suelo más importante en los procesos de formación de los suelos, en el desarrollo de los diversos horizontes, y en la determinación de la fertilidad natural de los suelos. Las arcillas tienen unas propiedades fisicoquímicas especiales debido a sus dimensiones coloidales y debido a la forma laminar de sus partículas.

Los horizontes minerales se designan mediante las letras *A* y *B*, y sus subdivisiones vendrán caracterizadas por una serie de números que acompañarán a las letras. Pondremos énfasis en la descripción de las propiedades de los horizontes *A* y *B* en los suelos de climas húmedos formados bajo cobertura forestal. Nuestra explicación no podría aplicarse con afinidad a los suelos de los climas áridos y semiáridos. Los horizontes minerales tienen me-

nos de un 20 % de materia orgánica cuando no está presente la arcilla, y menos de un 30 % de materia orgánica cuando la fracción mineral está compuesta por un 50 % o más de arcillas. El *horizonte A* a menudo se subdivide en dos subhorizontes *A₁* y *A₂*.

El *horizonte A₁* es normalmente rico en materia orgánica, por ello adquiere unas tonalidades más oscuras que el *horizonte A₂* inferior. El *horizonte A₂* se caracteriza por la pérdida de las arcillas y de los óxidos de hierro y de aluminio. En él, a menudo permanece una concentración de granos de arena de cuarzo con lo que adquiere unas tonalidades claras.

El *horizonte B* representa generalmente una acumulación de materia mineral que puede provenir de los dos horizontes ya citados, el *A₁* y el *A₂*. A menudo se suele encontrar una elevada concentración de arcillas, óxidos de hierro y aluminio, y materia orgánica (humus). De este modo suele ser menos frágil que los horizontes *A* anteriormente citados; puede ser un estrato denso y resistente y en él se suele dar la cimentación.

El *horizonte C* situado por debajo del *B*, es una capa mineral de regolito o sedimento (pero nunca lecho rocoso), que está ligeramente afectado por la actividad biológica. El *horizonte C* no forma parte del *solum* y se puede definir como una capa de material del substrato. Este horizonte, sin embargo, está afectado por los procesos fisicoquímicos. Un ejemplo de ello lo constituye la acumulación del carbonato cálcico en los climas secos que producen cimentación en algunos suelos. En estos medios este horizonte puede presentar también acumulaciones de sílice o de sales solubles. El lecho rocoso que sostiene el *horizonte C* (o el *horizonte B* cuando el *C* no existe) se designa como *horizonte R*.

Para indicar las características especiales de un horizonte del suelo se utiliza un cierto número de letras minúsculas, que se colocan detrás de la letra mayúscula del horizonte correspondiente, *A* o *B*. Estos son algunas muestras:

<i>b</i>	horizonte fósil
<i>ca</i>	acumulación de carbonatos
<i>f</i>	suelo helado
<i>h</i>	acumulación de humus
<i>ir</i>	acumulación de hierro
<i>bir</i>	acumulación de humus y de hierro
<i>p</i>	horizonte perturbado por la acción del arado
<i>si</i>	acumulación de sílice
<i>t</i>	acumulación de arcillas transportadas desde otras zonas
<i>x</i>	horizonte quebradizo (<i>fragipan</i>)

Las soluciones del suelo

El aire y el agua se combinan para formar lo que se conoce como *soluciones del suelo*, que constituye el medio donde se desarrollan las reacciones químicas que afectan la fracción sólida del suelo. La atmósfera del suelo consiste básicamente en aire que penetra en las porosidades del suelo, difundiéndose hacia todas las oberturas interconectadas. Las fluctuaciones en la presión barométrica se cree que pueden inducir el movimiento del aire en el suelo de forma alternativa hacia el interior y hacia el exterior, resultando de ello un cierto grado de circulación.

Tres de los gases atmosféricos presentes en el suelo

juegan papeles activos en los procesos que en él se desarrollan: oxígeno molecular (O_2), nitrógeno molecular (N_2) y dióxido de carbono (CO_2). Para que desarrollen un papel activo se necesita que estén disueltos en el agua. Como gases disueltos en el agua del suelo, ni el oxígeno ni el nitrógeno intervienen directamente en las reacciones químicas que afectan a las arcillas minerales ni a los carbonatos. En cambio, el dióxido de carbono es un elemento de gran importancia en las reacciones directas pues se combina con el agua del suelo formando una solución de ácido carbónico. Los ácidos de los complejos orgánicos, producidos por la descomposición de la materia orgánica, son también importantes reactivos en la solución del suelo. Un ácido sirve como agente activo que ataca los átomos que están estrechamente relacionados con la estructura cristalina de las arcillas minerales.

Iones

Para entender la actividad química en las soluciones del suelo, debemos recurrir necesariamente a la actividad de los iones. Un *ión* es un átomo o grupo de átomos que llevan una carga eléctrica. Cuando ciertos componentes están disueltos en el agua, los átomos se separan entre sí como iones. Por ejemplo la sal de mesa corriente está formada por cloruro sódico, es decir, compuesta de sodio (Na) y cloro (Cl) en una proporción de uno a uno. De esta manera, la fórmula química para el cloruro sódico es $NaCl$. En su estado sólido, el cloruro sódico es una substancia cristalina formada por átomos de sodio unidos ligeramente a átomos de cloro adyacentes. Cuando los introducimos en agua, el $NaCl$ se disuelve lo cual querrá decir que los átomos de Na y de Cl se separan moviéndose libremente junto con las moléculas de agua. Separados de su estructura cristalina resulta que el átomo de sodio tiene una única carga positiva; es un ion, y lo indicaremos con el símbolo Na^+ . El átomo de cloro, por su lado, adquiere una carga negativa más convirtiéndose en ion cloruro: Cl^- .

Los químicos denominan a los iones cargados positivamente como *cationes*, y a los cargados negativamente *aniones*. Algunos tipos de iones están compuestos por diferentes clases de átomos unidos conjuntamente. Por ejemplo el ion amonio está compuesto por un átomo de nitrógeno (N) unido a cuatro de hidrógeno (H) formando la siguiente fórmula NH_4^+ ; es un catión. El ion sulfato, constituye otro ejemplo. Está formado por un átomo de azufre (S) unido a cuatro átomos de oxígeno (O) formando el anión SO_4^{--} . Obsérvese que el ion sulfato presenta dos cargas negativas. Algunos tipos de iones llevan una sola carga, otros la llevan doble, otros triple.

Los iones más importantes del suelo son los que reseñamos a continuación:

Cationes

H^+	Hidrógeno
Al^{+++}	Aluminio
$Al(OH)^{++}$	Aluminio hidroxil
Ca^{++}	Calcio
Mg^{++}	Magnesio
K^+	Potasio
Na^+	Sodio
NH_4^+	Amonio

Aniones

Cl^-	Cloruro
SO_4^{--}	Sulfato
OH^-	Hidroxilo
HCO_3^-	Bicarbonato
NO_3^-	Nitrato

La solución del suelo contiene una gran variedad de iones producto de la precipitación. El agua de lluvia posee sales marinas, partículas minerales suspendidas y poluentes. Cuando son arrastrados hacia tierra junto con la lluvia, las sales marinas contribuyen con todos los iones que están presentes en el agua de mar. Muchos de ellos son el cloruro (Cl^-) y el sodio (Na^+); los iones magnesio (Mg^{++}), sulfato (SO_4^{--}), calcio (Ca^{++}) y potasio (K^+) contribuyen en menor proporción. Las partículas minerales levantadas del suelo a la atmósfera y transportados hacia las capas superiores mediante los vientos ascendentes turbulentos, aportan gran parte del potasio, calcio y magnesio que se encuentra en el agua de lluvia.

Los iones sulfato (SO_4^{--}) suelen estar presentes en el agua de lluvia. Proceden generalmente de partículas sulfatadas y componentes sulfurosos de los gases emitidos a la atmósfera a través de la combustión de los combustibles fósiles, incendios forestales, volcanes y actividad biológica. También están presentes los iones nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) producidos a partir de gases ricos en contenidos nitrogenados, introducidos en la atmósfera a partir de diversas fuentes, incluyendo entre ellos la quema de combustibles, el deterioro de la materia orgánica y los fertilizantes de los campos y jardines. Los iones fosfato (PO_4^{---}) están también presentes en el agua de lluvia, pero en cantidades menores que el amonio y el nitrato.

Un tema importante a considerar acerca de los iones contaminantes es que éstos forman ácidos en la solución del suelo. Los iones sulfato forman ácido sulfúrico (H_2SO_4); los iones nitrato forman ácido nítrico (HNO_3). En ciertas regiones cuyo aire está densamente contaminado y en las que es importante el fenómeno de lavado de aire merced al agua de lluvia, estos ácidos ocasionan una gran cantidad de efectos indeseados sobre la actividad biológica, y podrían ocasionar en algunos casos cambios en los procesos normales de formación de los suelos.

Los coloides del suelo y el intercambio de cationes

Las partículas de las arcillas de dimensiones coloidales son químicamente activas en el suelo debido a su gran superficie. Una partícula de arcilla se podría presentar como un objeto laminar muy delgado, cuyas superficies superior e inferior son muy planas (figuras 22.7 y 22.8). (La figura 12.8 es una fotografía obtenida mediante la ayuda del microscopio electrónico, de partículas coloidales de las arcillas.) La estructura cristalina de las arcillas minerales es tal que los átomos están ordenados siguiendo unos modelos geométricos de *redes cristalinas* (lo mismo se puede aplicar a los minerales cristalinos). Para las arcillas, la estructura de red adquiere una forma de *capas de estructura reticular* planas y paralelas entre sí de extremada estrechez; por esta razón a las arcillas se les suele denominar también *capas de silicatos*.

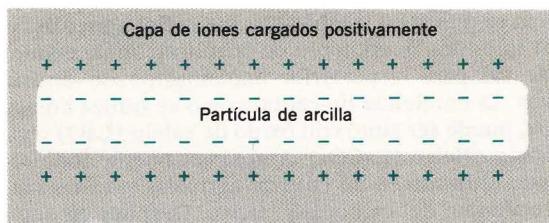


FIGURA 22.7. Esquema de una partícula coloidal plana y delgada, con cargas negativas en la superficie y una capa de iones cargados positivamente (cationes) retenidos en la superficie.

Los enlaces químicos que mantienen unidos los átomos de cada red son muy fuertes, mientras que los que se establecen entre las diferentes capas son muy ligeros. Debido a esta estructura, las moléculas de agua y los diferentes iones libres pueden penetrar entre las capas de silicatos lo que ocasiona una alteración química y su posterior disgregación física.

La estructura de capas de las arcillas es tal que los átomos de oxígeno, que poseen carga negativa, están próximos a las superficies superior e inferior. Esta condición está indicada en la figura 22.7 mediante signos negativos en la partícula de arcilla. Como resultado de ello, los iones positivos o cationes serán atraídos hacia la superficie de la partícula siendo retenidos por atracción electrostática. Los cationes de hidrógeno (H^+), aluminio (Al^{+++}), sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{++}) y magnesio (Mg^{++}) están presentes corrientemente en las soluciones del suelo y todos ellos se encuentran en las superficies de las partículas de arcilla. En algunas reacciones del suelo, estos cationes se reemplazan unos a otros en un proceso conocido como *intercambio de cationes*.

El intercambio de cationes viene regido por un orden de reemplazamiento, que indica qué tipo de ion es capaz de substituir a otro. Este reemplazamiento sigue un sistema



FIGURA 22.8. Fotografía obtenida mediante el microscopio electrónico de cristales de la caolinita, aumentados aproximadamente 20.000 veces (Paul F. Kerr.)

Tabla 22.1. Capacidad de intercambio de cationes de diferentes coloides del suelo

Material	CIC
Materia orgánica (coloides del humus)	150-500
Arcillas:	
Vermiculita	100-150
Montmorillonita	80-150
Ilita	10-40
Caolinita	3-15
Sesquistóxidos de hierro y aluminio hidratados	4
Feldespato y cuarzo	1-2

ma de categoría por el cual unos iones de una determinada clase asumen la posición de iones de menor categoría. El ion aluminio puede desplazar cualquier otro ion metálico, de manera que ocupará la posición más elevada en la lista. En orden de capacidad de reemplazamiento siguen los cationes de hidróxido de aluminio, los de calcio, magnesio, potasio y por último sodio.

La capacidad que una porción de suelo tiene para retener e intercambiar cationes se la denomina *capacidad de intercambio de cationes* (CIC), y es un indicador general del grado de actividad química del suelo. La capacidad se indica mediante una unidad denominada *miliequivelente*, que es una media de la proporción de carga iónica que se añade al suelo. La definición exacta de esta unidad no es del todo importante aquí, pero sí su magnitud relativa. La capacidad de intercambio de los diferentes coloides del suelo los encontramos en la tabla 22.1. Entre las arcillas tenemos la vermiculita y la montmorillonita con un elevado CIC. La ilita tiene un valor intermedio y la caolinita tiene valores bajos. Igualmente bajos son los valores de CIC que tienen los sesquistóxidos de hierro y aluminio. Partículas como el feldespato y el cuarzo tienen valores de CIC próximos a cero.

La continua meteorización química de un suelo durante un largo período de tiempo tiende a ocasionar cambios en la composición de las arcillas. En estadios recientes de alteración, el contenido de minerales con elevado CIC puede ser relativamente elevado, de forma que el suelo en su conjunto tendrá también un elevado CIC. En estadios más avanzados de alteración, los minerales con elevado contenido en CIC serán desplazados o alterados en beneficio de los que poseen un CIC de valor bajo –caolinita y sesquistóxidos de hierro y aluminio–. Como consecuencia de todo ello, el total del valor de CIC disminuye gradualmente hasta alcanzar niveles muy bajos. Generalmente, cuando la CIC disminuye hasta valores inferiores a 10 en el horizonte B, el suelo queda clasificado dentro de la categoría de bajo valor de CIC. Los suelos con valores elevados de CIC tienen en general una alta capacidad para almacenar nutrientes vegetales (cationes básicos) y son potencialmente suelos fértils (si es que el suelo no es muy ácido en su balance químico).

Suelos ácidos y básicos

Los diferentes cationes del suelo susceptibles de ser rápidamente intercambiados en las partículas coloidales, pertenecen a dos clases en general. Una clase, que se constituye en importantes nutrientes para las plantas, consiste

en los *cationes básicos* (o simplemente *bases*). Las bases más importantes en los suelos son los siguientes:

Calcio	Ca^{++}
Magnesio	Mg^{++}
Potasio	K^{+}
Sodio	Na^{+}

Cuando los cationes básicos componen la mayor parte de los cationes retenidos por los coloides del suelo, el suelo adquiere unas condiciones definidas como *básicas*.

La otra clase corresponde a los *cationes generadores de ácidos*. Existen tres cationes ácidos generadores que son importantes en el suelo. Uno es el ion aluminio (Al^{+++}) que está asociado con una elevadísima acidez. El segundo es el ion aluminio hidroxilo ($\text{Al}[\text{OH}]^{++}$) asociado con un grado moderado de acidez. El tercero es el ion hidrógeno, H^{+} , el cual forma cerca de un 10 % de los iones acidogeneradores de los suelos ácidos. Todos ellos deben ser intercambiables, esto es, libres de intercambiar sus posiciones con otros iones en la superficie de los coloides. Normalmente están presentes los iones Al^{+++} y H^{+} pues sus enlaces son muy fuertes para ser rápidamente intercambiados. Un suelo se define como *ácido* cuando el número total de cationes ácido generadores rápidamente intercambiables comprenden entre un 5 y un 60 % del total de la capacidad de intercambio de los cationes; a mayor porcentaje, mayor grado de acidez.

El grado de basicidad o acidez de un suelo se mide en términos de un número conocido como el *pH* de la solución del suelo. (El pH es la medida de la concentración de iones de hidrógeno; es el logaritmo base 10 del inverso del peso en gramos de los iones de hidrógeno por litro de agua. Consecuentemente, a menor valor de pH, mayor será la concentración del ion hidrógeno.) Un pH de 7,0 es, en esta escala, un pH neutro; valores por debajo de 5 representan una fuerte acidez de la solución del suelo; valores superiores a 10 representarán una solución del suelo básica. La tabla 22.2 muestra una clasificación de los suelos de acuerdo con la acidez y la basicidad. Para suelos agrícolas, esta cualidad es importante puesto que ciertos cultivos requieren valores de pH próximos a los valores neutros y no prosperan en suelos ácidos. Las plantas, por otra parte, difieren considerablemente en sus preferencias de un suelo ácido o básico, y éste es un factor importante en la distribución de los tipos de plantas.

Como se refleja en la tabla 22.2 los suelos agrícolas con un pH inferior a 6 requieren de la aplicación de enmiendas de cal para la posterior implantación de diversos cultivos. La enmienda de cal tal como se utiliza en agricultura, puede ser tanto con óxido de calcio (CaO) o con carbonato cálcico (CaCO_3). Aproximadamente todo este abonado utilizado en los cultivos agrícolas es caliza natural procedente del carbonato cálcico. Después de que el pH haya sido aumentado hasta un nivel deseado, los fertilizantes ricos en nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) deben ser también añadidos al suelo, puesto que estos elementos son deficientes en la mayoría de los suelos ácidos.

Condición básica de los suelos

Como muchas formas de la sociedad humana, los suelos están estratificados en niveles según el rango y sobre esta base se efectúan las grandes agrupaciones. Las condiciones de los suelos vienen determinadas por el *porcentaje de saturación de bases* (PSB) definido como el porcentaje de cationes básicos intercambiables con respecto a la capacidad de cationes intercambiables del suelo. Como número divisor para separar los suelos con una *elevada condición básica* de los que presentan una *baja condición básica*, los edafólogos utilizan el valor de 35 %, de modo que los primeros serán los que tengan un PSB superior a 35 %; los citados en segundo lugar tendrán un PSB menor de 35 %. Los suelos con una elevada condición básica tienen una gran fertilidad natural para los cultivos alimentarios; aquellos que tienen una capacidad básica baja son poco fértiles y requieren un tratamiento especial, además de necesitar la aplicación de productos químicos para corregir las deficiencias. La *condición básica de los suelos* es pues de una importancia relevante en las fuentes de alimentación humana y sobre la posibilidad futura de expansión de la producción agrícola de alimentos en áreas que todavía no están siendo cultivadas.

Regímenes térmicos del suelo

El concepto de temperatura del suelo, que ya fue introducido anteriormente en el capítulo 5, es un factor importante en la determinación de las características del suelo. La temperatura actúa como control de la actividad biológica e influye sobre la intensidad de los procesos químicos que afectan a las arcillas. Por debajo del punto

Tabla 22.2. Acidez y basicidad del suelo

pH	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	6,7	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
Acidez	Acidez muy elevada		Acidez elevada	Moderada acidez	Acidez muy ligera	Neutro	Ligeramente básico	Básico	Fuerte basicidad	Excesivamente alcalino		
Necesidad de enmiendas calcáreas	Necesidad de enmienda de cal excepto para aquellos cultivos que requieren suelos ácidos		Necesidad de enmiendas de cal, excepto los cultivos tolerantes de suelos ácidos	No se requiere generalmente enmiendas		No se necesitan enmiendas calcáreas						
Frecuencia de aparición	Raros	Frecuentes	Muy comunes en suelos cultivados de los climas húmedos		Corriente en climas áridos y subhúmedos			Limitado a áreas desérticas				

Fuente: C.E. Millar, L.M. Turk y H.D. Foth (1958), *Fundamentals of soil science*, 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, véase capítulo 4.

de congelación, 0°C (32° F) no existe ninguna actividad biológica posible. Entre 0° y 5°C (32° y 45° F) el crecimiento de las raíces de muchas plantas así como la germinación de las semillas es prácticamente imposible, pero el agua puede desplazarse por el interior del suelo y la actividad del ácido carbónico puede llegar a ser importante. Un horizonte determinado, con una temperatura de 5°C actúa como una barrera térmica a las raíces de muchas plantas. La germinación de las semillas de plantas en las bajas latitudes requiere una temperatura del suelo de 24°C o más.

En cualquier momento, la temperatura de un suelo puede variar de un horizonte a otro. La temperatura cercana a la superficie experimenta tanto un ciclo diurno como anual (capítulo 5). La amplitud de estos ciclos puede ser pequeña, o muy amplia según la latitud, el grado de continentalidad y el régimen térmico (capítulo 9 y figura 9.2). El ciclo anual puede ser apenas perceptible en el clima lluvioso ecuatorial (1) pero muy desarrollado en el húmedo continental (10) y en el bosque boreal (11).

Cada pedon tiene un *régimen térmico del suelo* que le es propio y que puede ser medido y definido. Para propósitos de clasificación de los suelos el régimen térmico puede definirse de acuerdo con una temperatura del suelo media anual y por el promedio de las fluctuaciones estacionales de esta media.

Cada pedon tiene una temperatura media anual que es esencialmente la misma en todos los horizontes, a cualquier profundidad. Algunos ejemplos representativos pueden ser los siguientes:

Localidad	Temperatura media anual del suelo	
	°C	(°F)
Irkutsk, URSS	-2	(28)
Bozeman, Montana	6	(43)
Urbana, Illinois	10	(50)
Colombo, Sri Lanka	27	(81)

La tabla 22.3 da nombres y establece los límites de seis regímenes térmicos de suelos. Hay dos criterios específicos: (1) Temperatura media anual, T y (2) diferencias entre la media de verano (o estación cálida) y la media de invierno (o estación fría), $T_v - T_i$, a una profundidad de 50 cm. (La notación $0^\circ < T < 8^\circ$, se lee: "media anual térmica mayor de 0° C y menor de 8° C".)

Los regímenes térmicos de los suelos son utilizados como unos medios para clasificar ciertas subclases de suelos. De este modo, se añade un prefijo al nombre del suelo tal como sigue:

Régimen	Prefijo utilizado
Crílico	Cri-, Crio-
Frírido	Bor-
Térmico	Trop-

Utilizaremos estos prefijos en el capítulo 23.

Regímenes hídricos de los suelos

Los regímenes hídricos de los suelos explicados en el capítulo 10 son utilizados por los edafólogos americanos

Tabla 22.3. Regímenes térmicos del suelo

Nombre del régimen	Media anual de las temperaturas del suelo, °C (T)	Diferencia entre la temperatura media (°C) de la estación cálida y la estación fría ($T_v - T_i$)
Pergélico	$T < 0^\circ$	—
Crílico	$0^\circ < T < 8^\circ$	—
Frírido	$T < 8^\circ$	$> 5^\circ$
México	$8^\circ < T < 15^\circ$	$> 5^\circ$
Térmico	$15^\circ < T < 22^\circ$	$> 5^\circ$
Hipertérmico	$T < 22^\circ$	$> 5^\circ$
Equivalentes:	°C °F 0 32 8 47 15 59 22 72	$5^\circ C = 9^\circ F$

Fuente de datos: Soil Survey Staff, 1975, *Soil Taxonomy*, Agricultura Handbook n.º 436, Government Printing Office Washington, D.C., págs. 62-63.

en el moderno sistema de clasificación (en publicaciones del Soil Survey Staff del U.S. Department of Agriculture, el término de "humedad del suelo" se utiliza en lugar del de "agua del suelo"). El método de Thornthwaite de cálculo del balance hídrico del suelo ha sido adaptado, con menores simplificaciones, para el propósito de estimación de las condiciones reales de agua del suelo. Estas valoraciones no se aplican bajo condiciones especiales. Por ejemplo, en un clima seco, el balance hídrico para las reservas de agua del suelo resulta virtualmente 0 en todos los meses del año, pero en algunas depresiones de los desiertos el nivel freático está lo suficientemente próximo a la superficie para que las raíces de las plantas tengan una cantidad adecuada de agua durante parte del año.

Un importante criterio en la determinación de los diferentes regímenes hídricos es el de la diferenciación entre un suelo seco y uno húmedo. A medida que el suelo va perdiendo agua por evaporación, las restantes películas de agua de capilaridad, adheridas en las oquedades entre los granos de mineral, se reducen y, a medida que esto sucede, este agua incrementa su resistencia a ser absorbida por las pequeñas raíces de los vegetales. La unidad de medida de esta resistencia es el *bar* y mide la tensión (fuerza) que se ha de ejercer para extraer este agua. Un bar es aproximadamente igual a la presión normal, a nivel del mar, de la atmósfera (más o menos 1.000 milibares). Cuando el grado de "deshidratación" del suelo alcanza un punto en el que se ha de ejercer una tensión sobre el suelo de 15 bares o más, el agua restante del suelo se considera inaprovechable por parte de las plantas. De este modo un valor de 15 bares constituye el punto divisorio entre un suelo seco y otro húmedo.

Se reconocen cinco regímenes hídricos de los suelos, y en el moderno sistema de clasificación de los suelos de los Estados Unidos reciben diversos nombres:

Régimen Ácuico (L. *aqua*, "agua"). El suelo está saturado de agua durante la mayor parte del tiempo debido a que el nivel freático se encuentra en, o está próximo a la superficie la mayor parte del año. El régimen ácuico lo encontramos en terrenos pantanosos, marismas y

ciénagas. Su presencia es independiente del tipo de régimenes hídricos que se formen en los emplazamientos elevados adyacentes con un buen drenaje.

Régimen Údico (L. *Udus*, "húmedo"). En cualquier punto del perfil del suelo éste no está seco más de noventa días al año. Este tipo de régimen se halla en los climas húmedos (6h, 8h, 10h y 11h) tal como los definimos en el capítulo 10. El balance de agua del suelo apenas muestra deficiencia (D), o es más, no la presenta en la estación de crecimiento (verano) y hay un excedente hídrico estacional que ocasiona que el agua se desplace a través del suelo en algún momento del año. Para los régimenes hídricos con un excedente de agua en todos los meses (climas 1, 2, 6p, 8p, 10p y 11p) el nombre "údico" se modifica añadiéndole el prefijo "per–" (*perudic*). Bajo el nombre de "perudic" la tensión del agua de capilaridad apenas supera el valor de 1 bar.

Régimen Ústico (L. *ustus*, "quemado", implica sequedad). El suelo presenta una moderada cantidad de reserva de agua en la estación con condiciones favorables al crecimiento de las plantas, y ésta no está helada. Sin embargo, el suelo está seco durante 90 o más días consecutivos, en la mayoría de los años. El régimen Ústico se asocia con los subtipos semiáridos de los climas secos (4s, 5s y 9s) y con el clima tropical seco y húmedo (3).

Régimen Arídico (Tórrico) (L. *aridus*, "seco"; *torridus*, "seco" y caluroso). Ambos nombres se utilizan para designar este régimen en las diferentes categorías del sistema de clasificación de los suelos. Para los suelos cálidos, el suelo no está nunca húmedo en alguna parte, o a lo largo del perfil durante un período de 90 días consecutivos. El régimen Arídico (Tórrico) se aplica a los subtipos semidesértico (sd) y desértico (d) de los climas secos (4, 5 y 9) en una amplia franja latitudinal que va desde las zonas tropicales hasta las latitudes medias.

Régimen Xérico (Gr. *Xeros*, seco). Este tipo de régimen se puede aplicar a las áreas de clima mediterráneo (7s, 7d y 7sh), caracterizados por un largo y seco período estival y un invierno lluvioso. El suelo está seco en todo el perfil durante 45 días o más consecutivos durante la estación estival seca, pero húmedo en todo el perfil durante otros 45 días o más de la estación invernal húmeda.

En el moderno sistema de clasificación de los suelos, se toman los prefijos de los nombres de los diferentes régimenes hídricos del suelo para así designar alguno de los grandes grupos de suelos y gran parte de las subclases. Los prefijos son los siguientes:

Nombre del régimen	Prefijo
Ácuico	Acu–
Údico	Ud–
Ústico	Ust–
Arídico	Aridi–
Tórrico	Torr–
Xérico	Xer–

El régimen hídrico del suelo es un poderoso factor de control en la determinación de las propiedades de los suelos y la naturaleza de los procesos de su formación. La cantidad de agua almacenada en el suelo determina

la proporción de producción primaria de las plantas y la actividad orgánica general que sobre él se desarrolla. En el régimen Údico, el desplazamiento del agua a través del perfil es capaz de arrastrar consigo iones (lixivación). En el régimen Ústico, la limitada reserva de agua está asociada con la acumulación de carbonato cálcico. En el régimen Arídico, las sales solubles tienden a acumularse en el suelo. En el régimen Ácuico la saturación de agua impide la oxigenación del conjunto del suelo. No estaría de más puntualizar que la combinación del régimen térmico del suelo con el hídrico configuran casi todo el complejo de propiedades químicas y biológicas del suelo, asumiendo, por otro lado, que el material del substrato contiene originalmente una amplia gama de minerales silicatados.

Morfología y suelos

La configuración superficial del terreno es un factor que influye en la formación de los suelos y ello puede ser definido tan sólo por una palabra: *morfología*. La morfología incluye en su definición la abruptitud del terreno, o *pendiente*, la *orientación* de un elemento de la superficie terrestre. Otra propiedad morfológica es el *relieve*, o elevación media entre los puntos más elevados y los más bajos (cimas de las montañas *versus* partes más profundas de los valles). Un fuerte relieve y unas pronunciadas pendientes están combinadas en muchas áreas montañosas. Un relieve bajo y con pendientes poco pronunciadas se combinan en las llanuras de las tierras bajas y en los altiplanos.

La figura 22.9 muestra cómo una morfología determinada influye en el grosor de los horizontes A y B del suelo solum. Partiendo del perfil de una superficie elevada y ondulada (izquierda) como condición normal, la altiplanicie adyacente muestra unos horizontes más gruesos debido a que la eliminación de la parte superficial de suelo por erosión, es menor en pendientes suaves. En el terreno montañoso con abruptas pendientes, la erosión elimina los horizontes superiores del suelo de modo que el perfil será mucho más estrecho en su espesor. El perfil del suelo en los prados mal drenados cercanos al curso de un río posee un carácter completamente diferente. La combinación de los horizontes A y B nos muestra una gran proporción en materia orgánica; por otra parte por debajo de la capa orgánica se forma un estrato grisáceo (horizonte glei) caracterizado por una deficiencia de oxígeno. En los terrenos pantanosos adyacentes generalmente se encuentra una espesa capa de turba en la parte superior.

La orientación de la superficie del terreno influye tanto en la temperatura del suelo como en el tipo de régimen hídrico. En las latitudes medias, donde los rayos del sol inciden con un ángulo intermedio entre el horizonte y el cenit, las vertientes orientadas hacia el norte (en el hemisferio boreal) reciben muy poca insolación, de forma que las temperaturas que se obtendrán serán más bajas que el promedio y el régimen hídrico será más parecido al de un clima húmedo.

Procesos biológicos en la formación del suelo

El papel global de los procesos biológicos en la formación de los suelos incluye, también, la presencia de vegetación viva y de animales, así como los restos de sus

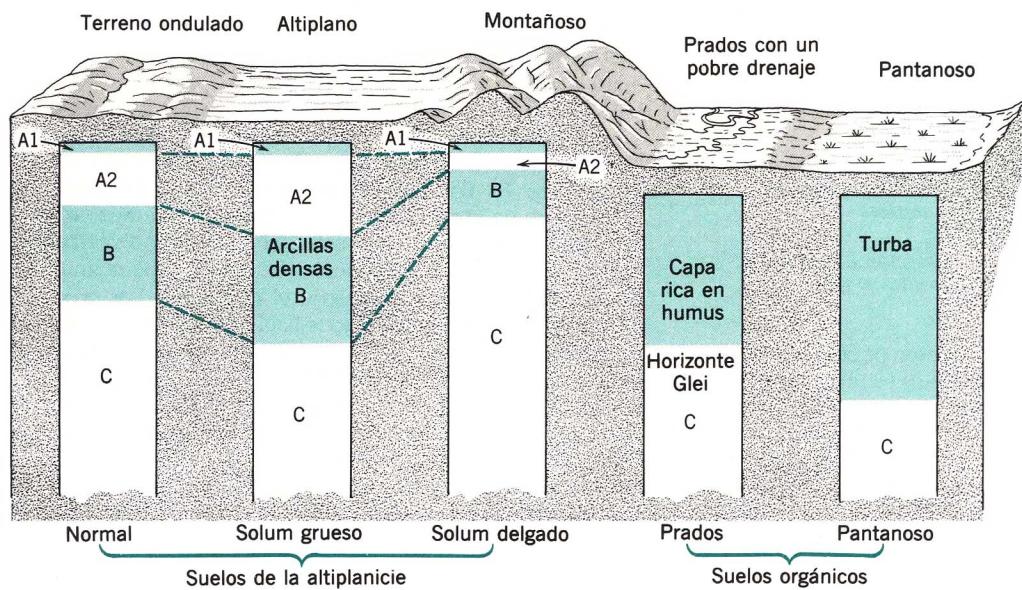


FIGURA 22.9. El relieve y la pendiente ejercen una fuerte influencia sobre el grosor y la composición del perfil del suelo. (Fuente: Departamento de Agricultura de los EE.UU. *Yearbook of American Agriculture*, 1938.)

productos orgánicos. Las plantas vivas contribuyen a la formación del suelo básicamente de dos formas diferentes. La primera es la producción de materia orgánica –la biomasa– tanto sobre el suelo, en forma de tallos y hojas, como en su interior, en forma de raíces. Esta producción primaria, expuesta en el capítulo 24, provee de material bruto y orgánico al horizonte O, y posteriormente en horizontes inferiores. Los organismos descomponedores procesan este material inicial reduciéndolo a humus y en último término a sus componentes iniciales –CO₂ y agua–. En segundo lugar significa el reciclaje de los nutrientes desde el suelo a las estructuras de las plantas que están por encima de él y su posterior devolución al suelo en forma de tejidos vegetales muertos. El reciclaje de los nutrientes es un mecanismo por el cual se evita que escapen por lixiviación junto con el excedente de agua que se desplaza hacia niveles inferiores a través del perfil. En nuestra exposición de los tipos básicos de suelos, capítulo 23, este proceso recibirá una especial atención.

Los animales que viven en el suelo, o los que viven completamente en él y lo abandonan después de haber excavado un gran número de pasadizos, son de una extraordinaria variedad en cuanto a especies y tamaños. El papel global de los animales en los procesos biológicos de los suelos no ha podido ser sobreestimado en aquellos que tienen unas condiciones de calor y humedad suficientes para mantener grandes poblaciones animales. Por ejemplo, las lombrices están trabajando continuamente el suelo no sólo cavando, sino también pasando el suelo a través de sus conductos intestinales. Ingieren gran cantidad de materia procedente de hojas muertas transportándolas desde la superficie hasta el interior, incorporándolo en los horizontes minerales. La estructura granular de un oscuro horizonte A₁₀ debe su carácter a este tipo de actividad. Muchas formas de larvas de insectos realizan una función similar. Las pequeñas cavidades tubulares del suelo están realizadas por una gran variedad de especies de insectos perforadores. Las grandes cavidades están hechas por animales superiores tales

como topillos, ardillas de tierra, conejos, tejones, perros de las praderas y muchas otras especies. Por último, el crecimiento de las raíces, seguido de su muerte y posterior putrefacción, contribuye a la formación de aberturas en el suelo.

En climas húmedos, la evolución del suelo desde un determinado substrato está acompañada por un aumento en el crecimiento de individuos de un tipo de plantas, y de posteriores cambios en las especies vegetales dominantes. Examinaremos en el capítulo 25 este proceso de evolución –llamado sucesión vegetal–. Entre los ecosistemas y las características de los suelos se dan diversas relaciones íntimamente unidas y que se harán evidentes en las descripciones de cada uno de los suelos.

El hombre es también un agente muy influyente en la naturaleza física y química del suelo. Las extensas áreas de suelos agrícolas que han sido cultivadas y abonadas desde hace siglos poseen una estructura y una composición completamente diferentes de los originales, y que ahora pueden ser considerados como otro tipo de suelos de igual importancia a la que tienen los suelos naturales. El moderno sistema de clasificación de los suelos que presentaremos en el próximo capítulo incluye aquellos producidos, o enormemente modificados, por las actividades humanas.

Revisión de los procesos pedogénicos

Los hechos y conceptos desarrollados en este capítulo han preparado el camino para una breve revisión de los diversos procesos básicos de formación de los suelos o *procesos pedogénicos*.

En los procesos pedogénicos cabe considerar cuatro fases: (1) Adición de materia a la masa del suelo, (2) Pérdidas en la masa de suelo, (3) Desplazamiento de material en su interior, (4) Transformaciones de material en su interior.

La adición de materia a la masa del suelo viene representada por el término general de *enriquecimiento del*

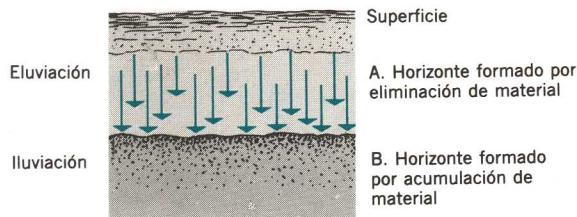


FIGURA 22.10. Los procesos de eluviación e iluviación conducen a la formación de los horizontes A y B.

suelo. El enriquecimiento inorgánico puede proceder del sedimento añadido a la superficie del suelo por escorrentía del agua (coluvial) y por viento (loess y cenizas volcánicas). Otra forma de enriquecimiento es a partir de los desechos orgánicos de las plantas que crecen sobre el suelo. Este material se acumula en el horizonte O, y produce un humus finamente dividido que posteriormente será transportado hacia los horizontes minerales.

Las pérdidas de materia de la masa edáfica consisten en la eliminación de material superficial por erosión del suelo y por *lixiviación*, el “lavado” que se realiza hacia niveles inferiores y la eliminación de materia por infiltración del agua excedente del suelo a través del perfil.

El desplazamiento de los materiales en el interior del suelo se lleva a cabo mediante diversas vías, cada una de ellas debida a diferentes causas y a menudo especialmente relacionadas con el régimen hídrico del suelo. Dos procesos simultáneos de transporte típicos de un régimen údico son la *eluviación* y la *iluviación*. El primero consiste en el transporte hacia niveles inferiores de partículas más finas, particularmente coloides (tanto minerales como orgánicos), transportándolos desde un horizonte superior (normalmente la parte inferior del horizonte A); véase figura 22.10. La eluviación deja tras sí granos gruesos minerales del esqueleto. En climas húmedos frescos, el horizonte A₂ formado por eluviación contiene grandes cantidades de cuarzo y arenas o grandes tamaños de sedimento. La *silialitzación* es un término aplicado a

este incremento en la proporción de sílice, debido a que éste permanece, mientras que otros minerales son eliminados.

La iluviación es la acumulación de materiales en el horizonte más bajo, traídos desde el horizonte superior (figura 22.10). Generalmente la iluviación sucede en el horizonte B. Los materiales que acumula pueden ser partículas de arcilla, partículas orgánicas (humus) o sesquióxidos de hierro y aluminio. El transporte de carbonato de calcio, o descalcificación, se lleva a cabo cuando el ácido carbónico reacciona con el carbonato. Los productos solubles son transportados hacia niveles inferiores. Su acumulación constituye la *calcificación*, que puede llevarse a cabo en el horizonte B o C por debajo del solum. La precipitación de las sales solubles y el proceso inverso de eliminación de las sales constituyen la *salinización* y *desalinización*, respectivamente.

Las transformaciones en la masa del suelo afectan tanto a los materiales orgánicos como a los inorgánicos. La descomposición de los minerales primarios en secundarios es una de tales transformaciones ya descritas con detalle en el capítulo 12. Por síntesis, los nuevos minerales y los componentes orgánicos pueden estar formados a partir de los productos de la descomposición. La descomposición también afecta a los minerales orgánicos. La humificación, el proceso de transformación de los tejidos vegetales en humus, puede seguirse de una total desaparición de la materia orgánica en forma de agua y dióxido de carbono por respiración.

El *grado de desarrollo de los horizontes** del suelo es el resultado de combinaciones complejas de los procesos pedogénicos ya citados. En el próximo capítulo, a medida que sea descrita y definida cada clase y subclase de suelo tendremos oportunidad de explicar cómo los horizontes varían en un lugar bajo la compleja interacción de los diferentes factores de formación de los suelos – substrato, regímenes térmicos e hídricos, actividad biológica y tiempo.

**Horzonation*, en inglés.