

2019

Guía de estudio

Génesis

del suelo

Cátedra de Edafología
Facultad de Aromía y Zootecnia
Universidad Nacional de Tucumán



LOS FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO

Ing. Agr. M.Sc. Agustín Sanzano

1. INTRODUCCIÓN

Las características del suelo están determinadas por la interacción de los cinco factores principales de su formación.

Según Jenny, esto puede expresarse de la siguiente manera:

$$s = f(\text{cl}, \text{o}, \text{r}, \text{mo}, \text{t})$$

dónde:

s: representa al suelo o una propiedad del mismo.

cl: clima.

o: organismos vivos.

r: relieve.

mo: material originario.

t: tiempo.

Este enfoque factorial es muy interesante a la hora de predecir el comportamiento de un suelo (o de alguna propiedad del mismo) en la agricultura, a partir del conocimiento de los factores medioambientales responsables de su formación. Por ejemplo, si propiedades como el contenido de nutrientes, la textura o la porosidad pueden seguirse hasta su origen, se estaría en condiciones de identificar el o los factores que las han originado, y por lo tanto seleccionar los sitios más adecuados para cultivos específicos o para decisiones de manejo del suelo apropiadas para cada fin.

La interacción entre **clima**, **organismos vivos** (llamados factores bioclimáticos generales o factores activos), **relieve**, **material originario** (llamados factores locales o pasivos) ocurre en el tiempo y en el espacio (Figura 1).

Para cada factor formador se tienen en cuenta distintas variables. Del factor clima interesan principalmente las precipitaciones y la temperatura, aunque

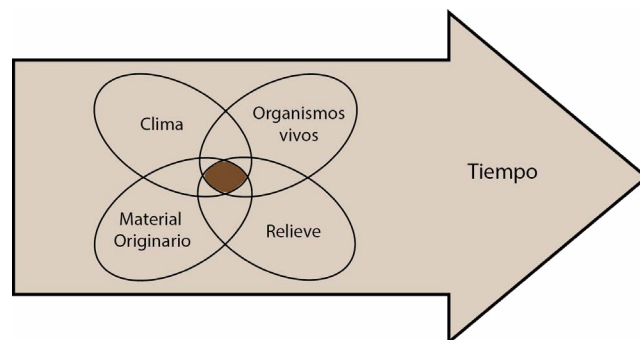


Figura 1: Esquema de la interacción de los factores que forman el suelo.

también se considera la radiación solar y la evaporación de agua. Entre los organismos vivos se considera a la vegetación natural, la macro y mesofauna y los microorganismos. Del factor material originario debe tenerse en cuenta el tipo de roca y de minerales que la componen, también el tipo de depósito o sedimento sobre el que se formó el suelo. Con respecto al factor relieve, es importante considerar la forma de terreno y la pendiente.

El tiempo es un factor formador especial, ya que la edad de un suelo debe expresarse por su grado de desarrollo y no por el número absoluto de años que tiene.

Si consideramos que el suelo es una función de los factores de formación, y que hipotéticamente se mantienen constantes todos menos uno, el suelo será una función del que varíe, estableciéndose una secuencia de suelos en función de ese factor. Así si el único factor que varía es el clima, tendremos una **climosecuencia**. Un ejemplo se observa en la provincia de Tucumán, donde es posible encontrar suelos que varían en función del clima en una transecta que va de oeste a este desde el Pedemonte hasta la Llanura Chacopampeana semiárida (de mayor a menor precipitación y suelos de mayor a menor desarrollo pedogenético, respectivamente).

Si el factor de variación fuera la vegetación,

estaríamos en presencia de una **biosecuencia**. Siendo este factor en parte dependiente del clima, puede citarse el mismo ejemplo anterior dado para la provincia de Tucumán. En la misma forma se establecerán **litosecuencias** por variación del material originario (ejemplo: en el Pedemonte de Tucumán se observan suelos vecinos y que sin embargo son muy diferentes, debido al hecho de haberse desarrollado sobre sedimentos aluviales o eólicos presentes en la región). En esta misma región también pueden observarse suelos que varían en función del relieve lo que constituye una **toposecuencia**. Cuando el factor tiempo es el factor de variación se habla de **cronosecuencias** de suelos.

2. FACTORES DE FORMACIÓN DEL SUELO

2.1. EL CLIMA

El clima es posiblemente el factor que más influencia tiene sobre los demás factores formadores. Actúa sobre el material originario porque determina la naturaleza e intensidad de la meteorización que ocurre en grandes áreas geográficas. También ejerce influencia sobre los organismos vivos y en alguna medida sobre los factores relieve y edad a través de su relación con los procesos erosivos y deposición de materiales de suelo.

Los dos elementos climáticos más importantes que han sido correlacionados con las propiedades de los suelos son la precipitación efectiva y la temperatura, ya que ambas afectan la velocidad de los procesos físicos, químicos y biológicos.

2.1.1. PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva es aquella parte de la lluvia que ingresa efectivamente al suelo, lo que permite que el agua, esencial para todas las reacciones de meteorización química, llegue a la regolita. Cuanto mayor es la profundidad de penetración del agua, mayor es la profundidad de desarrollo del suelo. El exceso de agua que percola a través del perfil del suelo

transporta materiales solubles y en suspensión desde las capas superiores a las inferiores. Por otra parte, el déficit de agua es el principal factor que determina las características de los suelos de las regiones áridas, como por ejemplo, presencia de sales solubles o carbonatos de calcio no lixiviados del perfil del suelo.

El agua proveniente de la lluvia constituye un requisito fundamental para la meteorización del material originario y el desarrollo del suelo. Para promover completamente el desarrollo del suelo, el agua no solo debe ingresar al perfil y participar en las reacciones de meteorización, sino que también debe pasar a través del él y trasladar los productos generados en tales reacciones.

Consideraremos un sitio que recibe un promedio de 600 mm de precipitación por año. La cantidad de agua que ingresa al suelo y se mueve a través del mismo está determinada no solo por la precipitación anual total, sino también por otros cuatro factores:

1. **Distribución estacional de la precipitación:** Los 600 mm de lluvia distribuidos uniformemente a lo largo del año, con aproximadamente 50 mm cada mes, es probable que causen menos lixiviación o erosión del suelo que la misma cantidad anual de lluvia que cae a una tasa de 100 mm por mes durante una temporada de lluvias de seis meses (Figura 2)
2. **Temperatura y evaporación:** En un clima cálido, la evaporación de los suelos y la vegetación es mucho más alta que en un clima frío. Por lo tanto, en el clima cálido, solo una parte de los 600 mm estarán disponibles para moverse a través del perfil. La mayoría o todos se evaporarán poco después de haber caído. Por lo tanto, 600 mm de lluvia pueden causar más lixiviación y desarrollo de perfiles en un clima frío que en un clima más cálido. Un razonamiento similar sugeriría que la lluvia concentrada durante un invierno suave puede ser más efectiva en la lixiviación del suelo que la misma cantidad de lluvia concentrada en un verano caluroso (Figura 3).

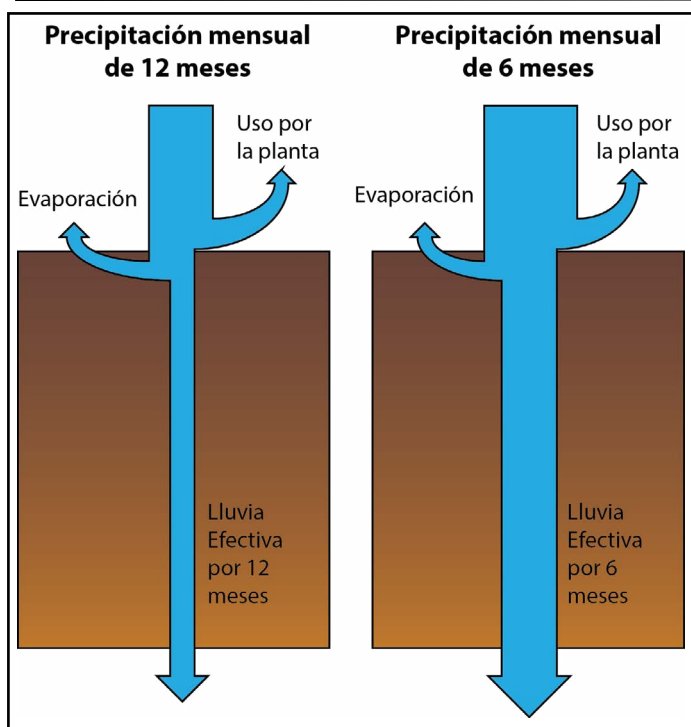


Figura 2: Influencia de la distribución de las precipitaciones durante el año en la entrada de agua al perfil.

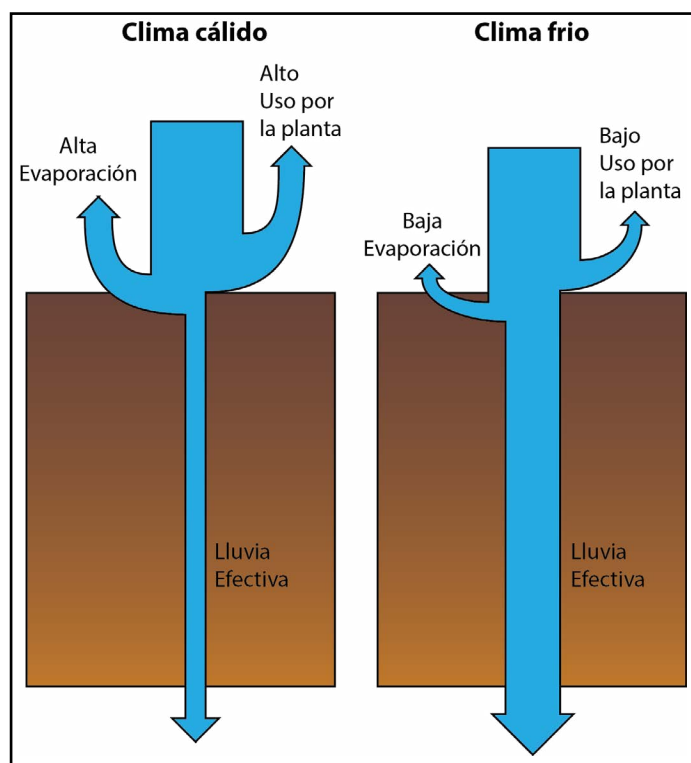


Figura 3: Influencia de la temperatura y la evaporación en la entrada de agua al perfil.

3. **Topografía:** El agua que cae en una pendiente excesiva escurrirá hacia abajo tan rápidamente

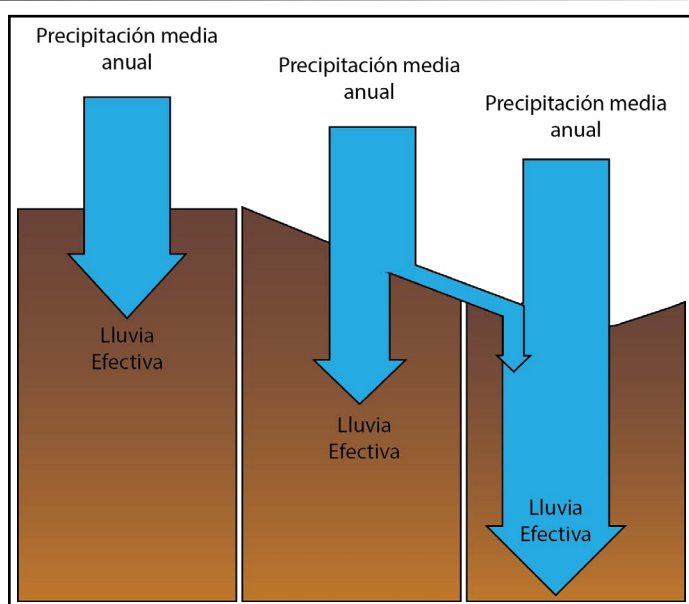


Figura 4: Influencia de la topografía en la entrada de agua al perfil.

que solo una pequeña porción entrará en el suelo donde cae. Por lo tanto, aunque reciban la misma precipitación, un sitio de relieve cóncavo o de escasa pendiente experimentará más infiltración y lixiviación que un sitio con una pendiente excesiva. El sitio cóncavo recibirá mayor cantidad de lluvia efectiva porque además de la lluvia directa, también recogerá la escorrentía de los sectores más altos del relieve sitio (Figura 4).

4. **Permeabilidad:** Incluso si las tres condiciones anteriores son las mismas, más agua de lluvia se infiltrará y lixiviará a través de un perfil arenoso que en uno arcilloso. Por lo tanto, se puede decir que en el perfil arenoso es mayor la precipitación efectiva y se puede esperar un desarrollo más rápido del suelo (Figura 5)

Por lo anteriormente expuesto, podríamos suponer que si es mayor la precipitación efectiva, el pH del suelo será menor, la profundidad de las sales solubles y el carbonato de calcio será mayor y habrá un mayor contenido de materia orgánica, de nitrógeno y de arcilla.

Sin embargo, en muchos lugares que tuvieron en otra época un clima diferente al actual pueden ob-

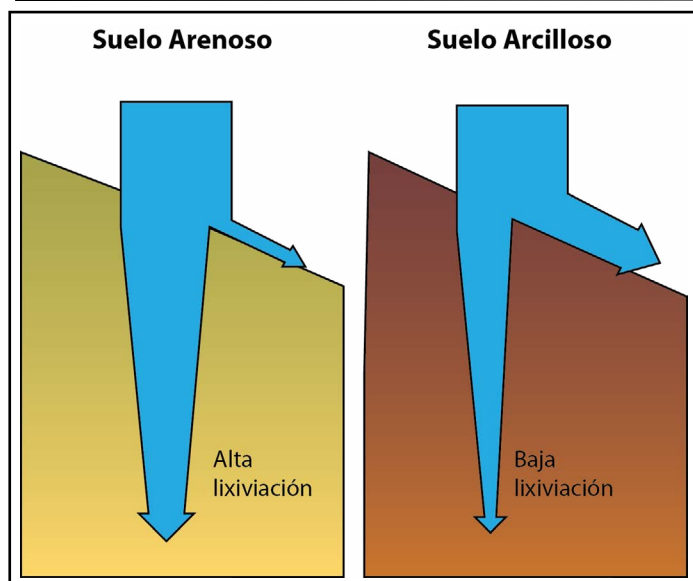


Figura 5: Influencia de la permeabilidad en la entrada de agua al perfil.

servarse suelos fuertemente meteorizados y lavados en regiones áridas, los cuales permanecen como relictos, sin tener correspondencia con el clima actual de la región donde se encuentran.

2.1.2. TEMPERATURA

La **temperatura** actúa duplicando la velocidad de las reacciones químicas por cada aumento de 10°C. Junto a la humedad del suelo, la temperatura tiene influencia sobre el contenido de materia orgánica del suelo, y tiene un rol muy importante en el balance entre el crecimiento de las plantas (el aporte de biomasa) y la descomposición microbiana.

Si las temperaturas son altas y el agua es abundante en el perfil, el proceso de meteorización y lavado será máximo. Los suelos poco desarrollados de los climas fríos contrastan con los perfiles profundos fuertemente meteorizados de las áreas tropicales (cálidas y húmedas).

La temperatura también ejerce una marcada influencia en el tipo y cantidad de vegetación presente en un área y con esto en la cantidad y clase de materia orgánica producida. Igualmente la velocidad de descomposición de la materia orgánica es mayormente controlada por la temperatura. Estas acciones juegan un rol decisivo en los tipos de humus producidos.

Varias propiedades del suelo aparecen como dependientes de la temperatura: con el incremento de la misma el color del suelo es más rojizo, las bases se lavan más completamente, el contenido de materia orgánica y nitrógeno es menor, mientras que el contenido de arcilla es mayor.

El análisis de la acción combinada de las precipitaciones y las temperaturas a través de las relaciones precipitación evapotranspiración (P-Etp), permite obtener el “**drenaje climático**” que representa la diferencia entre precipitación y evaporación:

$$D = P - E$$

El drenaje climático tiene una gran importancia en los procesos de remoción y translocación. Se ha demostrado que el lessivage de los coloides minerales es mínimo para un drenaje calculado de 90 a 200 mm, pero que incrementa notablemente cuando supera los 200 mm.

El esquema de la Figura 6 da una idea muy generalizada de los principales tipos de suelo en función del drenaje climático y de la temperatura, mientras que la Figura 7 muestra la influencia del clima (régimen de lluvias y de temperatura) sobre la vegetación natural.

Es necesario aclarar que el clima atmosférico difiere del clima edáfico por lo que se recomienda ver los regímenes hídricos y térmicos del suelo en la cartilla correspondiente.

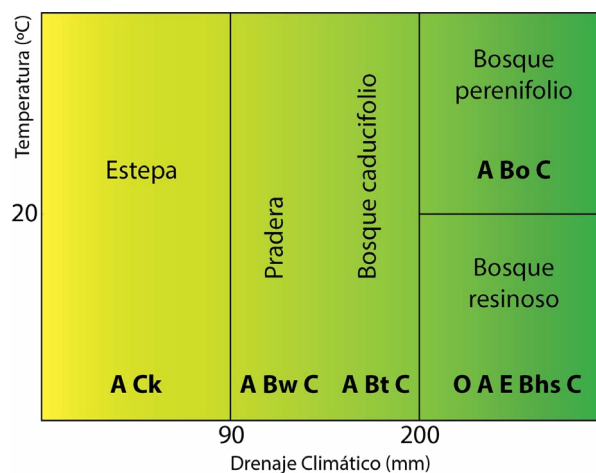


Figura 6: Relación entre la temperatura, el drenaje climático y los tipos de suelos.

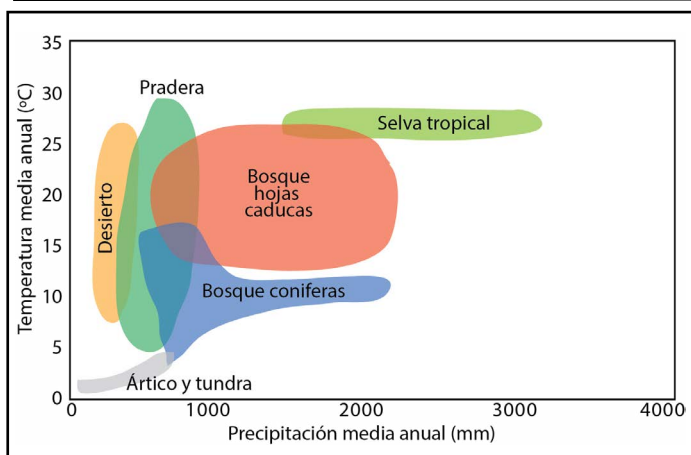


Figura 7: Efecto del clima sobre la vegetación natural.

2.2. LOS ORGANISMOS VIVOS

Este factor actúa como una variable dependiente e independiente al mismo tiempo. Anteriormente se mencionó que es dependiente del clima pero lo es también de los otros factores formadores. Actúa como variable independiente, por ejemplo, cuando contribuye con el aporte de materia orgánica al suelo, suministrando residuos orgánicos tales como ramas, hojas, semillas, frutos, etc.

La acumulación de materia orgánica, la descomposición biológica de la misma, el reciclaje de nutrientes y la estabilidad de la estructura son ejemplos de la actividad de los organismos presentes en el suelo. La vegetación también actúa como agente protector del impacto de la gota de lluvia, reduce la velocidad de escurrimiento y la erosión, y hace más lenta la remoción de los minerales desde la superficie hacia las capas inferiores del subsuelo. Por otra parte, los ácidos orgánicos producidos a partir de ciertos tipos de hojarasca de plantas contienen hierro y aluminio en solución que forman complejos que aceleran el movimiento descendente de estos metales y su acumulación en el horizonte B.

En la Figura 8 se observa el rol del tipo de vegetación en la formación de dos suelos formados bajo pradera y bajo bosque en dos sitios cercanos entre sí. En el primer caso, la mayor parte de la materia orgánica adicionada proviene de un profundo sistema radicular de las gramíneas. En cambio, en el bosque, la adición es superficial y consecuencia del

aporte de la hojarasca. Otra diferencia es la gran cantidad de ácidos orgánicos generados por la vegetación de bosque que inhibe la acción de microorganismos responsable de la degradación de la materia orgánica. Todo ello resulta en la presencia de un horizonte A de mayor espesor en el suelo bajo pradera que en el que se desarrolló bajo bosque, el que suele tener un horizonte orgánico (O) superficial y un delgado horizonte A.

La comunidad microbiana predominante en el suelo de pastura es bacteriana, mientras que el suelo de bosque dominan los hongos. Ello influye en la estabilidad de los agregados y en el ciclado de nutrientes. El horizonte E, lavado y de color claro que aparece debajo del O y del A en el perfil del suelo de bosque es consecuencia de la acción de los ácidos orgánicos generados principalmente por los hongos en la descomposición de la hojarasca ácida que cae sobre la superficie del suelo.

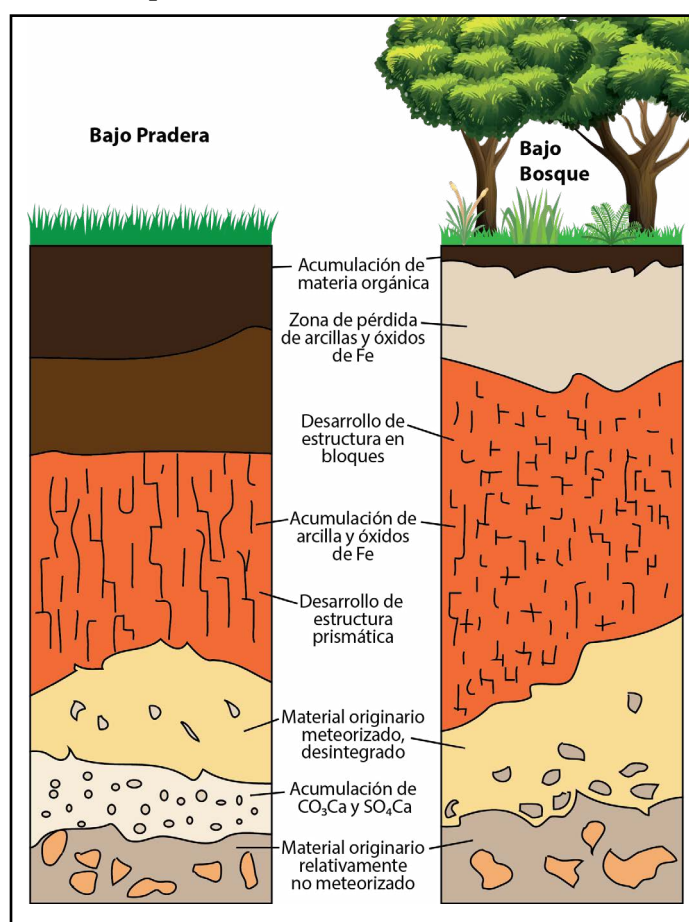


Figura 8: Efecto de la vegetación natural sobre la génesis del suelo.



El tipo de vegetación también influye sobre el reciclado de cationes en suelo. Las diferencias incluso pueden observarse no solo comparando suelos de pradera con suelos de bosque, sino también entre distintos tipos de bosques. Si la hojarasca que llega al suelo es de especies coníferas (pinos, cipreses, abetos, etc.) solo una pequeña parte del calcio, magnesio y potasio serán reciclados, mientras que si el bosque está compuesto por especies de hojas caducas (por ejemplo lenga, ñire o coihue en la Patagonia argentina) el ciclaje será mayor por mayor disponibilidad de los mismos para la absorción radicular. La coníferas dejan residuos resinosos de lenta descomposición y un grado de acidez en el suelo significativamente mayor que las especies de hojas caducas de los bosques templados.

También interesa la heterogeneidad de las praderas, ya que en las tierras semiáridas, la competencia por el agua no permite a la vegetación cubrir totalmente la superficie del suelo. La vegetación dispersa altera las propiedades del suelo de varias maneras: las plantas retienen polvo arrastrado por el viento, generalmente rico en limo y arcilla, las raíces pueden tomar nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio y azufre desde las áreas de suelo desnudo y depositarlos luego en forma de residuos bajo la canopia, lo que genera una declinación de la fertilidad de las áreas entre plantas volviéndolas menos propicias para el establecimiento de nueva vegetación. Se crean "islas de vegetación mejor con un horizonte A de mayor espesor y a menudo con mayor lavado del carbonato de calcio.

El rol de los animales en la formación del suelo es a veces no considerado. Los animales más grandes como ocultos o quirquinchos suelen llevar tierra desde los horizontes profundos hacia los superficiales. Los túneles abiertos en superficie inducen el movimiento de agua y aire entre capas del suelo. Cuando viejas madrigueras en los horizontes inferiores son rellenadas con suelo proveniente del horizonte A se crean perfiles característicos conocidos como **crotovinas**.

Las lombrices, termitas y otros animales pequeños pueden ocasionar efectos considerables

en la formación del suelo. Las lombrices ingieren partículas de suelo y residuos orgánicos, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes para las plantas a través de sus deposiciones. También airean y remueven el suelo e incrementan la estabilidad de los agregados y la infiltración de agua. Las termitas y las hormigas construyen montículos transportando material desde un horizonte a otro. Las mezclas que provocan los animales son llamadas **pedoturbación**. Los microorganismos del suelo tienen diversos roles en la formación del mismo. Las bacterias autótrofas son capaces de realizar los procesos de amonificación y nitrificación para oxidar el nitrógeno a nitrato o bacterias que oxidan el azufre a sulfato para poner a ambos en las formas disponibles para las plantas. Otras bacterias heterótrofas pueden realizar la fijación libre o simbiótica del nitrógeno, y este último proceso puede ser realizado también por hongos micorrízicos. También se destaca el rol de los microorganismos en general como descomponedores de los compuestos orgánicos de los residuos vegetales y animales para permitir su mineralización.

2.3. EL MATERIAL ORIGINARIO

El material originario tiene una gran influencia en las propiedades de los suelos jóvenes, tales como color, textura, estructura, mineralogía y pH. Por ejemplo, un suelo podría heredar una textura arenosa proveniente de un material originario compuesto de granito o arenisca que son ricos en cuarzo y resistentes a la alteración. La textura a su vez influye en la permeabilidad del suelo, en la percolación del agua y por consiguiente en los procesos de transporte de partículas de suelo y de nutrientes.

Jenny define al material original como el estado del sistema suelo al tiempo cero de formación. A medida que transcurre el tiempo, los efectos del material de origen van disminuyendo, aun cuando persistan algunos de ellos en los suelos viejos.

Los depósitos loésicos, aluviales y morénicos no consolidados constituyen materiales originales importantes. Sobre estos materiales los procesos de formación del suelo son relativamente rápidos por



que se parte de un material suelto que presenta una gran superficie atacable.

La composición química y mineralógica del material originario influye tanto en la velocidad de los procesos de meteorización química como en la vegetación natural que se desarrolle en ese suelo. Por ejemplo, la presencia de caliza en el material de origen hará más lento el proceso de acidificación de los suelos que se desarrollan típicamente en los climas húmedos. Además, la vegetación que crece sobre este tipo de material produce hojarasca con contenidos relativamente altos de calcio, lo que también contribuye a demorar el proceso de acidificación y el desarrollo del suelo. En cambio el granito (roca cristalina ácida) se altera para dar lugar a suelos ácidos con pocas bases y poca reserva de nutrientes, especialmente en los climas húmedos. Los basaltos (roca cristalina básica) generalmente contienen Fe, Mg y a veces Ca lo que lleva a que se alteren rápidamente y por lo tanto, los suelos que originan son ricos en bases y de color rojizo por la presencia de Fe.

El material originario también influye en la cantidad y tipo de arcilla presente en el perfil del suelo. Esto ocurre porque puede contener por sí mismo cantidades y tipos variables de minerales de arcilla antes de que sucedan los procesos de meteorización. Puede suceder también que tenga una fuerte influencia sobre el tipo de arcilla que se genera a medida que el suelo evoluciona, como ocurre, por ejemplo, en los suelos Vertisoles (intrazonales) que provienen de materiales originarios muy ricos en arcillas expansibles.

Si los materiales originarios son volcánicos imparten a los suelos características particulares como presencia de un alúmino-silicato llamado alófano, que se acompleja con la materia orgánica en la parte superior del solum. Estos suelos son también intrazonales.

Cuando se está en presencia de un conjunto de suelos con propiedades diferentes que resultan solo de la variación del material original, mientras que los restantes factores de formación permanecen constantes, se habla de **litosecuencia**.

2.4. EL RELIEVE

La configuración de la superficie de la tierra (topografía) se describe en términos de elevaciones relativas, pendientes y posiciones en el paisaje de pequeñas áreas que pueden causar fuertes variaciones en los suelos que se encuentran dentro de la misma. La topografía es determinante para la precipitación efectiva ya que influye fuertemente en la relación infiltración-escurrimiento. También determina la magnitud de la influencia de la capa freática en la génesis del suelo. Los suelos permeables que se encuentran en áreas de poca pendiente (de relieves subnormales y chatos) reciben e infiltran casi toda el agua de lluvia. En cambio, los suelos de relieve excesivo infiltran una pequeña parte del agua caída y escurren el resto. Entonces, las depresiones y áreas bajas reciben agua adicional, subiendo el nivel de la capa freática y ocurriendo una génesis de suelo distinta a la que se esperaría para las precipitaciones de la región. El efecto de la relación entre el agua en el suelo y la génesis del mismo es más marcado en las regiones húmedas que en las regiones áridas.

El relieve se relaciona con varias propiedades del suelo, tales como la profundidad y espesor del horizonte A y del solum; el régimen hídrico del perfil (ver Regímenes hídricos y térmicos en cartilla correspondiente); el color del suelo; el pH, el contenido de sales solubles, la temperatura del suelo, etc.

La acción del relieve sobre la génesis del suelo puede ejercerse a través de acciones directas e indirectas. En el primer caso, si la longitud y/o el gradiente de la pendiente son grandes, el escurrimiento superficial también será de gran magnitud ocurriendo el arrastre y pérdida de la capa superior del suelo, proceso conocido como erosión hídrica. Evidentemente el efecto directo es un retardo en el proceso de evolución del suelo. Generalmente, un incremento del grado de la pendiente se asocia con menor crecimiento de las plantas, menor contenido de materia orgánica, menor meteorización, menor lavado y eluviación. Consecuentemente los suelos son menos desarrollados en las áreas de relieve excesivo, casi siempre con horizontes A de menor espesor. Los cambios

de color que se observan en la capa superficial de muchos campos, son consecuencia del proceso de erosión, a partir de que las áreas erodadas son más claras, mientras que las zonas de deposición del material perdido son más oscuras y con engrosamiento del espesor del horizonte A (Figura 9). Existen algunas situaciones en pendientes inclinadas en las que la tasa de erosión está en equilibrio con la tasa de formación de suelo, en donde a medida que se reduce el espesor del horizonte A, la parte superior del horizonte B se incorpora a la parte inferior del horizonte A. Bajo estas condiciones, el suelo puede mantener sus características por un largo período de tiempo.

En la Figura 10 se observa una secuencia de suelos que varían en función de su posición en el relieve, en donde la relación entre la infiltración y el escurrimiento han influido sustancialmente en el desarrollo de los perfiles de suelo. Al grupo de suelos que forman parte de la **toposecuencia** se les llama **catena**.

Otra acción directa del relieve como factor formador del suelo es el escurrimiento subsuperficial que ocurre en suelos con pendiente. Consiste en la migración de elementos coloidales o solubles por acción del agua, llamado **lavado oblicuo o lateral** que

ocurre en presencia de una capa de lenta o nula permeabilidad que se encuentra por debajo de la superficie del suelo y que da lugar a perfiles diferentes a lo largo de la pendiente, generalmente de materiales más gruesos en las zonas de pérdida y materiales más finos en las de deposición.

Entre las acciones indirectas del relieve, la posición de los suelos en el paisaje juega un importante rol en la presencia y el nivel de la capa freática (Figura 11), lo que a su vez condiciona significativamente la génesis del suelo. La capa freática usualmente tiene un relieve parecido, aunque con menos amplitudes, al de la superficie de la tierra. Esto implica que está más próxima a la superficie en las depresiones que en los puntos altos del paisaje.

En los suelos bien drenados que se encuentran en posiciones altas del relieve, la capa freática no está presente o se encuentra lejos de la superficie. Los suelos pobremente drenados aparecen casi siempre en las partes bajas del paisaje con la capa freática lo suficientemente cerca de la superficie como para causar diferentes grados de falta de oxígeno y reducción. Estos suelos generalmente tienen un horizonte A de color oscuro a causa del alto contenido de materia orgánica y un subsuelo que tiende a ser gris o verdo-



Figura 9: Lote con variados colores en el horizonte superficial por erosión en Arcos de la Frontera, España.

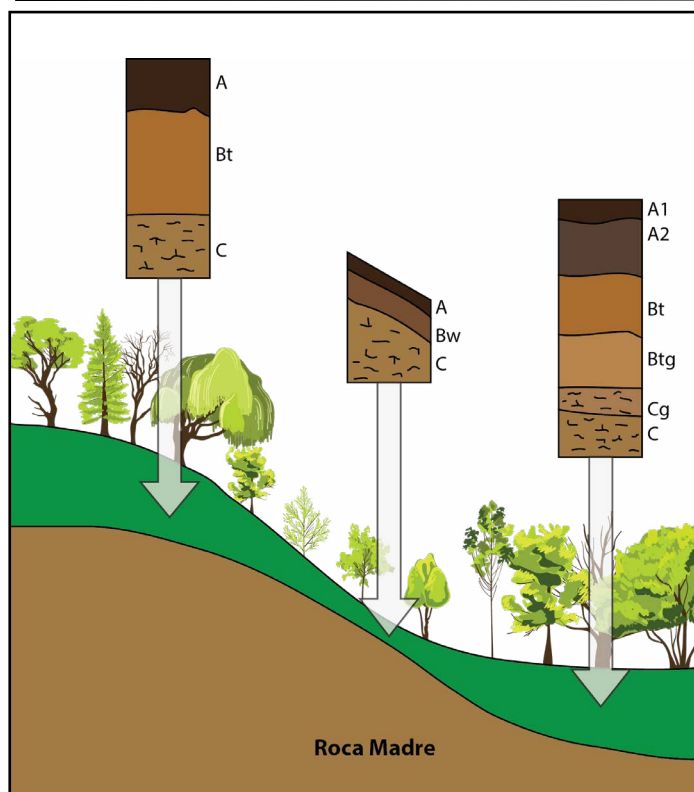


Figura 10: Influencia del relieve sobre las propiedades del suelo

so. Son suelos que presentan signos de hidromorfía en distinto grado, en los que la saturación con agua inhibe además el movimiento de agua hacia abajo, así como la translocación de arcilla y materiales solubles hacia las capas profundas.

2.5. EL TIEMPO

El tiempo considerado como un factor de formación de suelos es en realidad una variable independiente, ya que no está influenciado por ningún otro factor ambiental. Es difícil de evaluar con exactitud, aunque se ha intentado hacerlo, por ejemplo por experimentos de laboratorio que evaluaron tiempos de descomposición de rocas diferentes, o por la velocidad de formación de una unidad de profundidad de suelo o por la etapas de desarrollo del perfil de suelo. Nosotros nos referiremos aquí a la **edad** del suelo tomando en cuenta este último aspecto. El reloj de formación de suelo comienza a funcionar, por ejemplo, cuando un deslizamiento de tierra expone una roca nueva al ambiente en la superficie o cuando



Figura 11: Suelo pobremente drenado con capa freática presente. Famaillá, Tucumán.

el desborde de un curso de agua deposita una nueva capa de sedimentos en la llanura de inundación, o cuando un glaciar se derrite y deja su carga de escombros minerales. Este material originario está en su tiempo 0 de evolución, siendo sus características las propias de dicho material. Aquí comienza el proceso de evolución, es decir comienza la acción de los otros factores formadores, y estamos en presencia de un suelo **joven**, sin que ello signifique que tiene pocos años. Lo que puede suceder es que el material originario sea resistente a la alteración, o que las condiciones bioclimáticas no permitan una rápida evolución, o que se encuentre en una fuerte pendiente. Evidentemente este suelo joven todavía conserva muchas propiedades similares al material de partida. Raramente un suelo puede formarse tan rápidamente que los efectos del tiempo en los procesos de génesis puedan medirse en el lapso de la vida de un ser humano.

Si estamos en un relieve normal de clima cálido y húmedo, con material originario permeable y alterable, la meteorización y la evolución del perfil serán mucho más rápidas que en un sitio con pendiente, en un clima frío y seco y con materiales resistentes a la alteración.

Un suelo **maduro** es un suelo que ha terminado su evolución, que se encuentra en equilibrio con el bioclima, siendo por lo tanto estable. Si la vegetación corresponde al climax de la región considerada, se puede hablar de suelo climácico, pedoclimax o climax edáfico. En esta fase, las propiedades adquiridas durante la pedogénesis dominan sobre las heredadas del material original. Con el correr del tiempo un suelo maduro se transforma en un suelo viejo o senil, en el cual las características adquiridas predominan netamente, siendo difícil distinguir las heredadas del material original y con presencia de materiales muy resistentes a la alteración.

Existen igualmente suelos que son el resultado de una evolución muy vieja, bajo condiciones de clima y vegetación diferentes a las reinantes actualmente. Si estos suelos se encuentran en la superficie se los llama **paleosuelos** o suelos relictos y si se encuentran sepultados por depósitos o suelos más recientes, constituyen los suelos **fósiles**.

La Figura 12 ilustra los cambios que normalmente se producen durante el desarrollo del suelo en un clima cálido y húmedo. Durante los primeros 100 años, líquenes y musgos se establecen en la roca desnuda y comienzan a acelerar la ruptura y acumulación de polvo y materia orgánica. Dentro de unos pocos años, pastos, arbustos y árboles pequeños han ocupado con sus raíces una capa de roca desintegrada, lo que contribuye en gran medida a la acumulación de materiales orgánicos y a la formación de los horizontes de A y C. Durante los siguientes 100 años, más o menos, se establecen especies arbóreas y se multiplica la actividad de pequeños organismos que transforman la hojarasca generando el horizonte O. El todavía delgado horizonte A comienza a oscurecerse y a desarrollar una estructura granular estable. Pronto aparece, por debajo del horizonte A una zona de color blanquecino (horizonte E) en la que los

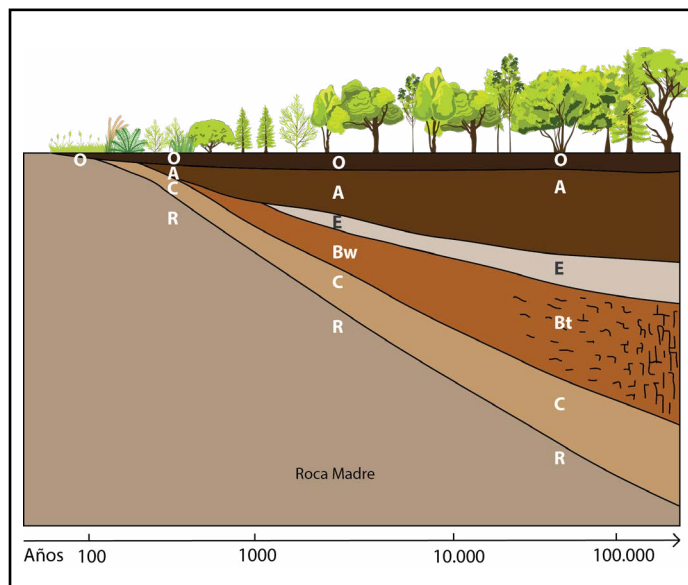


Figura 12: Diferentes estados de desarrollo del perfil a lo largo del tiempo

productos solubles de la meteorización, los óxidos de hierro y las arcillas se mueven hacia abajo junto con el agua y los ácidos orgánicos provenientes de la capa de hojarasca. Esos materiales transportados se acumulan en las capas inferiores para formar el horizonte B. El proceso continúa, con más acumulación de arcilla silicatada y formación de estructura en bloques, espesando el horizonte, el cual ya puede distinguirse. Eventualmente, las arcillas silicatadas pueden alterarse y la sílice lavarse y un nuevo tipo de arcilla con menos sílice forma el horizonte B. Esas arcillas, pueden mezclarse o recubrirse con óxidos de hierro y aluminio, formando un horizonte B de color rojizo.

A medida que el perfil completo continúa profundizándose con el tiempo, la zona de roca meteorizada y no consolidada (regolita) puede tener muchos metros de espesor.

Una **cronosecuencia** está constituida por suelos diferenciados sólo por la edad de sus materiales originales, permaneciendo constantes los restantes factores de formación. A veces pueden encontrarse cronosecuencias en suelos de las terrazas aluviales de distinta edad: las terrazas altas han estado expuestas a la acción de los otros factores formadores por más tiempo que las terrazas bajas de un curso de agua (depositadas más recientemente) y por lo tanto estas últimas son más jóvenes y están más proclives a recibir nuevos aportes de material originario.

2.6. EL HOMBRE

En las regiones en las que se practica la agricultura desde hace cientos o miles de años, es común que los residuos orgánicos provenientes de la alimentación humana se adicionen al suelo, modificando de manera significativa las características del mismo. La presión poblacional sobre los suelos periurbanos o incluso sobre los suelos rurales en países densamente poblados es cada día mayor. Los excrementos humanos, así como otros residuos generados por la actividad del hombre contribuyen a formar una delgada capa de color oscuro, fuertemente enriquecida en fósforo. El uso intensivo de las tierras agrícolas, ganaderas y forestales, así como la urbanización han producido grandes cambios en las propiedades de los suelos. Muchos de esos cambios son conocidos e incluyen a la erosión, el drenaje, la salinización, el agotamiento o el enriquecimiento de la materia orgánica y de los nutrientes, la compactación y las inundaciones.

A veces, la disposición de desechos sólidos produce un suelo nuevo que es poco más que una simple acumulación de basura. Millones de hectáreas de suelo en el mundo poseen propiedades que son más el resultado de la actividad humana que de los otros factores formadores. En China, por ejemplo, se han creado tierras para la producción de alimentos, con enormes movimientos de suelo y modificación del paisaje natural para cultivar arrozales. En Europa, donde los agricultores han realizado producciones intensivas con abonado orgánico durante muchísimos años se han generado horizontes antrópicos (horizonte A generalmente de gran espesor y fuertemente enriquecido en fósforo), a punto tal de que los arqueólogos utilizan las cantidades de materia orgánica y fósforo como signo de la actividad humana en el pasado. Otro ejemplo de la “construcción” de suelos lo constituyen los polders en Holanda (Figura 13), que son tierras bajas en las que se ha drenado el agua de mar, y se han construido diques para protegerlas.

Es evidente que la acción humana produce cambios en los ecosistemas naturales que tienen im-



Figura 13: Un ejemplo de suelos “construidos” por el hombre: polders en Holanda. Foto: Jeroen Komen CC BY-SA 2.0

pacto sobre los procesos de formación del suelo, modificando la evolución natural del mismo.

La disminución de la capacidad actual o potencial de un suelo para producir cuali o cuantitativamente bienes o servicios se llama **degradación**. A veces el concepto de degradación se relaciona con los cambios desfavorables operados en relación con un estado anterior o incluso con un estado ideal de ese suelo, como cuando la erosión se evalúa por comparación del espesor del horizonte A del suelo en cuestión con el espesor de un suelo ideal o del suelo virgen. Este es un concepto estático de la degradación. Otras veces se habla de la degradación potencial, como la degradación prevista para un futuro en el supuesto que las condiciones actuales no varíen.

La degradación puede ocurrir de manera brusca o directa como la deforestación y el cultivo; o en forma gradual o indirecta por sustitución de la vegetación primitiva (climax) por una secundaria.

La deforestación de un suelo en pendiente, sometido a la acción de lluvias violentas, puede provocar una erosión rápida del perfil, poniendo al descubierto el material de origen. En situaciones de relieve menos acusados, aunque no se consideran degradaciones propiamente dichas, puede modificarse la evolución natural por la actividad agrícola que genera, por ejemplo, migración del humus hacia ca-

pas subsuperficiales (horizonte ágrico); o un engrasamiento y elevación del horizonte de superficie por la adición de residuos orgánicos (horizonte plaggen); o por el aporte de abonos y/o enmiendas (horizonte antrópico) o por acidificación de la capa superficial (horizonte úmbrico). La degradación de los suelos no es necesariamente un proceso continuo, sino que puede ocurrir en un período relativamente corto entre dos estados de equilibrio ecológico.

Entre los principales procesos de degradación de los suelos puede mencionarse a la **erosión hídrica**, que es el desgaste de la superficie de la tierra por la acción del agua de escurrimiento, y que es dependiente del clima (lluvia), del relieve, de la erodabilidad del suelo y del manejo que el hombre hace para la producción de bienes y servicios (Figura 14 y 15).

Es también importante, especialmente en las regiones áridas y semiáridas el proceso de **erosión eólica**, que abarca tanto la remoción y el depósito de partículas del suelo por la acción del viento, como los efectos abrasivos de las partículas móviles cuando son transportadas (Figura 16 y 17).

Otro importante proceso de degradación es el de **salinización-sodificación**, que comprenden el proceso por el cual se acumulan sales solubles en un suelo (salinización) o por el que se incrementa el

contenido de sodio intercambiable en el suelo (sodificación, o alcalinización). Estos procesos, que se observan en La Figura 18, también son fuertemente dependientes del factor clima (relación Precipitación / Evapotranspiración); del relieve (altura del nivel freático) y del manejo (riego con aguas salinas y/o sódicas, por ejemplo)

La degradación **química** incluye procesos como la lixiviación de bases, que lleva a la acidifica-



Figura 15: Erosión hídrica severa en un campo cultivado de maíz. Tucumán, Argentina.



Figura 16: Proceso de erosión eólica en grado severo, Texas, EEUU.



Figura 14: Erosión hídrica extrema a la vera de la ruta 336 en Gobernador Garmendia, Tucumán.



Figura 17: Efecto de la erosión eólica en Burruyacú, Tucumán.



Figura 18: Lote con signos de salinidad y sodicidad sobre la superficie. Leales, Tucumán.



Figura 19: Permeabilidad restringida por el efecto del "pie de arado"

ción y aparición de toxicidad de aluminio y la formación de toxicidad es diferentes de las debidas al exceso de sales. Esta degradación también depende el clima ($P > E_{pt}$); del suelo (baja CIC y bajo poder buffer) y de la acción humana (el reemplazo del monte natural por cultivos incrementa el lavado de bases y además algunos cultivos extraen muchas bases). También puede ocurrir (aunque en forma más localizada) la toxicidad debido al volcado de residuos urbanos, industriales, radioactivos o petrolíferos.

La degradación **física** se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo, como son la porosidad, infiltración, permeabilidad, la densidad aparente y la estabilidad estructural. También depende parcialmente del clima (agresividad de las lluvias); del suelo (por ejemplo, poca materia orgánica o alto porcentaje de limo); del hombre cuando laboreo el suelo y genera un pie de arado (Figura 19), o no deja cobertura, o sobrepastorea, o compacta con maquinaria pesada, etc.

Finalmente la degradación **biológica** engloba todos los procesos que aumentan la velocidad de mineralización del humus, es decir la pérdida de materia orgánica resistente del suelo, lo que excluye los residuos orgánicos frescos, no humificados. Este forma de degradación depende del clima (temperatura y humedad del suelo); del suelo (pH, textura; relación C/N) y por supuesto del hombre por la relación C/N de los rastrojos, por la cobertura que cambia la

humedad y la temperatura del suelo, que a su vez regulan la actividad biológica del mismo.

3. INTERACCIÓN ENTRE LOS FACTORES FORMADORES

Aún cuando se vienen analizando los factores de formación del suelo de modo individual, es evidente que en la naturaleza ellos interactúan continuamente desde la meteorización del material originario y durante las distintas etapas de desarrollo de un suelo. Veremos a modo de ejemplo algunas de estas interacciones.

3.1 CLIMA Y TIEMPO

Los suelos tienen propiedades fluctuantes transitorias, como el contenido de agua y la temperatura. Pero la mayoría de las propiedades toman años, siglos o milenios para desarrollarse, se vuelven evidentes y quizás se aproximan a un estado estable con cambios que suelen ser insignificantes en el corto plazo. Las diferentes características de un suelo son resultado de procesos de distinta velocidad. Por ejemplo, un pedón que se desarrolla sobre una roca calcárea o en un lugar expuesto a lluvia moderada puede mostrar un aumento temprano en la materia orgánica, acercándose a un nivel estable dentro de unas pocas décadas después del establecimiento de



la vegetación. En cambio, la lixiviación de la calcita y la formación de arcilla normalmente tardarían más tiempo en alcanzar niveles estables. Son cambios que se observan como una especie de vista en cámara lenta, el incremento de materia orgánica puede verse por el engrosamiento del horizonte A en un suelo de pradera o de un O en uno bajo bosque, y también por el aumento de la concentración de la misma. El CO_3Ca se lixivia en parte y una porción precipita en un horizonte B calcáreo que poco a poco se desplaza hacia abajo y hacia fuera del pedón. Mientras tanto, la arcilla no solo se forma, sino que también se mueve desde los horizontes A y E, y se deposita abajo formando el horizonte Bt de arcilla iluvial. Estos lentos cambios en las características del suelo permiten la evolución del perfil, es decir su madurez. Podría entonces interpretarse que solo la acción del tiempo ha permitido tales cambios, sin embargo estos mismos cambios pueden ocurrir más o menos aceleradamente si el clima regional es lo suficientemente intenso para producir los mismos efectos que tardarían más tiempo, por ejemplo en un área de menor precipitación efectiva.

3.2. TIEMPO Y RELIEVE

La madurez de un perfil de suelo ocurre normalmente en áreas de tierras relativamente poco o no disturbadas, es decir no sujetas a procesos de erosión o deposición. La evolución de un suelo se ve interrumpida en un paisaje activo, con depósitos aluviales de nuevos materiales originarios sobre el horizonte A, o por episodios erosivos que decapitan la capa superior del suelo. En ambos casos, los suelos desarrollan un tenue horizonte A y una débil diferenciación del perfil (excepto por la fuerte estratificación de capas de material parental distinto). Los suelos de laderas empinadas pueden ser poco profundos, infértiles y graviliosos, mientras que los suelos de las planicies de inundación pueden ser profundos, productivos y ordenados por textura (arena cerca del río y arcilla en las áreas más lejanas). En ambos casos los perfiles son inmaduros con horizontes débilmente diferenciados, y en su mayoría entran en los

mismos órdenes de taxonomía del suelo del USDA (Entisoles o Inceptisoles), sin importar el clima, el material originario o el paso del tiempo. En cambio, en los paisajes estables, donde es poca la erosión o la deposición, podemos esperar que la evolución del suelo se exprese por la influencia de los otros factores formadores, como ocurre con los Oxisoles y Ultisoles de los climas cálidos y húmedos o los Espodosoles de los climas húmedos y fríos.

La interdependencia de los cinco factores formadores de suelo y la simultaneidad de los procesos presentan muchos desafíos para aquellos que desean comprender cómo se formó un suelo determinado o predecir qué propiedades del suelo es probable que se encuentren en un ambiente determinado. Con esto en mente, deberemos focalizarnos en los procesos que alteran el material originario dentro del suelo, procesos que operan bajo la influencia de los cinco factores de formación que hemos estado analizando.

4. CONCEPTO DE ZONALIDAD

Bajo este criterio general y teniendo en cuenta la correlación que exista entre su pedogénesis y los factores de formación del suelo que intervienen de modo predominante en cada caso, los suelos del mundo pueden separarse en tres grupos.

4.1 SUELOS ZONALES

Se llaman así a aquellos que han evolucionado en equilibrio con los factores bioclimáticos generales (clima y organismos vivos). Ejemplos de suelos zonales se han visto en esta misma guía en la Figura 6. En general, estos suelos ocupan grandes extensiones ya que las variaciones climáticas son graduales en las regiones llanas (por ejemplo, zona núcleo de producción agrícola de Argentina). También pueden observarse en extensiones menores si existe un factor orográfico que condicione el bioclima como ocurre en la región de la llanura Chacopampeana de la provincia de Tucumán, que presenta un gradiente decreciente de precipitaciones y cambios en la vegetación natural. Los suelos se han desarrollado en



correspondencia con el clima, con desarrollo de Argiudoles típicos en la subregión subhúmeda-húmeda de la región de la Llanura Chacopampeana (perfil A Bt C); Haplustoles típicos en las subregión subhúmeda-seca (perfil A Bw C) y Haplustoles énticos (perfil AC) en la subregión semiárida. Algunos ejemplos de Órdenes de suelo que ocupan amplias regiones en el mundo son los Oxisoles y Ultisoles de las regiones tropicales húmedas; los Espodosoles de las regiones frías y húmedas; o los Molisoles bien drenados de las regiones templadas subhúmedas.

4.2 SUELOS INTRAZONALES

Son aquellos suelos que resultan de la acción preponderante de un factor local (material originario o relieve) independientemente de la zona climática y de la vegetación en la que evolucionen.

Los suelos en los que la impronta del material originario es dominante en la génesis del suelo se llaman suelos **intrazonales litomórficos**. Un ejemplo lo constituyen los suelos del Orden Vertisoles en donde el material parental, rico en arcillas expansibles, domina los procesos de evolución del suelo. Otro ejemplo típico de intrazonalidad por causa del material originario son los Andisoles, en los que minerales de corto rango llamados alófanos, que son de origen volcánico, prevalecen en los procesos evolutivos del suelo. En otros casos, el exceso de carbonato de calcio en el material originario determina la dominancia del proceso de carbonatación, que origina suelos **intrazonales calcimórficos**.

Cuando el factor local dominante es el relieve, especialmente en los de tipo cóncavos o subnormales, es común la aparición de una capa freática en o cerca de la superficie del suelo generando condiciones de hidromorfía. Estos suelos llamados gley o pseudogley son **intrazonales hidromórficos**, y pueden encontrarse en la llanura deprimida no salina de la provincia de Tucumán. En esta región, húmeda y fuertemente disectada por ríos y arroyos que desembocan en el Río Salí, la capa freática normalmente es drenada lateralmente hacia esos cursos de agua,

permitiendo el lavado natural de las sales solubles. En cambio áreas de menores precipitaciones y especialmente cuando la evapotranspiración excede la precipitación, la presencia de la capa freática lleva a la acumulación de sales solubles. Donde no hay mecanismos para el escape del agua líquida y la pérdida más importante es por evaporación, como ocurre en región que se encuentra al este de la anterior (Llanura deprimida salina), las sales disueltas en el agua son dejadas después de la evaporación en o cerca de la superficie del suelo. De este proceso resultan los suelos **intrazonales halomórficos** de la llanura deprimida salina de Tucumán.

4.3 SUELOS AZONALES

Existen suelos que no pertenecen a ninguno de los dos grupos anteriores. Son aquellos que no presentan estratificación o diferenciación del perfil debido a que todavía son suelos muy jóvenes, ya sea porque se encuentran en áreas de fuerte pendiente en las que predomina la erosión sobre la formación, o en llanuras de inundación de cursos de agua que aportan continuamente materiales nuevos. El Orden que típicamente representa a este tipo de suelos es de los Entisoles.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. BRADY, N. and R. WEIL. 2002. The Nature and Properties of Soils. 13th Edition. Prentice Hall, Inc. New Jersey. USA.
2. BRICCHI E. y DEGIOANNI A. 2006. Sistema Suelo. Su origen y propiedades fundamentales. UNRC. Córdoba
3. FADDA G.S. 1999. El Suelo y el Ambiente. Guía de Estudio. Cátedra de Edafología. FAZ-UNT
4. FOTH, H.D. 1990. 8th Edition. Fundamentals of Soil Science. Malloy Lithographing, Inc. Michigan. USA
5. HARDY, F. 1970. Suelos Tropicales. Herrero Hnos., Sucesores S. A. México.
6. SINGER, M.J. and MUNNS D.N. 1999. Soils. An Introduction. 4th Edition. Prentice Hall, Inc. UK.