

*La tierra desnuda es tibia con la primavera....*

—JULIAN GREENFELL, INTO BATTLE

Una máxima fundamental de la ecología es que “todo está conectado con todo lo demás”. Esta interconexión es una de las razones por las que los suelos son un objeto de estudio tan fascinante (y desafiante). En este capítulo exploraremos dos aspectos del ambiente del suelo, la aireación y la temperatura, que no sólo están estrechamente conectados uno con otro, sino que ambos están también íntimamente influenciados por muchas de las propiedades del suelo discutidas en otros capítulos.

Debido a que el agua y el aire comparten el espacio poroso del suelo, no es sorprendente que la mayoría de lo que hemos aprendido sobre la textura, estructura y porosidad de los suelos (Capítulo 4) y sobre la retención y movimiento del agua en los suelos (Capítulos 5 y 6) tenga una relación directa con la aireación del suelo. Estas son algunas de las variables físicas que afectan el estado de aireación, pero los procesos químicos y biológicos también influyen y son influenciados por la aireación.

Para el crecimiento de las plantas y la actividad de los microorganismos, el estado de aireación del suelo puede ser tan importante como el estado de humedad y, algunas veces, puede ser aún más difícil de manejar. En la mayoría de los usos forestales, pastoriles, agrícolas y ornamentales, el mantenimiento de un alto nivel de oxígeno en el suelo, para la respiración de las raíces, es un objetivo importante del manejo. También es sumamente importante que comprendamos los cambios químicos y biológicos que se producen cuando se agota la provisión de oxígeno del suelo.

Las temperaturas del suelo afectan el crecimiento de las plantas y el de los microorganismos y también influyen en el secado del suelo por evaporación. Con frecuencia, no se presta atención al movimiento y a la retención de energía calórica en el suelo, pero encierran la clave para entender muchos fenómenos importantes de los suelos, desde el daño a cañerías y pavimentos por el frío, hasta el despertar primaveral de la actividad biológica. Las temperaturas inusualmente altas que producen los incendios, en terrenos de bosques, pastizales o cultivos, pueden alterar mucho ciertas propiedades físicas y químicas importantes de los suelos.

Veremos que el incremento de las temperaturas, por medio de su efecto estimulante sobre el crecimiento de las plantas y microorganismos del suelo y sobre la velocidad de las reacciones bioquímicas, influye grandemente en la aireación del suelo. Debido a que estas interrelaciones son más importantes en los suelos saturados de agua de las tierras anegadas que en cualquier otra situación, estos ecosistemas recibirán atención especial en este capítulo.

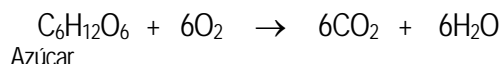
## 7.1 LA NATURALEZA DE LA AIREACIÓN DEL SUELO

La aireación implica la ventilación del suelo, con el movimiento de gases tanto hacia adentro como hacia fuera del suelo. La aireación determina la velocidad de intercambio de gases con la atmósfera, la proporción del espacio poroso lleno con aire, la composición de este aire y el potencial químico de oxidación o reducción que resulta en el ambiente del suelo.

---

<sup>1</sup> Brady, N.C. and Weil, R.R. 1999. *Capítulo 7: The nature and Properties of Soils. 12 Edition. Prentice Hall, New Jersey. USA. Traducción para uso docente: Prof. N.Cristina Molina*

Los gases oxígeno (O<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), juntamente con el agua, son los componentes principales de dos procesos biológicos vitales: (1) **la respiración** de todas las células, vegetales y animales y (2) **la fotosíntesis** que produce azúcares, unidades constitutivas fundamentales de todo alimento. La respiración, que consume oxígeno y produce dióxido de carbono, oxida compuestos orgánicos de la siguiente manera (usando azúcar como ejemplo de compuesto orgánico):



Esta reacción se invierte mediante la fotosíntesis. Las plantas verdes combinan el dióxido de carbono y el agua para formar azúcares y se libera oxígeno, lo que beneficia a todos los organismos que respiran – incluso la gente.

En este sistema general, la aireación del suelo es un componente esencial. Para que los organismos del suelo lleven a cabo la respiración se debe suministrar oxígeno y eliminar el dióxido de carbono. En un suelo bien aireado, el intercambio de estos dos *gases* entre el suelo y la atmósfera es lo suficientemente rápido para impedir la deficiencia de oxígeno o la toxicidad del exceso de dióxido de carbono. Para la mayor parte de las plantas no hidrófitas, la provisión de oxígeno en el aire del suelo debe mantenerse por encima de 0,1 L/L (en comparación con los 0,2 L/L de la atmósfera). A la vez, no se debe permitir que la concentración de CO<sub>2</sub> y de otros gases potencialmente tóxicos, como metano y etileno, se eleve excesivamente.

## 7.2 AIREACIÓN DEL SUELO EN EL TERRENO

La disponibilidad de oxígeno en los suelos *in situ*, está regulada por tres factores principales: (1) la *macroporosidad del suelo* (afectada por la textura y la estructura), (2) el *contenido de agua del suelo* (que afecta la proporción de la porosidad llena con aire) y (3) el *consumo de O<sub>2</sub>* de los *organismos que respiran* (incluye las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo). El término *aireación pobre del suelo*, se refiere a una condición en la que la disponibilidad de O<sub>2</sub> en la zona radicular es insuficiente para soportar el crecimiento óptimo de la mayoría de las plantas. Generalmente, cuando más del 80 a 90 % del espacio poroso del suelo está lleno con agua (dejando menos de 10 a 20 % de espacio poroso lleno con aire), la mala aireación se vuelve un impedimento serio para el crecimiento de las plantas. El contenido alto de agua no sólo deja poco espacio poroso para el almacenamiento de aire, sino que, y es más importante, el agua bloquea las vías por las que los gases podrían intercambiar con la atmósfera. La compactación también puede interrumpir el intercambio gaseoso, aún cuando el suelo no está muy mojado y tiene un porcentaje grande de poros llenos con aire.

### *Exceso de Humedad*

El caso extremo de exceso de agua se da cuando todos, o casi todos, los poros están llenos con agua. Entonces se dice que el suelo está **saturado con agua** o **anegado**. Las condiciones de suelo saturado son típicas de las tierras anegadas y pueden darse también en sitios elevados, en depresiones o áreas planas, por períodos cortos de tiempo.

En suelos bien drenados pueden darse condiciones transitorias de saturación, durante una gran tormenta de lluvia, cuando se aplica agua de irrigación en exceso o cuando el suelo ha sido compactado, estando mojado, por labranzas o tránsito de maquinaria pesada.

Para algunas especies de plantas, cuyas raíces tienen medios especiales para obtener oxígeno aún cuando están rodeadas de agua, esta saturación completa del suelo no es un problema. Estas plantas adaptadas para vivir en suelos anegados son llamadas **hidrófitas**. Por ejemplo, ciertas gramíneas, incluyendo el arroz, hierba gama oriental (eastern gama grass) y el esparto de los pantanos, transportan oxígeno desde la parte aérea, para la respiración de las raíces, a través de estructuras huecas de sus tallos y raíces llamadas tejidos de **aerénquima**. El mangle (Figura 7.1) y otros árboles hidrofíticos que crecen en suelos saturados de agua, producen raíces aéreas y otras estructuras que les permiten obtener O<sub>2</sub> para las raíces.

Sin embargo, la mayoría de las plantas depende del suministro de oxígeno desde el suelo, por lo que, si no se mantiene una buena aireación, por drenaje u otros medios, sufren considerablemente (Figura 7.2). Algunas plantas sucumben por la deficiencia de O<sub>2</sub>, o por la toxicidad de otros gases, en un lapso de horas después de que el suelo se satura.

### *Intercambio Gaseoso*

Cuanto más rápidos son el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono de las raíces y los microbios, tanto más necesario es el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera. Este intercambio se



**FIGURA 7.1** Son relativamente pocas las plantas capaces de vivir en suelos saturados, que están virtualmente desprovistos de oxígeno, como estos árboles de mangle de la costa del Océano Índico. Los mangles están parcialmente sumergidos durante la marea alta, pero han desarrollado "codos" aéreos en sus raíces que les permiten acceder directamente al oxígeno de la atmósfera. Para sobrevivir en este ambiente, los mangles han desarrollado también medios para separar las sales del agua de mar. (Fotos, cortesía de R. Weill)

realiza por dos mecanismos, *flujo de masa* y *difusión*. El intercambio total está determinado mayormente por la difusión, siendo el flujo de masas de aire mucho menos importante. No obstante, las fluctuaciones de contenido de agua, o el viento, o los cambios de la presión barométrica, que fuerzan el aire hacia dentro o fuera del suelo intensifican este flujo de masa.

La mayor parte del intercambio gaseoso se produce por *difusión*. En este proceso cada gas se mueve en una dirección que está determinada por su presión parcial particular. En una mezcla, la *presión parcial* de un gas es simplemente la presión que ese gas ejercería si él solo estuviese en el volumen ocupado por la mezcla. Así, si la presión del aire es 1 atmósfera (100 kPa), la presión parcial de oxígeno, que constituye alrededor del 21 % del volumen del aire (0,21 L/L), es aproximadamente 21 kPa.

Aún cuando no hay un gradiente de presión para la mezcla total de gases en conjunto, la difusión permite grandes movimientos de gases de un área a otra. Esto es debido a que hay un gradiente de concentración para cada gas individual, que puede ser expresado como *gradiente de presión parcial*. Como consecuencia, la mayor concentración de oxígeno en la atmósfera dará como resultado un movimiento neto de este gas hacia adentro del suelo. Normalmente el dióxido de carbono y el vapor de agua se mueven en dirección contraria, debido a que la presión parcial de estos gases es generalmente más alta en el aire del suelo que en la atmósfera. En la Figura 7.3 se representan los principios involucrados en la difusión.



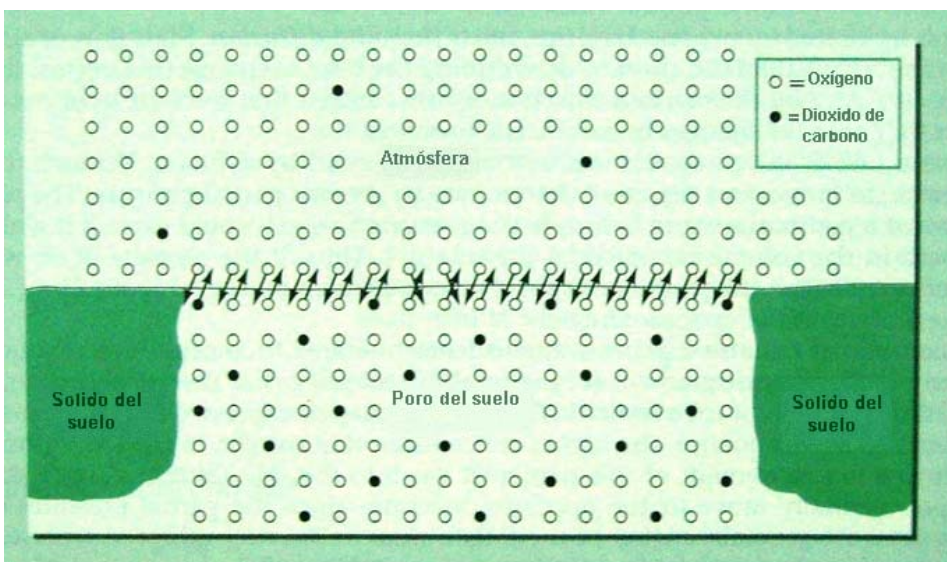
**FIGURA 7.2** La mayoría de las plantas depende del suministro de oxígeno del suelo para la respiración radicular, por lo que aún los períodos breves de saturación del suelo, durante los cuales el oxígeno se agota, las afectan muy adversamente. (Izquierda) Remolachas azucareras que están muriendo en un área compactada de un suelo franco arcilloso, que ha quedado saturada con agua. (Derecha) Árboles de pino que están muriendo en un área de un suelo arenoso que ha quedado saturada, como consecuencia de una inundación producida por castores. Una nueva comunidad de plantas, mejor adaptadas a condiciones de suelos pobremente aireados, está dominando en el sitio. (Fotos, cortesía de R. Weil)

### 7.3 MEDIOS DE CARACTERIZAR LA AIREACIÓN DEL SUELO

El estado de aireación de un suelo puede caracterizarse de varias maneras, incluyendo (1) el contenido de oxígeno y otros gases en la atmósfera del suelo, (2) la porosidad del suelo llena con aire y (3) el potencial químico de oxidación – reducción.

#### *Composición Gaseosa del Aire del Suelo*

**OXIGENO.** Por encima de la superficie del suelo, la atmósfera contiene cerca de 21% de  $O_2$ , 0,035% de  $CO_2$  y más de 78 % de  $N_2$ . En comparación, el aire del suelo tiene más o menos el mismo nivel de  $N_2$ , pero siempre tiene menos  $O_2$  y más  $CO_2$ . En las capas superiores de un suelo con una estructura estable y abundancia de macroporos, el contenido de  $O_2$  puede estar sólo ligeramente por debajo de 20%. En los horizontes inferiores de un suelo pobremente drenado, con pocos macroporos, puede caer a menos de 5%, o incluso hasta cerca de cero. Cuando la provisión de  $O_2$  está virtualmente



**FIGURA 7.3** El proceso de difusión de gases entre un poro del suelo y la atmósfera. La presión total de gas es la misma a ambos lados del límite. Sin embargo, la presión parcial de oxígeno es mayor en la atmósfera. En consecuencia, el oxígeno tiende a difundir hacia dentro del poro del suelo donde hay menos moléculas de oxígeno por unidad de volumen. Por otra parte, las moléculas de dióxido de carbono se trasladan en sentido opuesto, debido a la mayor presión parcial de este gas en el poro. Esta difusión de  $O_2$  hacia el poro y de  $CO_2$  hacia la atmósfera, continuará mientras la respiración de las células de las raíces y de los

microorganismos consumen  $O_2$  y liberan  $CO_2$ .

agotada, se dice que el ambiente del suelo es **anaeróbico**.

Los contenidos bajos de  $O_2$  son típicos de los suelos mojados. Aunque en los suelos bien drenados, después de lluvias fuertes, el contenido de  $O_2$  del aire del suelo puede disminuir marcadamente, especialmente si está siendo consumido rápidamente por raíces de plantas en crecimiento muy activo o por microorganismos que descomponen materiales orgánicos convenientemente disponibles (Figura 7.4). Así, cuando el suelo está caliente el oxígeno se agota más rápidamente.

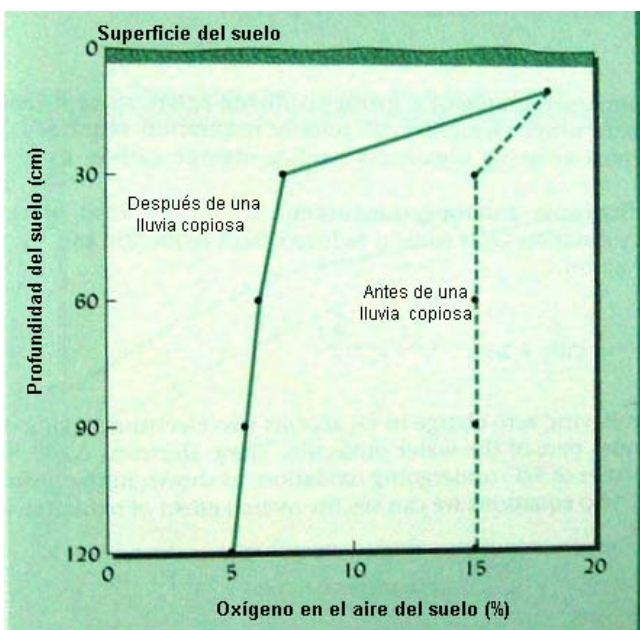
Afortunadamente, en muchos suelos el agua contiene cantidades pequeñas, pero significativas, de  $O_2$  disuelto. Cuando todos los poros del suelo están llenos de agua, los microorganismos pueden extraer, para su metabolismo, la mayor parte del oxígeno disuelto. Sin embargo, esta pequeña cantidad de  $O_2$  disuelta se agota rápido, por lo que si no se quita el exceso de agua peligran la actividad aeróbica de los microorganismos y el crecimiento de las plantas.

**DIÓXIDO DE CARBONO.** Debido a que el contenido de  $N_2$  del aire del suelo es relativamente constante, hay una relación general inversa entre los contenidos de los otros dos componentes principales -  $O_2$  y  $CO_2$  - decreciendo el  $O_2$  a medida que el  $CO_2$  aumenta. A pesar de que las diferencias absolutas de las cantidades de  $CO_2$  pueden no ser considerables, al compararlas son significativas. Así, cuando el aire del suelo contiene sólo 0,35% de  $CO_2$ , este gas está alrededor de 10 veces más concentrado que en la atmósfera. Cuando la concentración de  $CO_2$  se hace tan alta como 10%, puede resultar tóxica para algunos procesos de las plantas.

**OTROS GASES.** Usualmente el aire del suelo tiene contenidos mayores de vapor de agua que la atmósfera, en los hechos, está saturado, salvo en la superficie o en su proximidad inmediata (ver Sección 5.7). En condiciones de anegamiento, las concentraciones de ciertos gases que se forman por la descomposición de la materia orgánica, como el metano ( $CH_4$ ) y el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) son también notablemente más altas en el aire del suelo. Otro gas producido por el metabolismo microbiano anaeróbico es el etileno ( $C_2H_4$ ). Este gas es particularmente tóxico para las raíces de las plantas, aunque esté en concentraciones más bajas que  $1 \mu L/L$  (0,0001%). Se ha demostrado que cuando las velocidades de intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera son demasiado lentas, la acumulación de etileno inhibe el crecimiento de las raíces de numerosas plantas.

### **Porosidad Llena de aire**

En el Capítulo 1 (Figura 1.17) dijimos que la composición ideal del suelo para el crecimiento de las plantas debería contener, en el espacio poroso, una mezcla de aire y agua en una relación cercana a 50:50, o sea un 25% del volumen del suelo ocupado por aire (asumiendo una porosidad total de 50%). Muchos investigadores consideran que, en la mayoría de los suelos, la actividad



**FIGURA 7.4** Contenido de oxígeno antes y después de una estación de lluvias copiosas en un suelo en el que se estaba cultivando algodón. El agua de lluvia sustituyó a la mayor parte del aire del suelo. La pequeña cantidad remanente de oxígeno fue consumida por la respiración de las raíces y los organismos del suelo. Probablemente, el contenido de dióxido de carbono (no informado) aumentó en concordancia. [Dibujado a partir Patrick (1977); usado con autorización de la Soil Science Society of America]

microbiológica y el crecimiento de las plantas quedan inhibidos gravemente cuando la porosidad llena por aire desciende a menos de 20% del espacio poroso, o 10% del volumen total del suelo (con los correspondientes contenidos altos de agua).

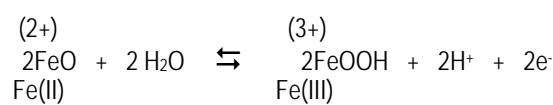
Una de las principales razones por las que los altos contenidos de agua causan deficiencias de oxígeno para las raíces, es que los poros llenos de agua bloquean la difusión del oxígeno, hacia adentro del suelo, que repone el usado en la respiración. En realidad, el oxígeno difunde 10.000 veces más rápido a través de un poro lleno de aire que en un poro similar lleno de agua.

## 7.4 POTENCIAL DE OXIDACIÓN – REDUCCIÓN (REDOX)<sup>2</sup>

Una característica química importante de los suelos, que está relacionada con la aireación, son los estados de oxidación y reducción de los elementos químicos. Si un suelo está bien aireado, dominan los estados oxidados, tales como el Fe(III) en el FeOOH y el N(V) en el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (nitrato). En los suelos mal aireados, se encuentran las formas reducidas de estos elementos; por ejemplo Fe(II) en el FeO y N(III?) en el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (amonio). La presencia de estas formas reducidas indica que el drenaje está restringido y la aireación es mala.

### Reacciones Redox

La reacción que se produce cuando un elemento cambia del estado reducido al oxidado puede ser ilustrada por la oxidación del hierro bivalente [Fe<sup>2+</sup> o Fe(II)] del FeO a la forma trivalente [Fe<sup>3+</sup> o Fe(III)] del FeOOH.



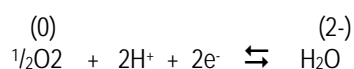
Observe que el Fe(II) pierde un electrón, e<sup>-</sup>, cuando cambia a Fe(III) y que en el proceso se forman iones H<sup>+</sup>. La pérdida de un electrón indica que hay potenciales para la transferencia de electrones de una sustancia a otra. Este **potencial redox** puede ser medido usando un electrodo de platino.

El potencial redox E<sub>h</sub> da una medida de la tendencia de una sustancia a aceptar o donar electrones. Se mide usualmente en voltios o milivoltios. Como en el caso del potencial del agua (Sección 5.3), el potencial redox está relacionado a un estado de referencia, en este caso el par hidrógeno,  $\frac{1}{2}\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{e}^-$ , cuyo potencial redox se toma arbitrariamente como cero. Si una sustancia acepta electrones fácilmente, se dice que es un *agente oxidante*; si una sustancia entrega electrones fácilmente, se dice que es un *agente reductor*.

### Rol del Oxígeno (O<sub>2</sub>)

El gas oxígeno (O<sub>2</sub>) es un ejemplo notable de agente oxidante fuerte, ya que acepta rápidamente electrones de muchos otros elementos. Toda la respiración aeróbica necesita O<sub>2</sub>, que sirve como aceptor de electrones cuando los organismos vivos oxidan carbono orgánico para liberar energía para vivir.

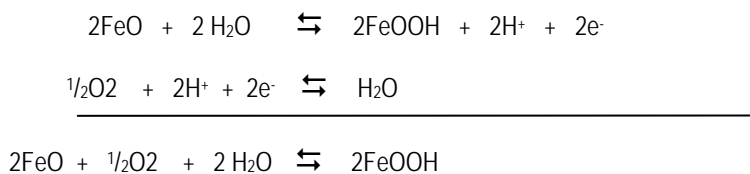
El oxígeno puede oxidar tanto sustancias orgánicas como inorgánicas. Pero téngase presente que a medida que oxida otra sustancia, el O<sub>2</sub> se reduce. Este proceso de reducción puede verse en la siguiente reacción:



Observe que el átomo de oxígeno, que en el O<sub>2</sub> tiene carga cero, acepta dos electrones adquiriendo carga -2 cuando se transforma en parte de la molécula de agua. Esos electrones podrían haber sido

<sup>2</sup> Para una revisión de las reacciones redox en los suelos, ver Bartlett and James (1993)

donados por dos moléculas de FeO que se oxidan, como se muestra en la reacción precedente. Si combinamos las dos ecuaciones, podemos ver el efecto conjunto de la oxidación y la reducción.

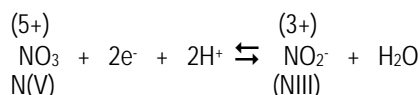


Los electrones ( $\text{e}^-$ ) donados y aceptados y los iones  $\text{H}^+$  de ambos lados de la ecuación se han balanceado entre sí, por lo que no aparecen en la reacción combinada, pero ambos son muy importantes para las reacciones específicas de reducción y oxidación.

El potencial redox  $E_h$  de un suelo depende tanto de la presencia de un aceptor de electrones (oxígeno u otro agente oxidante) como del pH. En la Figura 7.5 se muestra la correlación positiva entre contenido de  $\text{O}_2$  del aire del un suelo y  $E_h$  (potencial redox). En un suelo bien drenado, el  $E_h$  está en el rango 0,4 a 0,7 voltios (V). A medida que disminuye la aireación, el  $E_h$  cae, alcanzando un nivel de aproximadamente 0,3 a 0,35 V cuando el oxígeno gaseoso está agotado. En suelos cálidos y ricos en materia orgánica que están anegados, se pueden encontrar valores de  $E_h$  tan bajos como  $-0,3$  V.

### Otros Aceptores de Electrones

Además del oxígeno, otros elementos pueden actuar como aceptores terminales de electrones (oxidantes). Por ejemplo el N(V) de los nitratos acepta dos electrones cuando se reduce a N(III) en los nitritos:



La reducción u oxidación de Fe, Mn y S involucran reacciones similares (ver reacciones en la Figura 7.6).

En la Figura 7.6 se muestra el efecto del pH en los potenciales redox de varias reacciones importantes que se producen en los suelos. Advierta que, en todos los casos,  $E_h$  disminuye a medida que el pH sube desde 2 hasta 8. Ya que tanto el pH como  $E_h$  se miden fácilmente, no es difícil averiguar cuándo sería posible que ocurra una reacción específica en un suelo dado. Por ejemplo, en un suelo de pH 6, sería necesario que  $E_h$  sea algo más bajo que  $+0,5$  V para estimular la reducción de los nitratos a nitritos y aproximadamente  $+0,2$  para estimular la reducción del FeOOH a ión  $\text{Fe}^{2+}$ . Para que se forme metano en un suelo anegado, al mismo pH (6), se requeriría un  $E_h$  de  $-0,2$  V aproximadamente.

El valor de  $E_h$  al que se producen las reacciones de oxidación-reducción varía según el compuesto específico a ser oxidado o reducido. En la Tabla 7.1 se da una lista de las formas oxidadas y reducidas de varios elementos importantes en los suelos, junto con los potenciales redox aproximados a los que ocurren las reacciones de oxidación-reducción. Los valores de  $E_h$  explican

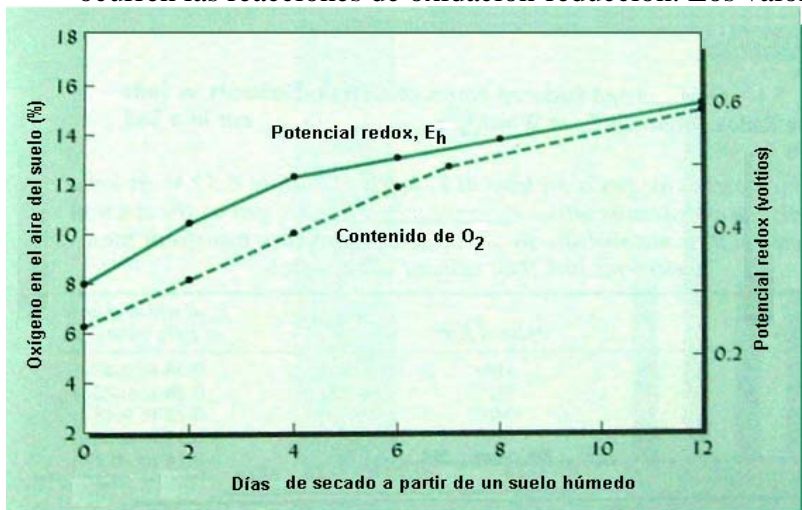
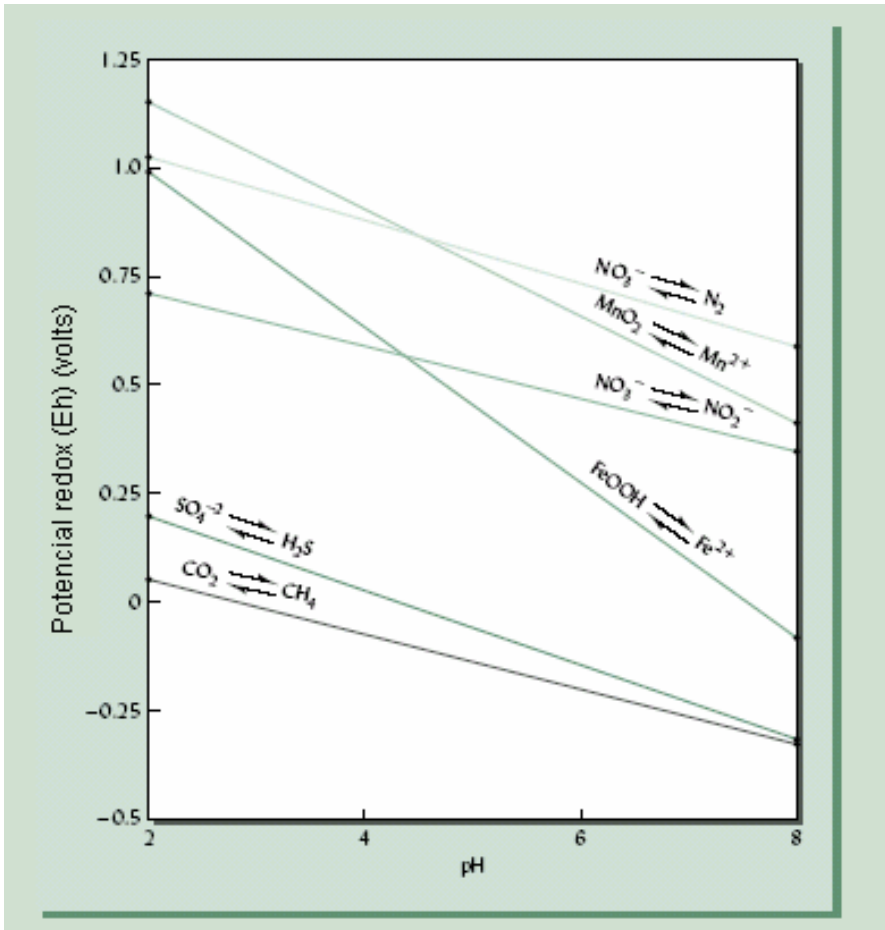


FIGURA 7.5 Relación entre contenido de oxígeno del aire del suelo y el potencial redox  $E_h$ . Las mediciones se hicieron a 28 cm de profundidad en un suelo que había sido regado continuamente durante 14 días antes del secado. Note la relación general entre estas dos variables. [Datos seleccionados de Meek and Grass (1975); usados con autorización de Soil Science Society of America]



**FIGURA 7.6** Efecto del pH en el valor del potencial redox  $E_h$  al que se producen varias reacciones de oxidación-reducción importantes en los suelos. [Tomado de Mc Bride (1994); usado con autorización de Oxford University Press]

el orden en que se sabe que suceden las reacciones cuando un suelo bien aireado queda saturado con agua.

Al principio, la respiración reducirá las concentraciones de  $O_2$  del aire y del agua (disuelto) del suelo. A medida que la concentración de este aceptor de electrones disminuye, también disminuye el potencial redox del suelo. Debido a que el  $O_2$  es reducido a agua cuando el valor de  $E_h$  es de 0,38 a 0,32 V, una vez que el potencial redox cae por debajo de este rango el suelo está prácticamente desprovisto de  $O_2$ . Con valores de  $E_h$  más bajos, los únicos microorganismos que pueden estar activos

**TABLA 7.1** Formas Oxidadas y Reducidas de Ciertos Elementos en los Suelos y Potenciales Redox  $E_h$  a los que se Producen los Cambios de Forma en un Suelo de pH 6,5.

*Nótese que el oxígeno gaseoso se agota a niveles de  $E_h$  de 0,38 a 0,32 V. A niveles de  $E_h$  más bajos los microorganismos utilizan, en su metabolismo, como aceptores de electrones elementos distintos del oxígeno. Al donarles electrones, transforman estos elementos a sus estados de valencia reducida.*

Forma Oxidada	Forma Reducida	$E_h$ al que ocurre el cambio de forma, V
$O_2$	$H_2O$	0,38 a 0,32
$NO_3^-$	$N_2$	0,28 a 0,22
$Mn^{+4}$	$Mn^{+2}$	0,22 a 0,18
$Fe^{+3}$	$Fe^{+2}$	0,11 a 0,08
$SO_4^{2-}$	$S^{2-}$	-0,14 a -0,17
$CO_2$	$CH_4$	-0,20 a -0,28

Tomado de Patrick y Jugsujinda (1992)



son aquellos capaces de usar como aceptores metabólicos de electrones otros elementos, en vez de oxígeno.

Usualmente, el elemento presente que sigue por su facilidad para ser reducido es el N(V) (en los nitratos,  $\text{NO}_3^-$ ). Si el suelo contiene mucho nitrato, mientras este se reduce, el  $E_h$  se mantendrá cerca de 0,28 a 0,22 V. Cuando casi todo el nitrato ha desaparecido [el N(V) ha sido transformado a N(III) y otras especies de N] el  $E_h$  caerá aún más. En este punto, se pondrán en actividad los organismos capaces de reducir Mn, y así sucesivamente. De este modo, a medida que los valores de  $E_h$  caen, los elementos N, Mn, Fe, S (en  $\text{SO}_4^{2-}$ ) y C (en  $\text{CO}_2$ ) aceptan electrones y se transforman en reducidos, casi siempre en el orden enumerado.

En otras palabras, antes de que se produzca metano, el  $E_h$  del suelo debe bajar a cero, o menos, pero para que se reduzcan los nitratos, un valor de  $E_h$  de 0,28 a 0,22 es suficientemente bajo. Así, la aireación del suelo contribuye a determinar qué especies químicas específicas están presentes en los suelos y, a la vez, la disponibilidad, movilidad y posible toxicidad de varios elementos.

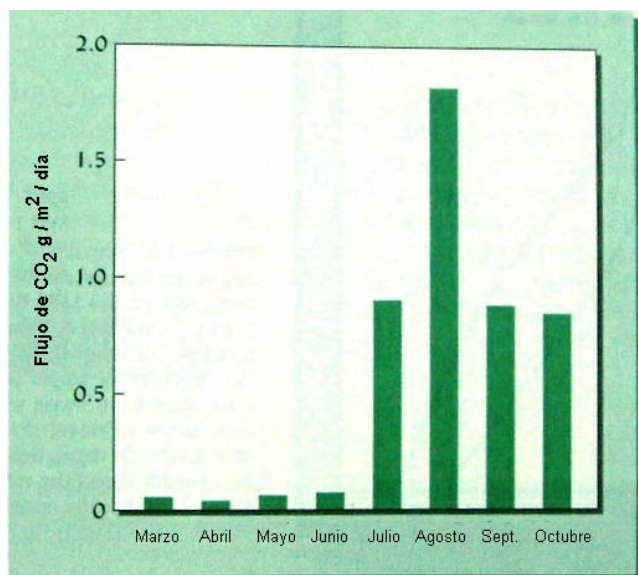
## 7.5 FACTORES QUE AFECTAN LA AIREACIÓN DEL SUELO

### *Drenaje del Exceso de Agua*

El drenaje del agua gravitante del perfil y la concomitante difusión de aire dentro del suelo se producen más rápidamente por los macroporos. Por lo tanto, los factores que más influyen en la aireación de los suelos bien drenados, son los que determinan el volumen de macroporos del suelo. La cantidad de macroporos tiene una influencia preponderante en el espacio total ocupado por aire, como así también en el intercambio gaseoso y en las reacciones bioquímicas. Entre las propiedades del suelo que concurren a determinar el contenido de macroporos y, a la vez, la aireación del suelo, están la textura, densidad aparente, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica y la formación de bio-poros (ver Sección 4.6).

### *Velocidad de Respiración en el Suelo*

Las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono dependen en gran medida de la actividad microbiana, la que a su vez depende de la disponibilidad de compuestos orgánicos carbonosos que la sustentan. La incorporación de grandes cantidades de abonos, residuos de cosecha o barros cloacales, puede alterar apreciablemente la composición del aire del suelo. En los ecosistemas naturales, el reciclado de los residuos vegetales por la caída de hojas, descomposición de masa radicular y excreciones radiculares proporciona el sustrato para la actividad microbiana, por lo que se manifiestan efectos similares. La respiración de las raíces de las plantas y la respiración acrecentada de los organismos del suelo cercano a ellas, también influyen notablemente (Figura 7.7). Todos estos procesos aumentan muy mucho a medida que se incrementa la temperatura del suelo (ver Sección 7.9).



**FIGURA 7.7** Velocidad de emisión (flujo) de  $\text{CO}_2$  desde la superficie de un suelo, en el interior de un ecosistema forestal de maderas duras del noreste, en el estado de Nueva York. Fíjese en las velocidades altas, desde Julio a Octubre, cuando el crecimiento del bosque y la actividad microbiana eran superiores. [Tomado de Yavitt, et al.(1995); usado con autorización de Soil Science Society of America]

## Subsuelo Versus Suelo Superficial

Usualmente los subsuelos están más desprovistos de oxígeno que los suelos superficiales. Generalmente, en los horizontes más profundos, no sólo el contenido de agua es superior (en los climas húmedos), sino que también el espacio poroso total y el espacio de macroporos son mucho menores. Además, el camino para la difusión de gases hacia dentro o hacia afuera del suelo es más largo para los horizontes más profundos. No obstante, si la provisión de materia orgánica en el subsuelo es baja, éste puede ser aeróbico. Por esta razón, ciertos suelos recientemente inundados son anaeróbicos en los 50 a 100 cm superficiales y aeróbicos más abajo.

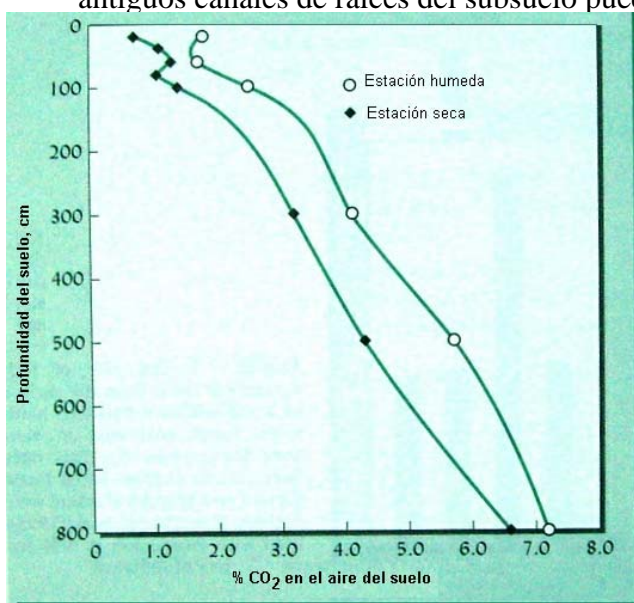
En algunas áreas forestales y en huertos frutales, las raíces de los árboles se extienden dentro de capas que tienen muy poco oxígeno y mucho dióxido de carbono, especialmente si el subsuelo tiene mucha arcilla. En algunos de estos subsuelos han sido observados niveles de dióxido de carbono próximos a 15% (150 mL/L). Estudios realizados en suelos profundos, altamente meteorizados de selvas tropicales lluviosas, indican que en las capas más profundas del subsuelo se produce respiración y que la concentración de CO<sub>2</sub> de las mismas continúa aumentando con la profundidad (Figura 7.8).

## Heterogeneidad del suelo

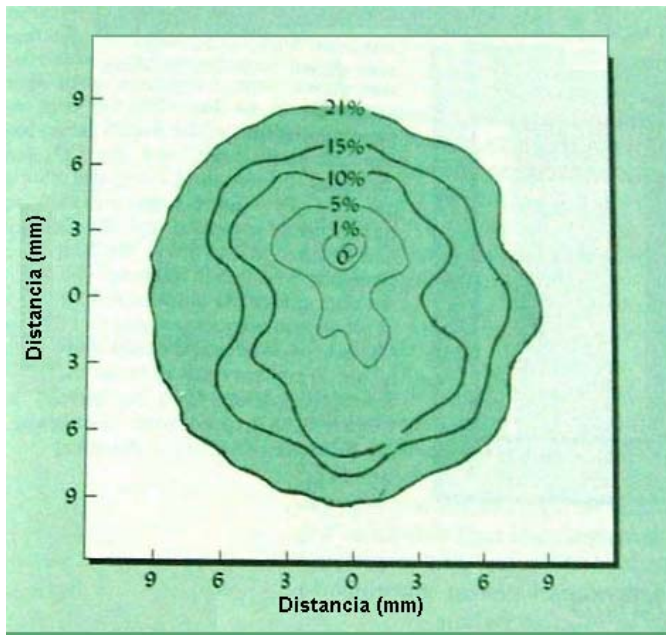
**PERFIL.** Como se ve en las Figuras 7.3 y 7.8, el estado de aireación varía grandemente entre diferentes puntos de un perfil de suelo. En suelos bien drenados, relativamente uniformes, la tendencia general es que haya una reducción en el contenido de O<sub>2</sub> y un aumento del de CO<sub>2</sub> desde arriba hacia abajo del perfil. Sin embargo, en cualquier horizonte se puede encontrar zonas o bolsas pobremente aireadas dentro de un suelo, que de no ser por ellas, sería bien drenado y bien aireado.

**LABRANZA.** La labranza es una de las causas de heterogeneidad del suelo y tiene efectos sobre la aireación, tanto a corto como a largo plazo. Con frecuencia, en el corto plazo, al mover el suelo se permite que se seque rápido y se ponga en contacto con grandes cantidades de aire. En suelos de textura fina, un tanto compactados, estos efectos son particularmente evidentes y a menudo, el crecimiento vegetal manifiesta el efecto deseado inmediatamente después de una labor para controlar malezas o incorporar fertilizante. Sin embargo, a largo plazo la labranza puede reducir la macroporosidad (ver Sección 4.6)

**MACROPOROS GRANDES.** Las zonas mal aireadas pueden ser causadas por una capa de textura pesada o que está compactada, o pueden encontrarse simplemente en el interior de un agregado (ped) del suelo (unidad estructural), donde la pequeñez de los poros puede limitar el intercambio fluido de aire (Figura 7.9). En suelos bien drenados, los poros grandes (grietas) entre los agregados y los antiguos canales de raíces del subsuelo pueden originar periódicamente zonas localizadas de mala



**FIGURA 7.8** Cambios de la concentración (de CO<sub>2</sub>) del aire del suelo en función de la profundidad, en el perfil de un Haplustox cubierto por una selva lluviosa tropical en la región Amazónica de Brasil. La fuente de CO<sub>2</sub> fue probablemente una combinación de respiración radicular y microbiana. A pesar de que las velocidades de producción de CO<sub>2</sub> eran mucho más altas en las capas de suelo más superficiales, el gas producido allí tenía que recorrer menos distancia para alcanzar la atmósfera y contaba con muchos poros grandes para hacer este recorrido. La concentración de CO<sub>2</sub> aumentaba con la profundidad porque el recorrido hasta la superficie se hacía mayor y la macroporosidad mucho menor tornaba más lento el movimiento de gases, dando como resultado la acumulación de CO<sub>2</sub>. [Datos tomados de Davidson and Trumbore (1995)]



**FIGURA 7.9** Mapa que muestra el contenido de oxígeno del aire del suelo en un agregado mojado de un Hapludol Acuico (Muscatine Franco arcillo limoso) de Iowa. Las determinaciones se hicieron con un microelectrodo específico. Note que el contenido de oxígeno cerca del centro del agregado era cero, mientras que el de las proximidades de la superficie era 21%. Así, en un suelo cuyo contenido general de oxígeno puede no ser bajo, es posible encontrar bolsas de deficiencia de oxígeno. [Tomado de Sextstone, et al. (1985)]

aireación cuando se llenan de agua. En los suelos saturados, estos poros grandes pueden causar el efecto opuesto, ya que durante los períodos de secado facilitan la difusión de  $O_2$  dentro del suelo.

**RAÍCES DE LAS PLANTAS.** De igual forma, las raíces de las plantas en crecimiento pueden tanto reducir como aumentar la concentración de  $O_2$  en sus proximidades inmediatas. En algunos suelos mal drenados, la respiración de las raíces de las plantas no hidrófitas puede agotar el  $O_2$  en el suelo que las rodea (como se puede ver en la Lámina 19, después de la página 498). Por el contrario, las plantas hidrófitas con tejidos de aerénquima, pueden transportar hacia sus raíces un exceso de  $O_2$ , permitiendo que parte del mismo difunda dentro del suelo, lo que produce una zona oxidada en un suelo que, a no ser por esto, es aneróbico (ver, por ejemplo, la Lámina 20).

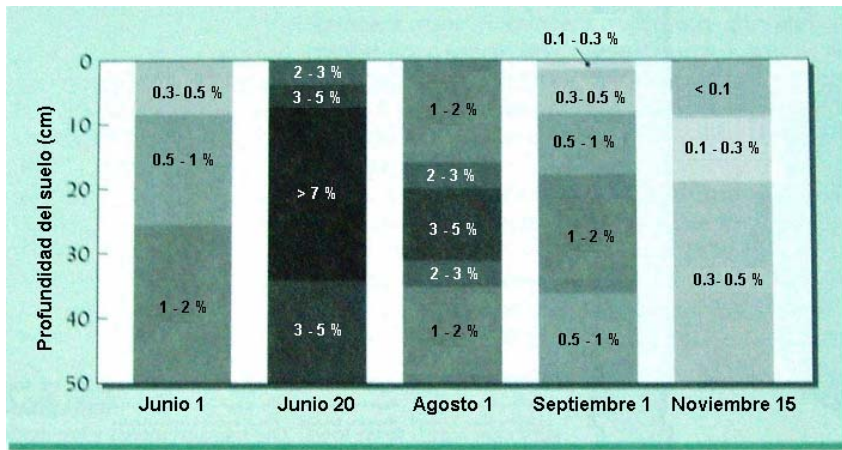
Por estas razones se pueden estar produciendo reacciones de oxidación a pocos centímetros, o milímetros, de otro punto donde existen condiciones de reducción. Esta heterogeneidad de la aireación del suelo debería tenerse presente cuando se intenta comprender el rol que tiene el suelo en los ciclos de elementos y en el funcionamiento de los ecosistemas.

### *Diferencias Estacionales*

Hay una marcada variación estacional en la composición del aire del suelo. En las regiones templadas y húmedas, es común que los suelos estén mojados en la primavera y que las condiciones para un intercambio fluido de gases sean malas. Pero debido a las bajas temperaturas la respiración de las raíces de las plantas y de los microorganismos del suelo está restringida, por lo que la utilización del oxígeno y la liberación de  $CO_2$  son también limitadas. En los meses de verano, comúnmente los suelos tienen menores contenidos de humedad y aumenta la facilidad para el intercambio gaseoso. Sin embargo, las temperaturas más favorables estimulan una respiración vigorosa de las raíces y de los microorganismos del suelo, que libera cantidades abundantes de dióxido de carbono. Esto se ilustra en la Figura 7.10, que muestra los niveles de dióxido de carbono en un Alfisol de Missouri, durante el período de crecimiento de un cultivo de maíz y a comienzos del invierno posterior.

### *Efecto de la Vegetación*

Además de los efectos de la respiración radicular mencionados previamente, la vegetación puede afectar la aireación del suelo removiendo grandes cantidades de agua por transpiración, lo que en algunos suelos pobremente drenados puede ser suficiente para bajar el nivel de la capa freática. Los datos de la Tabla 7.2 ilustran este efecto en un bosque de pinos. También se evidencian los efectos de la profundidad del suelo y de la estación del año.



**FIGURA 7.10** Cambios estacionales del contenido de dióxido de carbono en los 50 centímetros superficiales de un Alfisol de Missouri, en el que se cultivaba maíz, desde principios de mayo hasta alrededor del 1° de septiembre. El 20 de junio, el maíz estaba creciendo vigorosamente, el contenido de humedad era aún un poco alto y el nivel de CO<sub>2</sub> aumentó hasta más de 7%, entre los 10 y 30 cm. El 1° de agosto, probablemente el intercambio gaseoso había aumentado y el nivel de CO<sub>2</sub> había descendido a 3 a 5% en la capa de 20 a 30 cm, pero hasta este valor es aún 100 veces superior al de la atmósfera. El 15 de noviembre las actividades de las plantas y de los microorganismos habían disminuido, debido a las menores temperaturas, y el nivel de CO<sub>2</sub>, por debajo de los 20 cm, era sólo 10 veces el de la atmósfera. [Datos tomados de Buyanovsky and Wagner (1983); usado con autorización de la Soil Science Society of America]

## 7.6 EFECTOS ECOLÓGICOS DE LA AIREACIÓN DEL SUELO

### *Efectos en la Degradación de los Residuos Orgánicos*

La aireación del suelo influye en muchas reacciones del suelo y, a la vez, en muchas de sus propiedades. Las más obvias de estas reacciones están asociadas con la actividad microbológica, especialmente la descomposición de los residuos orgánicos y otras reacciones microbianas. La mala aireación hace más lenta la velocidad de descomposición, tal como se evidencia por la acumulación relativamente elevada de materia orgánica de los suelos pobremente drenados.

El tipo de actividad microbiana y su velocidad, están determinados por el contenido de O<sub>2</sub> del suelo. Donde hay presencia de O<sub>2</sub>, están activos los microorganismos aeróbicos, y se producen reacciones como la que se muestra en la página 266.

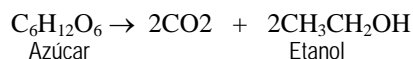
En ausencia de oxígeno gaseoso, dominan los organismos anaeróbicos. Se produce una descomposición mucho más lenta, por reacciones como la siguiente (ver detalles adicionales en la Sección 12.2):

**TABLA 7.2** Efecto de la Explotación Maderera con Compactación Mínima en los Regímenes de Aireación y Temperatura del Suelo de un Bosque Subtropical de Pinos

*Cuando se cortaron los árboles de pino loblolly de 55 años en este Ochraqalf vertico, se redujeron la evapotranspiración y el sombreado, lo que originó una elevación de la capa freática, menores potenciales redox y temperaturas primaverales más cálidas. Lo último estimuló el uso microbiano del oxígeno y disminuyó aún más el potencial redox. Nótese que los potenciales redox eran más bajos en primavera, con temperaturas más cálidas, a pesar de que el suelo no estaba tan mojado como en invierno.*

Ubicación del Tratamiento	Tiempo que el suelo está saturado, %	Temperatura del Suelo, °C		Potenciales Redox del Suelo E <sub>h</sub> , V	
		Invierno	Primavera	Invierno	Primavera
<i>Medidos a 50 cm de Profundidad</i>					
Sitio con pinos no perturbado	31	11,8	18,3	0,83	0,65
Árboles cortados, sin compactación	64	11,71	20,5	0,51	0,11
<i>Medidos a 100 de Profundidad</i>					
Sitio con pinos no perturbado	54	13,3	17,3	0,83	0,49
Árboles cortados, sin compactación	46	13,2	18,7	0,54	0,22

Datos tomados de Tlarks, et al. (1996)



Por lo tanto, los suelos pobremente aireados tienden a contener una gran variedad de productos parcialmente oxidados, tales como gas etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), alcoholes y ácidos orgánicos, muchos de los cuales pueden ser tóxicos para las plantas superiores y para muchos de los organismos que producen descomposición. El último efecto ayuda a explicar la formación de Histosoles en las áreas anegadas, donde la inhibición de la descomposición permite la acumulación de capas espesas de materia orgánica. En resumen, la presencia o ausencia de oxígeno gaseoso modifica completamente la naturaleza de los procesos de descomposición y su efecto sobre el crecimiento de las plantas.

### ***Oxidación – Reducción de Elementos***

**NUTRIENTES.** Como se muestra en el la Tabla 7.3, a través del potencial redox, el nivel de oxígeno del suelo determina en gran medida las formas de varios elementos inorgánicos. Los estados oxidados del nitrógeno y del azufre son fácilmente utilizables por las plantas superiores. En general, en los suelos ácidos de las regiones húmedas, para la nutrición con hierro y manganeso de la mayoría de las plantas, son preferibles las condiciones de oxidación por que las formas reducidas son tan solubles, que pueden producir toxicidad. Sin embargo, puede ser beneficioso que algo del hierro se reduzca liberando fósforo de los fosfatos férricos insolubles. Cuando esta liberación de fósforo se produce en suelos saturados o en sedimentos sumergidos, tiene consecuencias en la eutroficación (ver Sección 14.2).

En regiones más secas, en general se da lo opuesto y son preferibles las formas reducidas de elementos tales como el hierro y el manganeso. En los suelos neutros a alcalinos de estas áreas, las formas oxidadas de hierro y manganeso están firmemente retenidas en compuestos muy insolubles, lo que produce deficiencias de estos elementos. Estas diferencias ilustran la interacción entre aireación y pH del suelo en el suministro de nutrientes disponibles para las plantas (ver Capítulo 15).

**OTROS ELEMENTOS.** El potencial redox determina qué especies de ciertos elementos tóxicos, como cromo, arsénico y selenio, están presentes, lo que influye notablemente en sus efectos en el ambiente y en la cadena alimentaria (ver Sección 18.7)

**COLORES DEL SUELO.** Como se discutió en la Sección 4.1, el color del suelo está muy influenciado por el estado de oxidación del hierro y el manganeso. Los colores como rojo, amarillo y castaño rojizo son característicos de las condiciones de buena oxigenación. Si no hay suficiente oxígeno, predominan matices más apagados, como grises y azules. Para la determinación de la condición de drenaje del suelo por métodos de campo, puede usarse el color. Los suelos imperfectamente drenados se caracterizan por vetas contrastantes de materiales oxidados y reducidos (ver Láminas 15 y 18, después de las páginas 82 y 498). Este aspecto moteado indica una zona con condiciones alternantes de buena y mala aireación, que no permite el crecimiento óptimo de la mayoría de las plantas.

**PRODUCCIÓN DE METANO.** La producción del compuesto orgánico metano en los suelos sumergidos es de importancia universal, ya que este gas es uno de los que contribuyen al efecto invernadero y al calentamiento global (ver Sección 12.11). Su concentración ha estado aumentando desde 1980 a razón de 1% anual, aproximadamente. El gas metano se produce por reducción del  $\text{CO}_2$ . Su formación tiene lugar cuando el  $E_h$  disminuye hasta alrededor de  $-0,2$  V, condición que es común en las tierras anegadas naturales y en los arrozales. Se estima que las tierras anegadas de los Estados Unidos emiten anualmente alrededor de 100 millones de toneladas métricas de metano. Debido a la productividad y diversidad biológica de estos ambientes (ver Sección 7.8), los científicos están buscando medios de manejar la liberación de metano sin recurrir al drenaje de las tierras anegadas.

**TABLA 7.3 Formas Oxidadas y Reducidas de Varios Elementos Importantes**

Elemento	Forma normal en los suelos bien oxigenados	Forma reducida que se encuentra en los suelos anegados
Carbono	$\text{CO}_2, \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_4, \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$
Nitrógeno	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_2, \text{NH}_4^+$
Azufre	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{H}_2\text{S}, \text{S}^{2-}$
Hierro	$\text{Fe}^{+3}$ [óxidos de Fe (III)]	$\text{Fe}^{2+}$ [óxidos de Fe (II)]
Manganeso	$\text{Mn}^{+4}$ [óxidos de Mn (IV)]	$\text{Mn}^{2+}$ [óxidos de Mn (II)]

## Efectos en las Funciones de las Plantas Superiores

Las condiciones de mala aireación afectan a las plantas adversamente al menos de tres maneras: (1) restringen el crecimiento de la planta, particularmente el de la raíz; (2) disminuyen la absorción de nutrientes y agua y (3) favorecen la formación de ciertos compuestos inorgánicos tóxicos para el crecimiento de las plantas, tal como se discutió en la sección anterior.

**CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.** Las diferentes especies de plantas varían en su tolerancia a la mala aireación (Tabla 7.4). La remolacha azucarera y la cebada son ejemplos de plantas que requieren porosidades de aireación altas para un crecimiento óptimo (ver Figura 7.2a) En contraposición, el trébol ladino y la (reed canary grass) pueden crecer con porosidades de aireación muy bajas. El arroz y los arándanos agrios (cranberries) son cultivos que pueden crecer con sus raíces sumergidas en agua.

Más aún, la tolerancia de una planta determinada a la baja porosidad puede ser diferente para las plántulas que para las plantas en pleno crecimiento. Un buen ejemplo es la tolerancia al drenaje restringido del pino rojo en sus primeros estadios y su escaso crecimiento, o aún muerte, en el mismo sitio, en estadios posteriores (ver Figura 7.2b).

El conocimiento de la tolerancia de las plantas a la mala aireación es útil cuando se escoge las especies apropiadas para repoblar sitios anegados. La presencia de plantas especialmente adaptadas a condiciones anaeróbicas es útil para identificar las tierras anegadas (ver Sección 7.8)

**TOMA DE NUTRIENTES Y AGUA.** Los niveles bajos de O<sub>2</sub> restringen la respiración radicular, proceso que provee la energía necesaria para la absorción de nutrientes y agua. Como resultado, algunas veces la causa aparente de que las plantas se marchiten y reduzcan la absorción de agua es el exceso de agua que encharca los puntos bajos. Asimismo, en suelos escasamente drenados, las plantas pueden mostrar signos de deficiencias de nutrientes, aún cuando estos sean abundantes.

## Compactación del Suelo y Aireación

La compactación del suelo sí reduce el intercambio de gases; sin embargo, no todos los efectos negativos de la compactación son debidos a la pobre aireación. Las capas de suelo se pueden hacer tan densas como para impedir el crecimiento de las raíces de las plantas, aún cuando haya disponible un suministro de aire adecuado (ver Sección 4.5).

**TABLA 7.4 Ejemplos de Plantas de Distinta Tolerancia a una Capa Freática Alta y a la Aireación Restringida Asociada.**  
Las plantas de la columna del extremo izquierdo prosperan comúnmente en tierras anegadas. Las de la columna del extremo derecho, son muy sensibles a la mala aireación.

<i>Plantas adaptadas que crecen bien con una capa freática a la profundidad:</i>				
<i>&lt;10 cm</i>	<i>15 a 30 cm</i>	<i>40 a 60 cm</i>	<i>75 a 90 cm</i>	<i>&gt;100cm</i>
Ciprés calvo	Trébol alsike	Birdsfoot trefoil	Haya	Árborvitae
Abeto negro	Sauce negro	Black locust	Abedul	Cebada
Espadaña común	Cotton wood	Blue grass	Repollo	Porotos
Arándanos	Deer tongue	Tilo	maíz	Cerezo
Duckgrass	Eastern gama grass	Zarzamora (mulberry)	(Vicia pilosa)Hairy vetch	Abeto del Canadá (Hemlock)
Fragmites Grass	Trébol ladino	Mostaza	Mijo	Avenas
Caña virgen (maiden cane)	Pino loblolly	Arce rojo (red maple)	Arvejas	Duraznero
Mangle	Orchard grass	Sorgo	Roble rojo	Sand lovegrass
Pitcher plant (insectívora)	Redtop grass	Sicomoro		Remolacha azucarera
Reed canary grass	Festuca alta	Weeping lovegrass		Nogal
Arroz		Willow oak		Trigo
Skunk cabbage				Pino blanco
Spartina grass				
Encina blanca de los pantanos(Swamp withite oak)				
Swamp rosemalow				
Water tupelo				

## 7.7 LA AIREACIÓN CON RELACIÓN AL MANEJO DEL SUELO Y LA PLANTA

Para mantener un ambiente de suelo aeróbico son esenciales, tanto el drenaje superficial como el drenaje interno (ver Sección 6.9) En los suelos regados y en las plantas en macetas, uno de los problemas que más frecuentemente se presenta es el riego excesivo, que produce mala aireación.

### *Estructura del Suelo y Labranza*

El mantenimiento de una estructura del suelo estable es un buen medio para aumentar la aireación. Los agregados grandes y estables estimulan la formación de poros grandes, que drenan rápidamente el agua después de una lluvia, permitiendo así que los gases se trasladen desde la atmósfera hacia el suelo. En terrenos cultivados, el medio más práctico para mantener la estabilidad estructural, que a su vez favorece el buen drenaje y la mejor aireación, es quizás la conservación de la materia orgánica por el agregado de abono y residuos de cosecha, y por el cultivo de hierbas y leguminosas de crecimiento denso. Sin embargo, en suelos mal drenados de textura pesada, muchas veces es imposible mantener una aireación óptima sin recurrir a alguna labranza del suelo. Cuando los sistemas de labranza cero llevan 5 a 10 años de establecidos, frecuentemente proveen túneles de lombrices continuos y canales de raíces suficientes para contribuir mucho al drenaje. Sin embargo, la cubierta superficial de residuos puede disminuir la evaporación de agua en primavera, lo que da suelos fríos y mojados, que no son adecuados en el momento de la siembra (ver también Sección 7.12).

### *Plantas que Crecen en Recipientes*

La plantas en macetas sufren frecuentemente por el encharcamiento debido a que es difícil suministrar exactamente la cantidad de agua que necesitan. Para prevenir esto, la mayoría de los recipientes tienen orificios en el fondo para drenar el exceso de agua. Como en el caso de los suelos estratificados en el terreno (ver Sección 5.6), el agua *solamente* drena por los orificios cuando el suelo del fondo está saturado con agua. Si la mayor parte del relleno del recipiente es suelo mineral, los poros finos permanecen llenos de agua, sin dejar espacio para el aire y pronto predominan las condiciones de anaerobiosis. El uso de recipientes más altos permitirá una mejor aireación en la parte superior del sustrato.

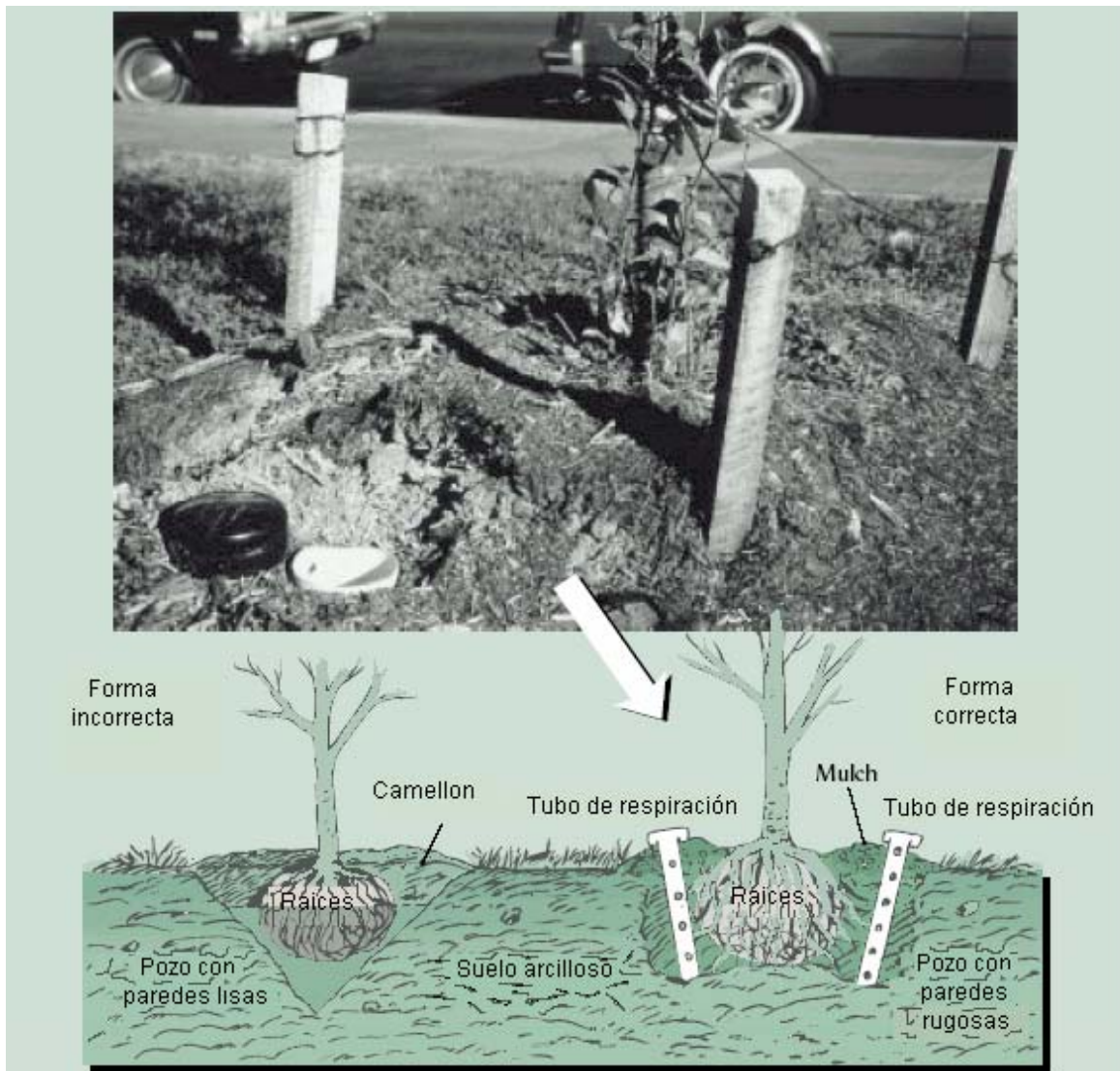
Para controlar estos problemas, las mezclas para macetas están calculadas para reunir las condiciones requeridas por las plantas. Generalmente, el suelo mineral no constituye más de un tercio del volumen de la mayoría de las mezclas para macetas, estando el resto compuesto de materiales livianos de textura gruesa, como perlita (un vidrio volcánico expandido), vermiculita (mica expandida – no vermiculita de los suelos) o pumita (roca volcánica porosa). Las mezclas más modernas contienen también ciertos materiales orgánicos estables, como turba, corteza desmenuzada, virutas de madera o compost, que además de aumentar la macroporosidad, retienen agua.

### *Manejo de Árboles y Céspedes*

Cuando se transplanta un árbol joven, o cualquier especie leñosa, se debe tener especial cuidado para prevenir la mala aireación o encharcamiento alrededor de las raíces jóvenes. La Figura 7.11 ilustra las formas correcta e incorrecta de efectuar el transplante de árboles en suelos compactados.

También se debe salvaguardar la aireación de los árboles maduros ya establecidos. Si durante la remodelación del paisaje, los operarios amontonan el suelo excedente alrededor de la base de un árbol, al poco tiempo se notan serias consecuencias (Figura 7.12) aunque la capa de suelo agregada no tenga más de 5 a 10 cm, las raíces activas del árbol próximas a la superficie original del suelo pronto tienen deficiencia de oxígeno. Si antes de la nivelación se construye una pared protectora (una *fuelle seca*) alrededor de un árbol valioso, se conservará una parte de la superficie original suficiente para permitir que las raíces del árbol accedan al O<sub>2</sub> que necesitan, con lo que se salva el árbol.

Los sistemas de manejo de los céspedes muy transitados generalmente tienen componentes relacionados a la aireación del suelo. Por ejemplo, un medio de aumentar la aireación en áreas con césped compactadas, es usar la *labranza “saca bocados”*, que realmente remueve pequeños cilindros de suelo del horizonte superficial, permitiendo así que el intercambio de gases se produzca más fácilmente (Figura 7.13). Sin embargo, se debe tener cuidado de no hacer agujeros por simple punción del suelo, ya que tal práctica incrementa la compactación alrededor del orificio.



**FIGURA 7.11** Proveer un buen suministro de aire a las raíces de los árboles puede ser problemático, especialmente cuando se plantan en suelos compactados, de textura fina, de áreas urbanas. Un pozo excavado a máquina, con paredes lisas actuará como una “taza de té” y se llenará de agua, sofocando las raíces. Las medidas que pueden mejorar el estado de aireación de la zona radicular son los tubos de respiración, los pozos grandes con superficie rugosa y una capa de cubierta superficial, en la que pueden crecer algunas raicillas del árbol. (foto cortesía de R. Weil)

## 7.8. LAS TIERRAS ANEGADAS Y SUS SUELOS POBREMENTE AIREADOS<sup>3</sup>

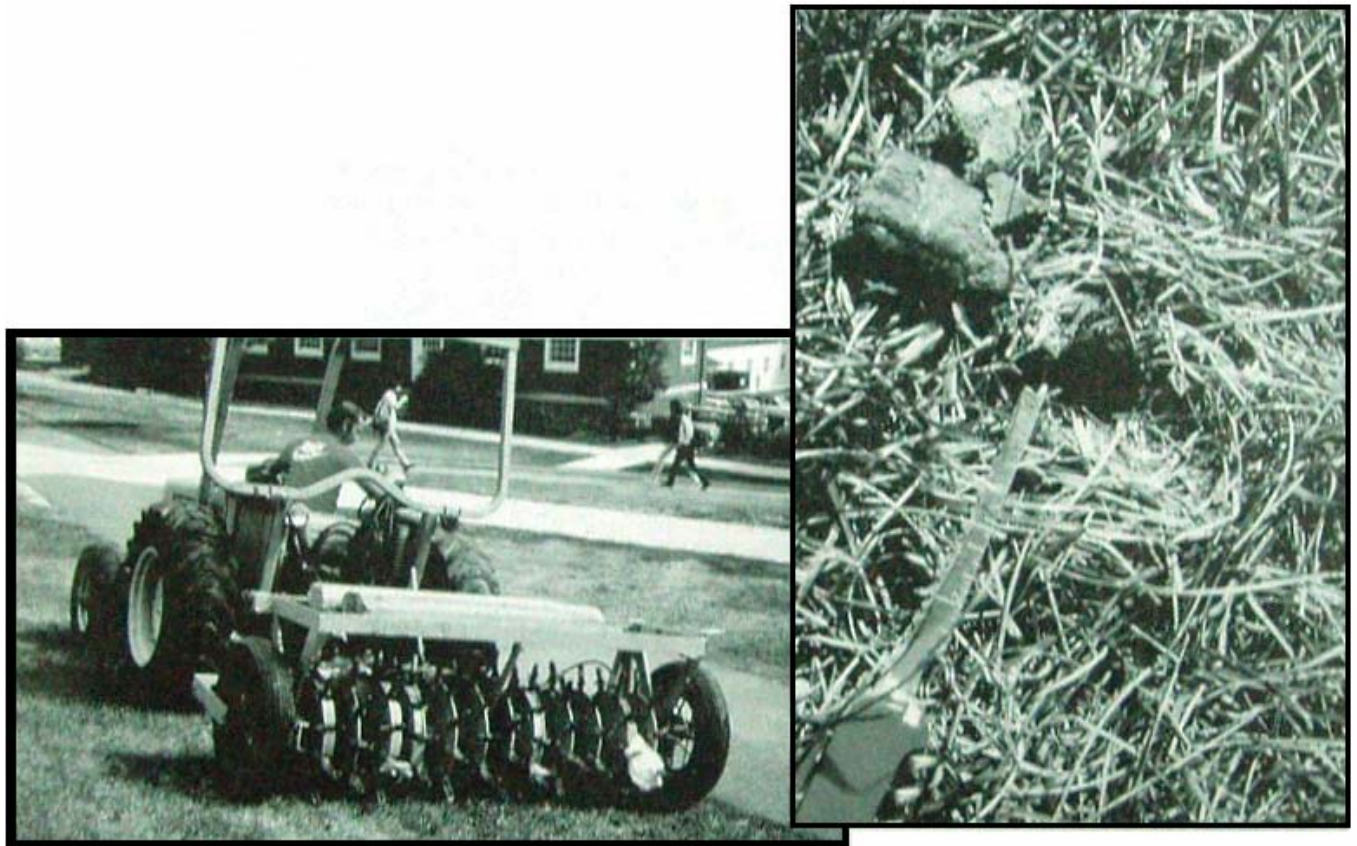
Las áreas pobremente aireadas, llamadas **tierras anegadas** cubren aproximadamente el 14 % de las tierras del mundo libres de hielo, encontrándose las áreas mayores en las regiones frías de Canadá, Alaska y Rusia (Tabla 5.7). En los Estados Unidos continentales hay actualmente alrededor de 400.000 km<sup>2</sup>, menos de la mitad de la superficie que se estima que existía cuando comenzaron los asentamientos europeos de la nación. Las mayores pérdidas de tierras anegadas ocurrieron cuando los agricultores usaron drenaje artificial para convertirlas en tierras de cultivo (ver Sección 6.9). Este proceso de conversión fue impulsado por algunos de los organismos gubernamentales (P. ej. U.S. Army Corps of Engineers y USDA) que ahora están trabajando para proteger las tierras anegadas de mayores daños. En las últimas décadas, el rellenado y el drenaje para desarrollo urbano también han afectado a las tierras anegadas. Debido a que la conciencia ambientalista ha cobrado fuerza en las sociedades modernas, la preservación de las tierras anegadas se ha transformado en un tópico importante y se ha frenado la desaparición de las mismas.

<sup>3</sup> Dos publicaciones informativas, no técnicas, bien ilustradas sobre las tierras anegadas son Welsh, et al. (1995) y CAST (1994). Por una compilación de Artículos técnicos sobre suelos de régimen hídrico y tierras anegadas, ver Rabenhorst, et al. (1998).





**FIGURA 7.12** Protección de árboles valiosos durante las operaciones de remodelación del paisaje. Aún una capa delgada de suelo esparcida sobre el sistema radicular de un árbol grande puede sofocar las raíces y matar al árbol. (Inserto) Para preservar la superficie original del terreno, para que las raíces activas puedan aprovisionarse de suficiente oxígeno, puede construirse una fuente seca de ladrillos u otro material decorativo. La fuente seca puede incorporarse al diseño final del paisaje, o rellenarse a razón de pocos centímetros por año. (Fotos cortesía de R. Weil)



**FIGURA 7.13** Uno de los medios de incrementar la aireación es la labranza con “sacabocados”. La máquina extrae pequeños cilindros de suelo, dejando perforaciones de alrededor de 2 cm de diámetro y 5 a 8 de profundidad. Este método se usa comúnmente en áreas con césped muy transitadas. Nótese que la máquina *quita* los cilindros y no hace orificios por simple punción del suelo, procedimiento que podría incrementar la compactación alrededor del mismo e impedir la difusión del aire dentro del suelo. (Fotos cortesía de R. Weil)

TABLA 7.5 Principales Tipos de Tierras Anegadas y Sus Superficies Totales

*En conjunto, las tierras anegadas constituyen quizás el 14% de la superficie firme del mundo*

<i>Tipo de Tierra anegada</i>	<i>Área total, Miles de km<sup>2</sup></i>	<i>Porcentaje de la superficie firme libre de hielo</i>	<i>Porcentaje del total de tierras anegadas</i>
Mediterraneas (ciénagas, turberas, etc.)	5415	3,9	28,8
Ribereñas o efímeras	3102	2,3	16,5
Orgánicas (histosoles)	1366	1,0	7,3
Afectadas por sales, incluyendo las costeras	2230	1,6	11,9
Afectadas permanentemente por hielo (Histeles)	6697	4,9	35,6

Datos tomados de Eswaren, et al. (1996)

### **Definición de Tierra Anegada**

*Ciénaga, turbera, marisma, estero...* estos términos aplicados a tipos particulares de tierras anegadas han estado en uso corriente por centurias y la mayoría de la gente tiene una idea bastante acertada de cómo son esas áreas. Por eso puede resultar desconcertante que la definición precisa de tierra anegada esté aún en controversia, a pesar de las décadas de esfuerzos de científicos y defensores del ambiente.<sup>4</sup> *Tierras Anegadas* es un término científico aplicable a los ecosistemas que son transiciones entre la tierra y el agua. Estos sistemas no son estrictamente terrestres (basados en la tierra) ni acuáticos (basados en el agua). Si bien hay muchos tipos diferentes de tierras anegadas, todos ellos comparten un aspecto clave, explícitamente *son suelos que están saturados por agua cerca de la superficie por períodos prolongados, cuando la temperatura del suelo es suficientemente alta para producir condiciones anaeróbicas*. La condición de anaerobiosis es la que en gran medida determina las clases de plantas, animales y suelos que se encuentran en estas áreas. Es ampliamente aceptado que el límite entre los sistemas acuáticos y una tierra anegada está donde la profundidad del agua es excesiva para que la vegetación emergente, que tiene raíces, se ancle. La dificultad radica en definir precisamente el llamado *extremo más seco* de las tierras anegadas, el límite más allá del cual se dan sistemas de tierras altas, en los que la comunidad planta-animal-suelo no está ya influenciada por la presencia de suelos saturados de agua.

Sin embargo, la controversia es más política que científica. Debido a que en los Estados Unidos, y en muchos otros países, los usos y manejo de las tierras anegadas están regulados por los gobiernos, en la determinación de qué está y qué no está protegido como tierra anegada, hay en juego billones de dólares. (Por ejemplo, considere que un constructor quiere comprar una parcela de 100 ha de tierra para construir un centro de compras. ¿Cuál será la disposición a pagar del constructor si 20, o por el contrario, 60 de esas hectáreas son declaradas fuera de los límites de construcción?).

Debido a que está en juego demasiado dinero, hay miles de profesionales ambientalistas empleados en el proceso de **demarcar las tierras anegadas**, fijando en el terreno los límites exactos del extremo más seco. La demarcación de las tierras anegadas *no* se hace frente a una pantalla de computadora, sino que es una ocupación en la que uno suda, se embarra y soporta mosquitos, siendo las únicas personas calificadas para realizarla aquellas entrenadas en la ciencia del suelo.

¿Cuáles son las características que estos científicos buscan para indicar la existencia de un sistema de tierra anegada? La mayoría de las autoridades coinciden en que hay tres características que se pueden encontrar en cualquier tierra anegada:

1. Una hidrología o régimen de agua de tierra anegada
2. Suelos hídricos
3. Plantas hidrófitas

Examinaremos brevemente cada una.

### **Hidrología de la Tierra anegada**

**BALANCE HÍDRICO.** Obviamente, el agua es un componente fundamental de las tierras anegadas. No obstante, los diferentes tipos de tierras anegadas difieren respecto a cuanta agua contienen y como es

<sup>4</sup> En 1987 el United States Army Corps of Engineers y la Environmental Protection Agency acordaron la siguiente definición a ser usada para sancionar el Acta del Agua Limpia: "El término Tierras Anegadas significa aquellas áreas que están inundadas o saturadas por agua superficial o subterránea con una duración y frecuencia suficientes para mantener, y que en circunstancias normales mantienen, una vegetación dominante típicamente adaptada para vivir en condiciones de suelo saturado."

provista esa agua. El agua que fluye hacia las tierras anegadas proviene de la escorrentía superficial (P. ej. ciénagas y pantanos), por afloramiento del agua subterránea o directamente de la precipitación. Fluye hacia fuera por cursos superficiales y subsuperficiales, como así también por evaporación y transpiración. (ver Sección 6.3 y Tabla 7.2). Tanto el balance entre entradas y salidas como la capacidad de almacenaje de agua de la tierra anegada en sí, determinan cuan anegada estará y por cuanto tiempo.

**HIDROPERÍODO.** En las tierras anegadas el grado de saturación está dado por el nivel de la capa freática (arriba o debajo de la superficie del suelo), nivel que fluctúa con el tiempo. El patrón temporal de estos cambios de la capa freática es llamado **hidroperíodo**. Para las marismas costeras, este hidroperíodo puede ser diario, cuando las mareas suben y bajan (Figura 7.14). Para las ciénagas, turberas o esteros mediterráneos es más posible que el hidroperíodo sea estacional, coincidiendo los niveles más altos de la capa freática con las estaciones de grandes lluvias y/o derretimiento de la nieve y de baja evapotranspiración. Algunas tierras anegadas pueden estar inundadas sólo más o menos un mes cada año, mientras que otras pueden no inundarse nunca, a pesar de lo cual están saturadas de agua en los horizontes superficiales.

Además, si el período de saturación ocurre cuando el suelo está muy frío para la actividad microbiana o radicular, pueden no desarrollarse condiciones de anaerobiosis aunque los suelos estén inundados. Este requerimiento de temperatura es llamado algunas veces *estación de crecimiento*, haciendo referencia al período del año durante el que las plantas están creciendo activamente. Como veremos en la Sección 7.9 la actividad microbiana continúa, aunque decreciente, hasta que la temperatura baja a unos 5°C, por lo que, si el suelo está a una temperatura mayor que ésta, el O<sub>2</sub> puede estar agotado (aunque las plantas estén en reposo). Hay que recordar que es la condición de anaerobiosis, no la mera saturación, lo que hace que una tierra anegada sea tierra anegada.

**TIEMPO DE RESIDENCIA.** Cuanto más lentamente se mueva el agua a través y hacia fuera de la tierra anegada, tanto mayor será el período durante el que una porción dada de agua esta sometida al ambiente de la tierra anegada. Un *período de residencia* largo, hace mas posible que se produzcan las funciones y reacciones propias de las tierras anegadas. Por esta razón, las prácticas que tienden a acelerar el flujo de agua, como la construcción de zanjas o la rectificación de meandros de corrientes, degradan las tierras anegadas y deben ser evitadas en el manejo de las mismas.

**INDICADORES.** Todas las tierras anegadas están saturadas parte del tiempo, pero muchas no están siempre saturadas. Durante los períodos que están mojadas, la inundación con aguas poco profundas puede ser obvia. No obstante, se requieren observaciones en campo sistemáticas, con ayuda de instrumentos, para establecer la frecuencia y duración de los períodos de encharcamiento o condiciones de saturación.



**FIGURA 7.14** Un ejemplo de tierra anegada con hidroperíodo diario, que sigue la subida y bajada de las mareas ligeramente salinas de un estuario. Este pantano de marea, con una madriguera de castor, es visible durante la marea baja, cuando están expuestos algunos suelos saturados y plantas emergentes. El límite más seco de la tierra anegada está, probablemente, justo al otro lado de la línea de árboles del fondo. (Foto cortesía de R. Weil).

Aún durante los períodos secos hay muchos signos que uno puede buscar en el terreno para determinar dónde se producen frecuentemente condiciones de saturación. El agua de los períodos pasados de inundación dejará marcas en árboles y rocas y una pátina de sedimentos sobre las hojas de las plantas y la hojarasca. Las líneas dejadas por ramas, tallos y otros desechos que flotaban, también sugieren inundaciones previas. Los árboles con extensas masas radiculares por encima de la superficie indican una adaptación a las condiciones de saturación. Pero la presencia de **suelos hídricos**, es tal vez el mejor indicador de condiciones de saturación.

### *Suelos Hídricos*<sup>5</sup>

Los científicos de suelos desarrollaron el concepto de suelos hídricos, con el fin de ayudar a delimitar las tierras anegadas. En la *Taxonomía de Suelos* (ver Capítulo 3) estos suelos están clasificados en su mayoría (pero no exclusivamente en el orden Histosoles), en otros órdenes se clasifican en subórdenes Ácuicos, como ser Aquents, Acuepts y Acualf o en subgrupos Ácuicos. Estos suelos tienen generalmente un régimen de humedad ácuico o perácuico (ver Sección 3.2)

**DEFINICIÓN.** Son tres las propiedades que ayudan a definir los suelos hídricos. Primero, están sujetos a *períodos de saturación* que inhiben la difusión de O<sub>2</sub> dentro del suelo. Segundo, sufren *condiciones de reducción* por períodos importantes de tiempo (ver Sección 7.4); es decir se reducen aceptores de electrones distintos del O<sub>2</sub>. Tercero, exhiben ciertos aspectos llamados *indicadores de suelos hídricos*.

**INDICADORES.** Los **indicadores de suelos hídricos** son aspectos asociados con la ocurrencia de saturación y reducción (algunas veces solamente en regiones geográficas específicas). Casi todos los indicadores pueden observarse en el terreno cavando un pequeño agujero de unos 50 cm de profundidad. Principalmente involucran la pérdida o acumulación de varias formas de Fe, Mn, S o C. Las acumulaciones de carbono (materia orgánica) son más evidentes en los Histosoles, pero en otros suelos las *capas oscuras superficiales* espesas pueden ser también indicadoras de condiciones hídricas en las que la descomposición de la materia orgánica ha sido restringida (ver por ejemplo, Láminas 6 y 21 después de las páginas 82 y 498).

El hierro, cuando está reducido a Fe(II), se hace suficientemente soluble para emigrar de las zonas reducidas y puede precipitar como compuestos de Fe (III) en zonas más aeróbicas. Las zonas donde la reducción ha removido o menguado los recubrimientos de hierro de los granos minerales son llamadas **huecos redox**. Comúnmente presentan los colores grises, de bajo croma, de los minerales desnudos subyacentes (por una explicación de croma, ver Sección 4.1). También el hierro mismo se vuelve gris a azul-verdoso cuando se reduce. Los colores contrastantes de los vacíos redox, o del hierro reducido y de las zonas rojizas con hierro oxidado, producen un *aspecto redoximórfico* moteado particular (ver por ejemplo las Láminas 15 y 18). Otros aspectos redoximórficos involucran al Mn reducido. Estos incluyen la presencia de *nódulos* duros y negros que a veces parecen perdigones. En condiciones estrictas de reducción, toda la matriz del suelo puede mostrar *colores de bajo croma*, llamados *gley*. Los colores con un croma 1 o menor muy probablemente indican condiciones reducidas (Figura 7.15).

Tenga siempre presente que los aspectos redoximórficos son indicativos de suelos hídricos sólo cuando se presentan en los horizontes superiores. Muchos suelos de áreas de tierras altas muestran aspectos redoximórficos sólo en sus horizontes profundos, debido a la presencia, en profundidad, de una capa freática fluctuante. Los suelos de tierras altas que están saturados, o aún inundados por períodos cortos, especialmente si es durante tiempo frío, *no* son suelos de tierra anegada (hídricos).

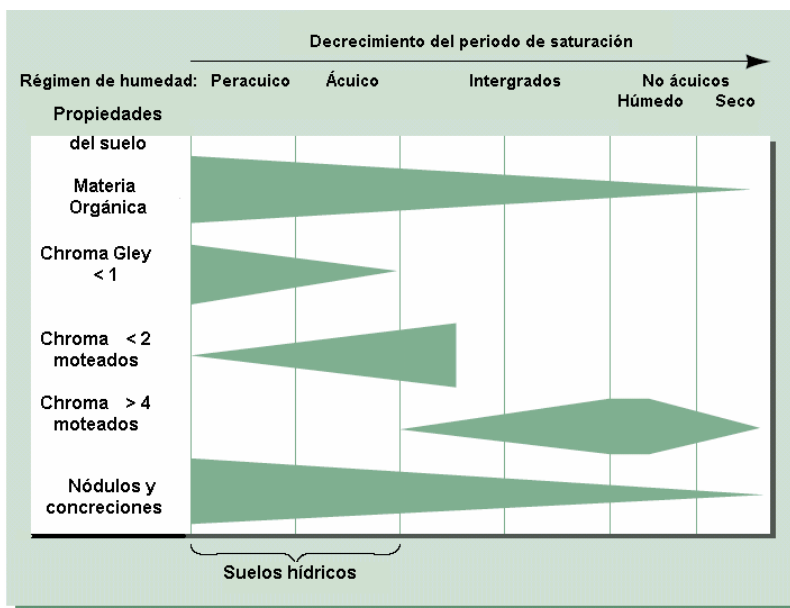
Un aspecto redoximórfico asociado exclusivamente con ciertas plantas hidrófitas, es la presencia de hierro oxidado rojizo, sobre un fondo gris, alrededor de los canales de las raíces con aerénquima de una hidrófita hacia hacia donde difundió el O<sub>2</sub> desde las raíces (ver Lámina 20). Estas *zonas radiculares oxidadas* ejemplifican la estrecha relación que existe entre suelos hídricos y *vegetación hidrofítica*.

### *Vegetación Hidrofítica*

A pesar que la gran mayoría de las especies de plantas no puede sobrevivir en las condiciones características de las tierras anegadas, existen varias y diversas comunidades de plantas que sí han desarrollado mecanismos especiales para adaptarse a la vida en suelos saturados anaeróbicos. Estas

---

<sup>5</sup> El U.S. Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service define como suelo hídrico a aquel “ que se formó en condiciones de saturación, inundación o encharcamiento suficientemente largas, durante la estación de crecimiento, para desarrollar condiciones anaeróbicas en la parte superior”. Por una guía ilustrada de campo sobre los aspectos que indican suelos hídricos, ver Hurt, et al. (1996). Por una lista actualizada de las series de suelos consideradas como suelos hídricos, ver el sitio Web <http://www.statlab.iastate.edu/soil/hidric/>.



**FIGURA 7.15** La relación existente entre la presencia de algunos aspectos en el suelo y la duración anual de las condiciones de saturación con agua. La *ausencia* de concentraciones de hierro con colores de cromas  $>4$  (moteados), y la presencia de fuertes expresiones de los otros aspectos son indicaciones de que un suelo puede ser hídrico. [Adaptado de Veneman (1998)]

plantas constituyen la **vegetación hidrofítica** que distingue las tierras anegadas de otros sistemas. Las formas típicas de adaptación incluyen los tejidos huecos del aerénquima que permiten a las plantas, como el esparto (*spartina grass*), transportar  $O_2$  hacia abajo para sus raíces. Ciertos árboles (como el ciprés calvo) producen raíces adventicias, raíces en contrafuertes o codos (ver Figura 7.1). Otras especies extienden sus raíces formando una masa superficial, sobre o justo por debajo de la superficie del suelo, hacia donde puede difundir algo de  $O_2$  aunque esté debajo de una capa de agua empozada. La columna del extremo derecho de la Tabla 7.4 registra unas cuantas hidrófitas comunes. Es probable que en una tierra anegada no todas las plantas sean hidrófitas, pero usualmente lo son la mayoría.

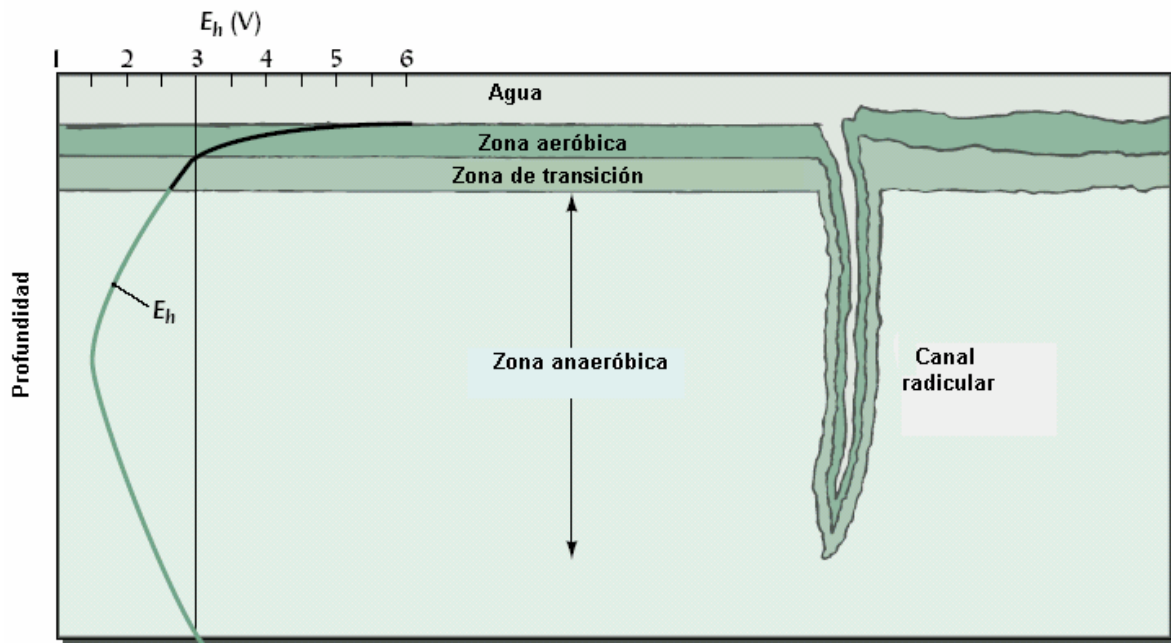
### Química de las Tierras Anegadas

Tanto los suelos hídricos como la vegetación hidrófita, son en parte el resultado y en parte la causa de una química particular de los sistemas de tierra anegada. La característica central de la química de tierra anegada es el potencial redox bajo que le corresponde (ver Sección 7.4). Además, muchas funciones de la tierra anegada dependen de las *variaciones* en el potencial redox; es decir, que en ciertas zonas, o por ciertos períodos de tiempo las condiciones de oxidación alternan con las de reducción.

**POCO OXÍGENO.** Por ejemplo, aún en una tierra inundada el  $O_2$  podrá difundir, desde la atmósfera o desde el agua, que está oxigenada, hacia los primeros 1 o 2 cm del suelo, creando una *zona oxidada* delgada (ver Figura 7.16). La difusión de  $O_2$  dentro del suelo saturado es extremadamente limitada, de modo que pocos centímetros más abajo no hay  $O_2$  y el potencial redox se hace lo suficientemente bajo para que se produzcan reacciones tales como la reducción de nitratos. La estrecha proximidad de las zonas oxigenadas y anaeróbicas, permite que el agua que pasa a través de las tierras anegadas pierda el N por oxidación del N amoniacal a N nítrico y, seguidamente, la reducción del nitrato a varias formas gaseosas de nitrógeno, que escapan hacia la atmósfera (ver Sección 13.9).

**REDOX.** Los potenciales redox pueden hacerse lo suficientemente bajos para que se reduzca el hierro, produciendo aspectos redoxi-mórficos, y para que se reduzcan los sulfatos, produciendo sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) gaseoso, que huele a huevo podrido. La zona anaeróbica puede extenderse hacia abajo o, en algunos casos, puede limitarse a los horizontes superiores donde la actividad microbiana es intensa. Las reacciones anaeróbicas del carbono discutidas en la Sección 7.6 son características de esta zona, inclusive la producción de metano (gas de los pantanos). Estas y otras reacciones químicas que involucran el reciclado de C, N y S se explican en las Secciones 12.2, 13.9 y 13.21. Ciertos elementos tóxicos, como cromo y selenio sufren reacciones redox que pueden ayudar a eliminarlos del agua, antes de que esta abandone la tierra anegada. También los ácidos del drenaje industrial o minero pueden ser neutralizados mediante reacciones en los suelos hídricos.

Esta serie de reacciones químicas particulares hace un gran aporte a los beneficios que las tierras anegadas brindan a la sociedad y a el ambiente (ver Recuadro 7.1)



**FIGURA 7.16** Potenciales redox representativos dentro del perfil de un suelo hídrico inundado. Muchas de las funciones biológicas y químicas de las tierras anegadas dependen de la proximidad estrecha entre zonas reducidas y oxidadas del suelo. Los cambios del potencial redox en las zonas más profundas dependen mucho de la distribución vertical de la materia orgánica. En algunos casos, los contenidos bajos de materia orgánica del subsuelo, dan como resultado una segunda zona oxidada por debajo la zona reducida.

### Tierras Anegadas Artificiales

Considerando todas las funciones útiles de las tierras anegadas, los científicos e ingenieros han comenzado no sólo a encontrar formas de preservar las tierras anegadas naturales, sino también a construir tierras anegadas artificiales con propósitos específicos, tales como el tratamiento de aguas de desecho (por ejemplo, ver Recuadro 14.2).

Otra razón para emprender la construcción de tierras anegadas, está dada por que en algunas reglamentaciones se contempla permitir la destrucción de ciertas áreas de tierras anegadas naturales, siempre que se construya un área nueva igual o más grande o que se restauren tierras anegadas previamente degradadas. Como podría esperarse, este proceso llamado **moderación de tierras anegadas**, ha tenido sólo un éxito parcial, ya que no se puede esperar que los científicos creen algo que no conocen completamente.

Hemos visto la influencia del agua en la aireación del suelo. Ahora nos volvemos hacia otra propiedad física del suelo, la temperatura, que también está muy influenciada por el contenido de agua.

## 7.8 PROCESOS AFECTADOS POR LA TEMPERATURA DEL SUELO

La temperatura de un suelo afecta grandemente los procesos físicos, biológicos y químicos que se producen en el mismo y en las plantas que sobre él crecen. En los suelos fríos las velocidades de las reacciones químicas y biológicas son lentas. Los procesos biológicos están casi detenidos, por lo que limitan la velocidad a la que se hacen disponibles nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, azufre y calcio. Las temperaturas bajas también inhiben la absorción y transporte de agua y nutrientes por parte de las plantas superiores. Las temperaturas demasiado altas pueden también inhibir los procesos de las plantas y los microorganismos. En la Figura 7.17 se dan los rangos de temperatura en que se producen muchos procesos del suelo, juntamente con algunas temperaturas del suelo de referencia.

### Procesos de las Plantas

Las velocidades de crecimiento de la mayoría de las plantas son realmente más sensibles a la temperatura del *suelo* que a la temperatura del *aire* que está sobre el suelo, pero esto frecuentemente no se aprecia ya que es más común que se mida la temperatura del aire. La mayoría de las plantas tienen un rango de temperatura del suelo relativamente estrecho para el crecimiento óptimo. Por ejemplo, el maíz y el pino loblolly, que evolucionaron en regiones cálidas, crecen mejor cuando la temperatura del suelo está entre 25 y 30 °C. En contraposición, la temperatura del suelo óptima para el crecimiento del centeno y el arce rojo, dos especies que evolucionaron en regiones frías, está en el rango de 12 a 18 °C.

## RECUADRO 7.1 FUNCIONES DE LAS TIERRAS ANEGADAS ÚTILES PARA LOS ECOSISTEMAS Y LA SOCIEDAD

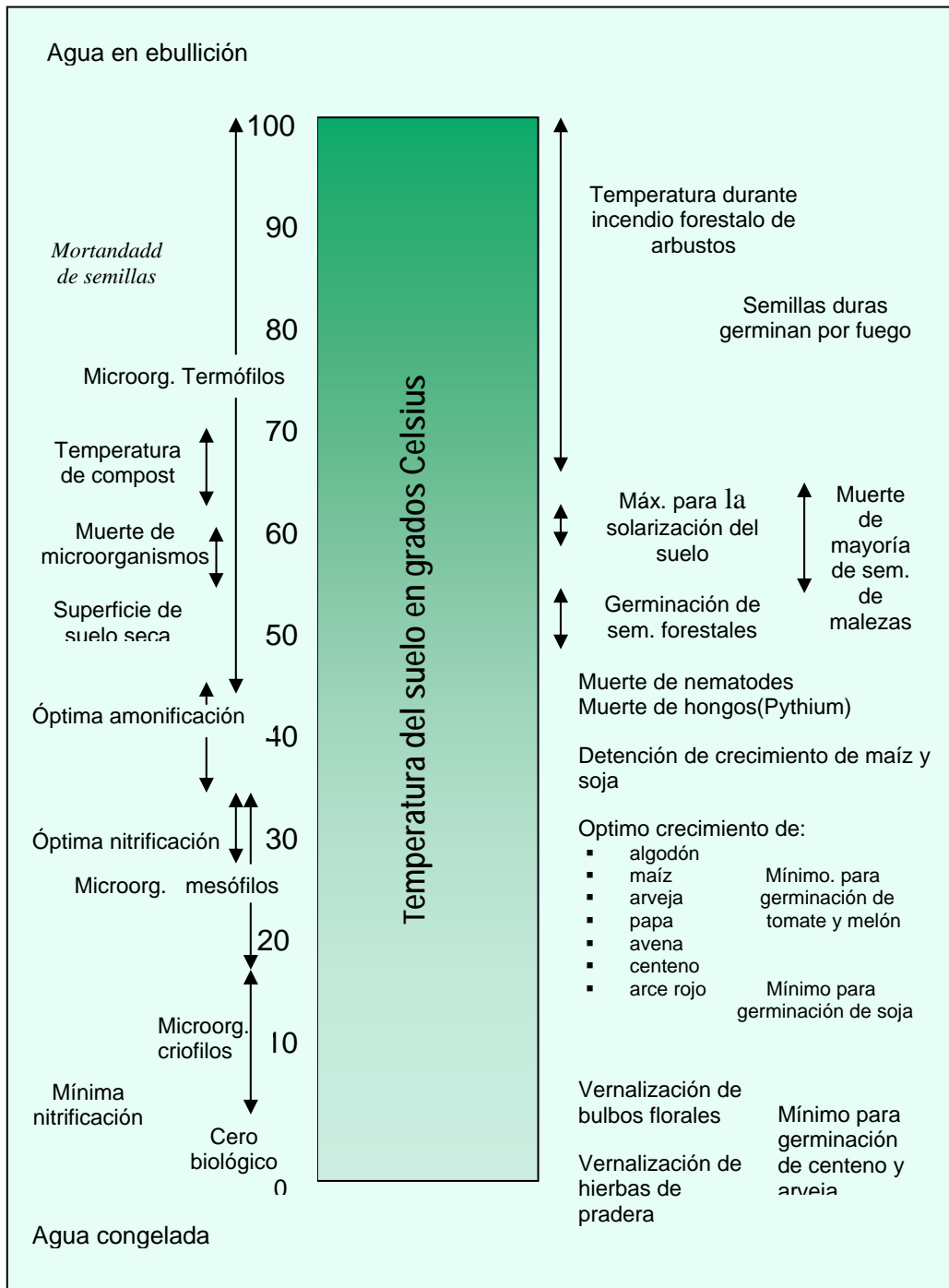
Las tierras anegadas, que alguna vez fueron consideradas nada más que tierras inservibles, productoras de enfermedades, actualmente son ampliamente reconocidas por sus muchas funciones de suma utilidad. Un grupo de científicos ha estimado que, en conjunto, las tierras anegadas prestan servicios cuyo reemplazo costaría anualmente 10 trillones de dólares. Resumiendo, podemos citar al menos seis tipos de beneficios derivados de las tierras anegadas, cuyo reconocimiento ha motivado la intensificación del estudio y la reglamentación protectora.

1. *Habitat de especies.* Las tierras anegadas proporcionan las condiciones ambientales requeridas por una gran variedad de comunidades de especies silvestres. Plantas como el ciprés calvo y las insectívoras y animales como la salamandras y las ratas almizcleras usan las tierras anegadas como habitats primarios ( es decir que viven en tierras anegadas). Aún más, un 40 % del total de especies en peligro de extinción y amenazadas dependen de alguna manera de las tierras anegadas (P. ej. por comida o refugio). En los Estados Unidos, además, aproximadamente un tercio de todas las especies de aves depende de las tierras anegadas.
2. *Filtración de Agua.* En su camino desde la tierra hacia los ríos, lagos, estuarios o acuíferos subterráneos, el agua se filtra y purifica cuando pasa a través de las tierras anegadas. Las tierras anegadas filtran físicamente la mayoría de los *sedimentos*, eliminan una alta proporción de los *nutrientes* vegetales (especialmente N y P) que de otro modo podrían causar *eutroficación* de sistemas acuáticos (ver Sección 14.2) y descomponen muchas sustancias orgánicas que podrían causar efectos tóxicos o agotar las reservas de O<sub>2</sub> en los sistemas acuáticos y en el agua potable.
3. *Disminución de inundaciones.* Las tierras anegadas funcionan como reservorios gigantes que retienen grandes volúmenes del agua de las tormentas que escurre superficialmente, para liberarla luego lentamente, ya sea por corrientes superficiales o hacia el agua subterránea, evitando así los grandes picos de escurrimiento que producen inundaciones y daños a viviendas y tierras con construcciones a lo largo de los ríos. Los estudios han demostrado que donde se ha permitido que los sistemas fluviales conserven sus tierras anegadas sin perturbar, las inundaciones son mucho menos severas y menos frecuentes.
4. *Protección de la línea de costa.* Las tierras anegadas costeras sirven como amortiguadores entre las olas del océano de gran energía y la costa, evitando la rápida erosión de la línea costera que se produce cuando las tierras anegadas son drenadas o rellenadas.
5. *Actividades comerciales y recreativas.* Sólo en los Estados Unidos, la gente gasta anualmente muchos millones de dólares a fin de atrapar, cazar, ver o fotografiar aves, animales y peces que viven en las tierras anegadas o dependen de ellas para abastecerse de alimento o para anidar. Hay dos ejemplos de esta relación que sobresalen. Primero, desde la década de 1940, la población de patos ha declinado paralelamente a la desaparición de las tierras anegadas de las llanuras deprimidas (ver Figura 6.3). Segundo: En la bahía de Chesapeake, la captura de percas rayadas (pez de las rocas) disminuyó abruptamente después del drenaje y degradación de las tierras anegadas costeras que proveen la base de su cadena alimentaria.
6. *Productos naturales.* De ciertas tierras anegadas, con un manejo cuidadoso, se puede obtener continuamente productos valiosos, como maderas, arándanos, pescados y arroz salvaje. La belleza del paisaje también podría considerarse un producto natural de las tierras anegadas que la gente puede disfrutar sin dañar el sistema.

En las regiones templado frías, la temperatura del suelo limita frecuentemente la productividad de los cultivos y de la vegetación natural. Los rendimientos de algunas hortalizas y frutas pequeñas pueden ser incrementados notablemente mediante el calentamiento del suelo (Figura 7.18). También los ciclos vitales de las plantas están muy influenciados por la temperatura del suelo. Por ejemplo, para desarrollar yemas florales, los bulbos de tulipanes requieren heladas tempranas en invierno, a pesar de que el desarrollo de la flor se suspende hasta que el suelo se calienta en la primavera siguiente.

En las regiones cálidas, y durante el verano en las templadas, las temperaturas del suelo pueden ser demasiado altas para el crecimiento óptimo de las plantas, especialmente en los primeros centímetros del suelo. Aún las plantas de origen tropical, como el maíz, son afectadas adversamente por temperaturas de suelo mayores de 35°C. Las temperaturas del suelo altas también pueden reducir la germinación de semillas. Sombreado el suelo con cubiertas vivas o muertas, o con residuos de plantas puede estimularse el crecimiento radicular cercano a la superficie del suelo

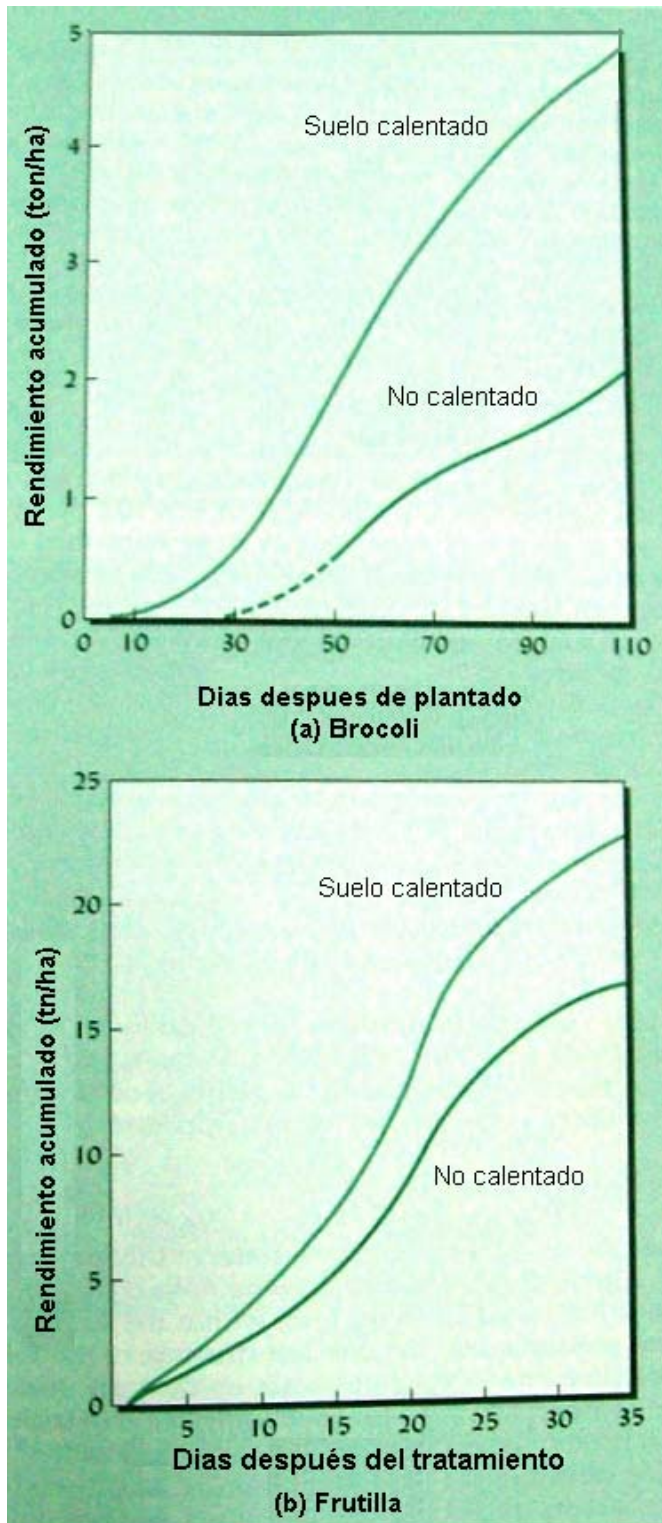
**GERMINACIÓN DE SEMILLAS.** Los diferentes procesos de las plantas tienen diferentes temperaturas óptimas. Uno de los procesos más sensible a la temperatura del suelo es la germinación de semillas. Por ejemplo, los agricultores saben que si siembran maíz en suelos de temperatura inferior a 7 a 10 °C, no se producirá germinación y posiblemente la semilla se pudrirá. Para la misma especie, el crecimiento radicular óptimo se produce a una temperatura del suelo de alrededor de 23 a 25°C, algo más fría que la óptima para el crecimiento del tallo. Los tubérculos de papa se desarrollan mejor cuando la temperatura del suelo es de 16 a 21 °C, a pesar de que el follaje crece bastante bien a temperaturas de suelo más cálidas.



**FIGURA 7.17** Rangos de temperatura asociados con una variedad de procesos del suelo

Muchas plantas herbáceas anuales requieren temperaturas de suelo específicas para que comience la germinación de las semillas, lo que explica gran parte de las diferencias de especies que se observa, en las tierras cultivadas, entre las malezas tempranas y las tardías. Igualmente, las temperaturas máximas diarias mayores y las mayores fluctuaciones térmicas del suelo que se producen cuando la explotación de maderas altera la cubierta vegetal, o cuando el viento derriba árboles, estimulan la germinación de las semillas de ciertas plantas adaptadas para crecer en los claros de un bosque. Las semillas de ciertas hierbas de pradera requieren un período de temperaturas de suelo bajas (2 a 4 °C) que les permiten germinar en la siguiente primavera, este proceso se llama *vernalización*.





**FIGURA 7.18** La influencia del calentamiento del suelo sobre el rendimiento de brócoli y frutilla. En un experimento en Oregon se enterraron cables calentadores a más o menos 92 cm de profundidad. A pesar de que la temperatura de los primeros 10 cm sólo aumentó unos 3°C, la temperatura promedio del suelo, en la capa de 0 a 100 cm, aumentó unos 10°C. [Tomado de Rykbost, et al. (1975); usado con autorización de American Society of Agronomy]

**FUNCIONES DE LA RAÍZ.** Cuando los suelos están fríos, por debajo de la temperatura óptima de cada especie en particular, las funciones de la raíz, como la absorción de nutrientes y agua, son lentas. Una consecuencia de esto son las deficiencias de nutrientes, especialmente de fósforo, que se presentan frecuentemente en plantas jóvenes a comienzos de la primavera, y que desaparecen más tarde, cuando el suelo se calienta. Otra consecuencia de la temperatura de suelo baja es el *quemado invernal* del follaje, que afecta sobre todo a los arbustos de hoja perenne. En los días de sol radiante de invierno y comienzos de primavera, cuando el suelo todavía está frío, las plantas de hojas perennes pueden desecarse, y aun morir, debido a que la absorción de agua por las raíces (en el suelo frío) es lenta y no alcanza a satisfacer la gran demanda de la evapotranspiración del follaje. El problema puede prevenirse cubriendo los arbustos con una tela de sombra.

## Procesos Microbiológicos

Los cambios de temperatura del suelo influyen notablemente en los procesos microbiológicos. La actividad microbiana general y la descomposición de la materia orgánica cesan virtualmente por debajo de 5° C, aproximadamente, una temperatura de referencia que algunas veces es llamada *cerro biológico*. Típicamente, la velocidad de los procesos microbianos, como la respiración, aumenta a algo más del doble por cada 10°C de incremento de la temperatura, hasta llegar a un óptimo cerca de 35 a 40 °C (considerablemente mayor que el óptimo para el crecimiento de las plantas). La dependencia de la respiración microbiana de las temperaturas cálidas, tiene consecuencias importantes en la aireación (ver Sección 7.8) y la acumulación de materia orgánica del suelo.

Con bajas temperaturas de suelo, no sólo se reduce la respiración, sino que también se reduce la descomposición de los residuos de las plantas y, por lo tanto, el reciclado de nutrientes que ellos contienen. Probablemente, la productividad de los bosques del norte (boreales) está limitada por el efecto inhibitorio de las bajas temperaturas de suelo en el reciclado microbiológico y la liberación del nitrógeno a partir de la hojarasca y de la materia orgánica del suelo.

Cuando la temperatura del suelo es baja, inferior a 8 a 10°C, aproximadamente, la oxidación microbiológica de los iones amonio a iones nitrato, cuya velocidad es máxima con temperaturas cercanas a 30°C, también es ínfima. Los agricultores de las regiones frías pueden sacar ventaja de esto inyectando en primavera, a los suelos fríos, fertilizantes amónicos, sabiendo que recién cuando la temperatura del suelo suba el amonio se oxidará rápidamente a nitrato. Debido a que los iones amonio no son fácilmente lixiviados, como lo son los iones nitrato (ver Sección 13.8), el nitrógeno se conservará en el suelo hasta más avanzada la estación, cuando el suelo se caliente más. Entonces comenzarán a aparecer los nitratos, pero también las plantas estarán creciendo rápidamente y usándolos (ver Capítulo 13). Desgraciadamente, en algunos años, un período cálido permite que se produzcan nitratos antes de lo esperado, lo que provoca que se pierda mucho nitrato por lixiviación, con perjuicio tanto para el agricultor como para la calidad del agua aguas abajo.

Las temperaturas de suelo altas pueden usarse para controlar ciertas enfermedades. En ambientes con veranos calientes y soleados – temperaturas del aire diarias máximas >35°C- cubriendo la superficie del suelo con una lámina plástica transparente, se puede elevar la temperatura de los primeros centímetros superficiales hasta valores tan altos como 50 a 60 °C. Estas temperaturas reducen notablemente ciertas enfermedades fúngicas, que causan marchitez en hortalizas y frutas, y afectan adversamente a algunas semillas de malezas e insectos. Este proceso, llamado *solarización del suelo*, se usa para controlar plagas y enfermedades en ciertos cultivos de gran valor económico.

Como veremos en el Capítulo 18, las temperaturas de suelo cálidas son esenciales para la destrucción microbiológica de pesticidas orgánicos tóxicos y contaminantes del suelo. El control de la temperatura del suelo es muy importante para algunas tecnologías nuevas, que aprovechan la capacidad de ciertos microorganismos para degradar productos del petróleo, pesticidas y otros compuestos.

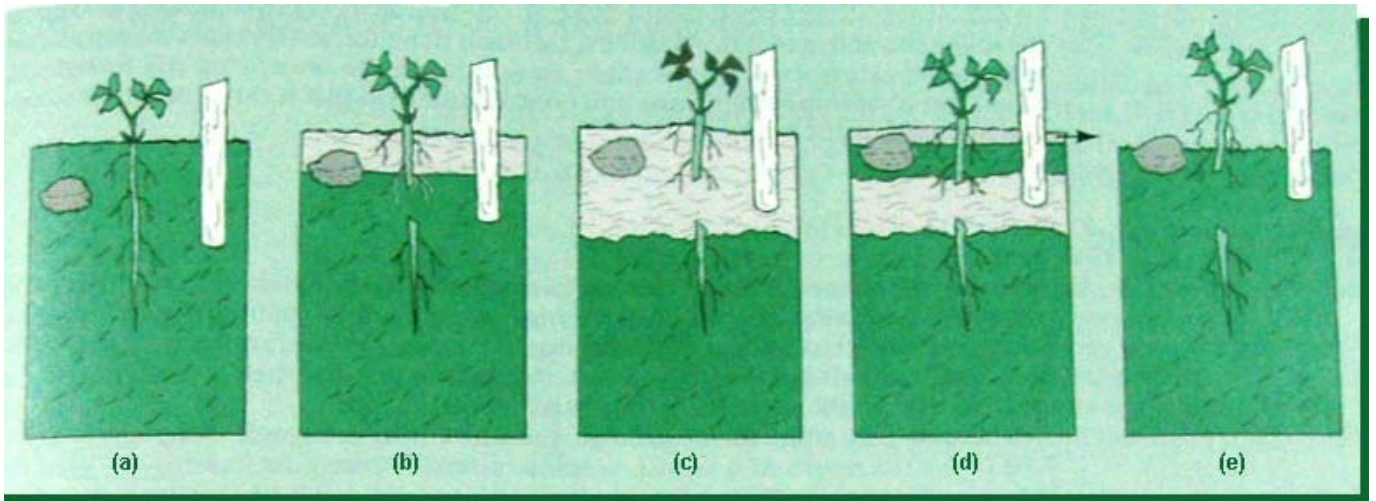
## Congelamiento y Deshielo

Cuando la temperatura del suelo fluctúa por arriba y por debajo de 0°C, el agua del suelo está sometida a ciclos de congelamiento y liquefacción. El congelamiento y la liquefacción alternantes someten a los agregados del suelo a presiones, a medida que se forman y expanden zonas de hielo puro dentro del suelo, llamadas *lentes de hielo*<sup>6</sup>. Estas presiones alteran la estructura física del suelo. En un suelo saturado, con una estructura masiva, la acción del congelamiento rompe las grandes masas y mejora notablemente la granulación. Por el contrario, si en los suelos con buena agregación comienza un proceso de congelamiento -descongelamiento cuando el suelo está muy mojado se puede producir deterioro de la estructura.

El congelamiento – descongelamiento alternativo puede empujar hacia arriba objetos que están dentro del suelo, proceso llamado *levantamiento por congelamiento (frost heaving)*. Estos objetos pueden ser piedras, postes de cercas y plantas perennes de raíz pivotante. Este efecto, que es más severo cuando el suelo es de textura limosa, está mojado y carece de una cubierta de nieve o vegetación densa, puede reducir drásticamente las cepas de alfalfa (Figura 7.19), de algunos tréboles y de trifolium. El congelamiento puede también levantar cimientos superficiales, carreteras y pistas que tengan como base materiales finos. Las gravas y las arenas puras son normalmente resistentes al daño por congelación, pero los suelos limosos y arenosos con cantidades pequeñas de partículas finas son particularmente susceptibles.

---

<sup>6</sup> La presión es debida más al crecimiento de las lentes de hielo, que al incremento de volumen de 9% que experimenta el agua al congelarse. Las lentes de hielo crecen a medida que el agua de las zonas no congeladas es atraída hacia las congeladas adyacentes. El flujo hacia las lentes de hielo en formación se facilita por el hecho que las partículas finas del suelo permanecen cubiertas por una película de agua líquida (no congelada) que está a temperaturas inferiores al punto normal de congelamiento. El descenso del punto de congelación se produce por dos razones: (1) la influencia de las interacciones agua – sólido cerca de la superficie de las partículas y (2) la presencia de iones disueltos e intercambiables en esta película de agua.



(f)



(g)

**FIGURA 7.19** Forma en que el levantamiento por congelación traslada objetos hacia arriba. (a) posición del objeto (piedra planta o poste de cerca) antes de que el suelo se congele. (b) A medida que se forman las lentes de hielo puro en el suelo congelado, por atracción de agua de las zonas no congeladas de abajo, el suelo congelado se ciñe alrededor de la parte superior del objeto, levantándolo un poco – lo suficiente para cortar la raíz en el caso de la planta. (c) debido a la penetración más profunda del frente de congelación, los objetos son elevados hacia arriba mientras continúa la formación de lentes de hielo. (d) Como en el congelamiento, el deshielo comienza desde la superficie hacia abajo. El agua de las lentes de hielo derretidas escapa hacia la superficie, debido a que no puede drenar hacia abajo a través del suelo congelado, la superficie del suelo se asienta (baja), mientras los objetos levantados se mantienen presos en la posición elevada porque el suelo que circunda sus partes inferiores está aún congelado. (e) después del deshielo completo, la piedra está más cerca de la superficie que antes (raramente están sobre la superficie, a menos que se haya erosionado el suelo descongelado) y la parte superior de la raíz cortada está expuesta, por lo que es posible que muera. (f) Plantas de alfalfa levantadas afuera del suelo por acción del congelamiento. (g) Postes de cerca, encajados en concreto, que han sido progresivamente empujados hacia fuera por la acción del hielo durante varios años. [Foto (f) cortesía de R. Weil; foto (g) cortesía de R.L. Berg, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.]

Los suelos muy arcillosos usualmente no exhiben mucho levantamiento por congelación, pero si pueden presentar segregación de lentes de hielo, lo que puede hacer que, cuando se produce el deshielo, pierdan mucho de su firmeza. Para evitar el daño por congelación del suelo, los pilotes de fundación (y las cañerías de conducción de agua) deberían colocarse por debajo de la profundidad máxima a la que el suelo se congela – profundidad que varía desde menos de 10 cm en las zonas subtropicales, como sur de Texas y Florida, hasta más de 200 cm en climas muy fríos.

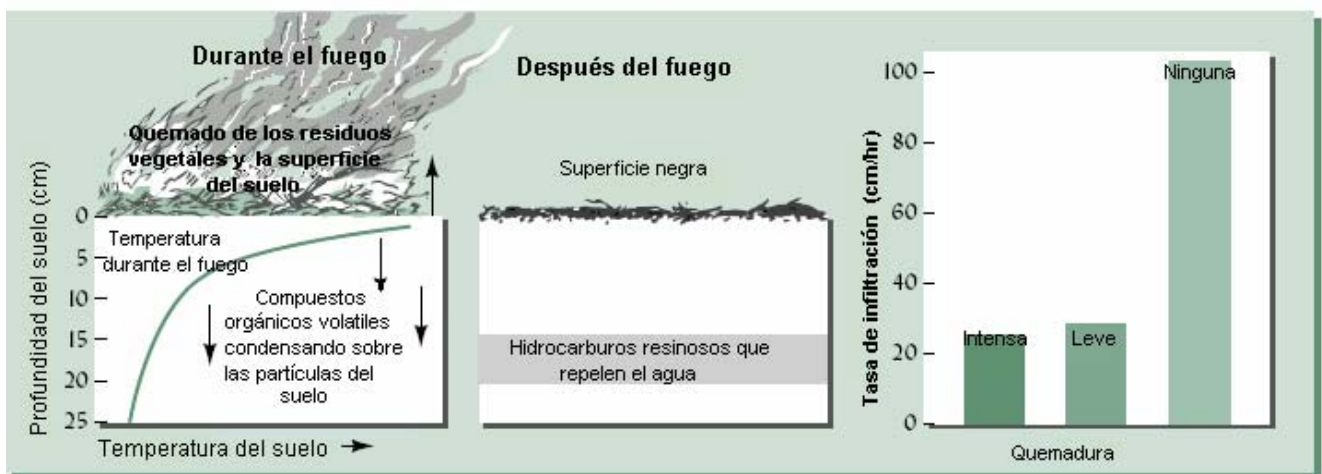
Los suelos que tienen lentes de hielo pueden contener mucha más agua que la que se necesitaría para saturarlos en estado descongelado. Cuando las lentes de hielo se derriten, el suelo se sobresatura, porque el exceso de agua no puede irse por drenaje a través del suelo subyacente que aún está congelado. En esta condición el suelo se transforma fácilmente en un barro no cohesivo, que es muy susceptible a la erosión y al movimiento por deslizamiento de lodo.

### Calentamiento del Suelo por Fuego

En la naturaleza, el fuego es una de las perturbaciones de los ecosistemas de mayor alcance. Los incendios de bosques, pastizales o residuos de cosecha, además de los efectos suprasuperficiales obvios, producen cambios de temperatura de suelo, breves pero algunas veces muy grandes, que pueden producir también efectos duraderos. A menos que el fuego sea artificialmente activado por la adición de combustible, la elevación de temperatura es, en si misma, usualmente muy breve y se limita a unos pocos centímetros superficiales del suelo.

El calentamiento puede afectar la descomposición y movimiento de compuestos orgánicos. La Figura 7.20 ilustra los resultados de uno de estos fuegos incontrolados en un lote de pinos lodgepole en Oregon. El principal efecto de las altas temperaturas (siendo comunes las  $>125^{\circ}\text{C}$ ) es la destilación de varias fracciones de la materia orgánica; algunos de los compuestos hidrocarbonados que se volatilizan se trasladan rápidamente, a través de los poros del suelo, hacia áreas más frías y profundas. A medida que estos compuestos llegan a mayor profundidad condensan (solidifican) sobre las superficies de las partículas, que están más frías, y llenan algunos de los espacios porosos circundantes. Algunos de los compuestos condensados son hidrocarbonados que repelen el agua (hidrófobos). En consecuencia, cuando llegan las lluvias, aun en suelos arenosos, la infiltración es muy reducida, en relación con la de las áreas no incendiadas. Este efecto de la temperatura del suelo es bastante común en los terrenos con chaparrales de las regiones semiáridas, y puede ser responsable de los deslizamientos de lodo desastrosos que se producen cuando la capa de suelo que está sobre la zona hidrófoba se satura con el agua de lluvia.

Los incendios también afectan la germinación de ciertas semillas, que tienen una cubierta dura que les impide germinar hasta que son calentadas a unos  $70$  a  $80^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte, la quemazón de la paja en los campos de trigo también produce temperaturas de suelo similares, pero que tienen por efecto matar a la mayoría de las semillas de malezas próximas a la superficie, reduciendo mucho las invasiones subsiguientes. El calor y las cenizas pueden también acelerar el reciclado de nutrientes de las plantas (ver Capítulo 16). Los fuegos destinados a limpiar el terreno después del corte de maderas pueden arder prolongadamente y calentar bastante, disminuyendo mucho el contenido de materia orgánica y matando tantos organismos del suelo como para inhibir la regeneración del bosque.



**FIGURA 7.20** (Izquierda) El fuego descontrolado en un lote de pinos lodgepole en Oregon sobrecalentó las capas superficiales de este suelo arenoso (un Inceptisol). (Centro) Nótese que la temperatura del suelo cerca de la superficie es suficientemente elevada para volatilizar compuestos orgánicos, algunos de los cuales se trasladan luego hacia abajo del suelo y condensan (solidifican) sobre la superficie de las partículas que están más frías. Estos compuestos condensados son hidrocarbonados similares a las ceras, que repelen el agua. Como consecuencia (Derecha) la infiltración de agua dentro del suelo se reduce drásticamente, y permanece así por un período de por lo menos seis años. [Tomado de Drynees (1976)]

## 7.10 ABSORCIÓN Y PÉRDIDA DE ENERGÍA SOLAR<sup>7</sup>

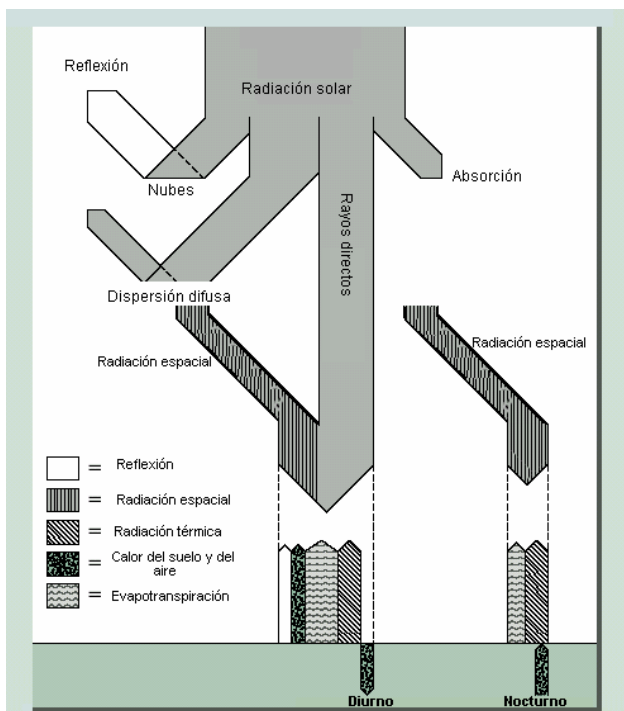
La temperatura de los suelos en el terreno depende directa o indirectamente de por lo menos tres factores: (1) la cantidad neta de energía calórica que absorbe el suelo; (2) la energía calórica requerida para producir un cambio determinado en la temperatura de un suelo y (3) la energía requerida para procesos que se producen constantemente en o cerca de la superficie de los suelos, como ser la evaporación.

La *radiación solar* es la fuente primaria de energía para calentar los suelos. Pero las nubes y las partículas de polvo interceptan los rayos solares y absorben, dispersan o reflejan la mayor parte de la energía (Figura 7.21). En las regiones húmedas nubladas, únicamente un 35 a 40% de la radiación solar llega efectivamente al suelo y en las áreas áridas sin nubes un 75%. El promedio global es 50%.

En realidad, poca de la energía solar que llega a la superficie produce calentamiento del suelo. La energía se usa principalmente para evaporar agua del suelo o de las superficies de las hojas, o es irradiada o reflejada de vuelta al espacio. Sólo un 10% es absorbido por el suelo y puede ser usado para calentarlo. Aun así esta energía es sumamente importante para los procesos del suelo y de las plantas que en él crecen.

**ALBEDO.** La fracción de la radiación incidente que es reflejada por la superficie del terreno se llama el **albedo**, y varía desde tan poco como 0,1 a 0,2 en las superficies de suelo oscuras y rugosas hasta valores tan altos como 0,5 o más, para las superficies lisas y claras. La vegetación puede afectar el albedo superficial según sea verde oscura y activa o amarilla y en reposo.

Sin embargo, el hecho que los suelos oscuros absorban más energía que los claros, no necesariamente implica que los suelos oscuros sean siempre más cálidos. En efecto, frecuentemente se da lo opuesto. En la mayoría de los paisajes, los suelos oscuros son los que se encuentran en los



**FIGURA 7.21** Representación esquemática del balance de radiación diurno y nocturno en primavera o comienzos de verano, en una región templada. Alrededor de la mitad de la radiación solar alcanza la tierra, ya sea directa o indirectamente desde la radiación espacial. La mayor parte de la radiación que incide en la tierra durante el día se usa como energía para la evaporación o es irradiada de vuelta a la atmósfera. En realidad, sólo una pequeña porción, quizás 10%, calienta el suelo. Durante la noche, el suelo pierde algo de calor y se produce algo de evaporación y radiación térmica.

sectores bajos, donde la humedad excesiva ha permitido que se acumule la materia orgánica. Así, los suelos más oscuros están también más mojados. En estos suelos el agua requiere mucha energía para calentarse y, además, enfría el suelo cuando se evapora.

<sup>7</sup> Por una revisión de modelos que describen estos procesos en escala global, ver Sellers, et al. (1997)

**EXPOSICIÓN.** El ángulo en el que los rayos del sol inciden también influye en la temperatura del suelo. Si el sol está directamente encima, la dirección de incidencia de los rayos es perpendicular a la superficie del suelo y la absorción de energía es máxima (y la temperatura del suelo aumenta) (Figura 7.22). Como un ejemplo, tres suelos, uno en una pendiente de 20% orientada al sur, uno en un sitio casi a nivel y otro en una pendiente de 20% orientada al norte (ubicados en el paralelo de 42° norte), el 21 de junio recibirán energía de los rayos del sol en la relación 106:100:81. El efecto de la dirección de la pendiente o **exposición** en las especies forestales se ilustra en la foto de la Figura 7.22.

Una forma de modificar la exposición del suelo, en micro escala, es plantando los cultivos en camellones. En las latitudes altas, esto es más efectivo si se planta en las caras sur o suroeste de los camellones. Para tener un gran efecto, sólo es necesario que los camellones tengan unos 25 cm de alto. En Fairbanks, Alaska, a comienzos de mayo las temperaturas del suelo a media tarde (a 1 cm de profundidad) pueden ser más o menos 15 °C más altas en el lado sur de uno de estos camellones que en el lado norte y unos 8 °C mayores que en el suelo a nivel.

**LLUVIA.** También se debe mencionar el efecto de la lluvia o del agua de riego sobre la temperatura del suelo. Por ejemplo, en los climas templados, las lluvias primaverales entibian efectivamente el suelo superficial cuando el agua penetra en él. Por el contrario, en el verano, la lluvia enfría el suelo, ya que a menudo está más fría que el suelo en el que penetra. Sin embargo, en la práctica, lo más frecuente es que las lluvias primaverales acentúen los problemas de bajas temperaturas porque incrementan la cantidad de energía solar necesaria para la evaporación de agua.

**COBERTURA DEL SUELO.** Otro factor que influye marcadamente en la cantidad de radiación solar que llega al suelo, es la cobertura del mismo, si está desnudo o cubierto por vegetación, cubiertas o nieve. Los suelos desnudos se calientan y se enfrían más rápidamente que los que están cubiertos por vegetación, nieve o coberturas plásticas. Durante el invierno, la penetración del congelamiento es considerablemente mayor en las tierras desnudas, sin cubierta aislante.

Aun una vegetación de bajo porte, como una hierba cespitosa, tiene una influencia muy notable en la temperatura del suelo y en la de sus alrededores (Tabla 7.6). Gran parte del efecto de enfriamiento es debido al calor disipado por la transpiración de agua. Para experimentar este efecto en un caluroso día de verano ¡trate de hacer un picnic sobre un lote de estacionamiento asfaltado en vez de hacerlo en un prado verde de césped!

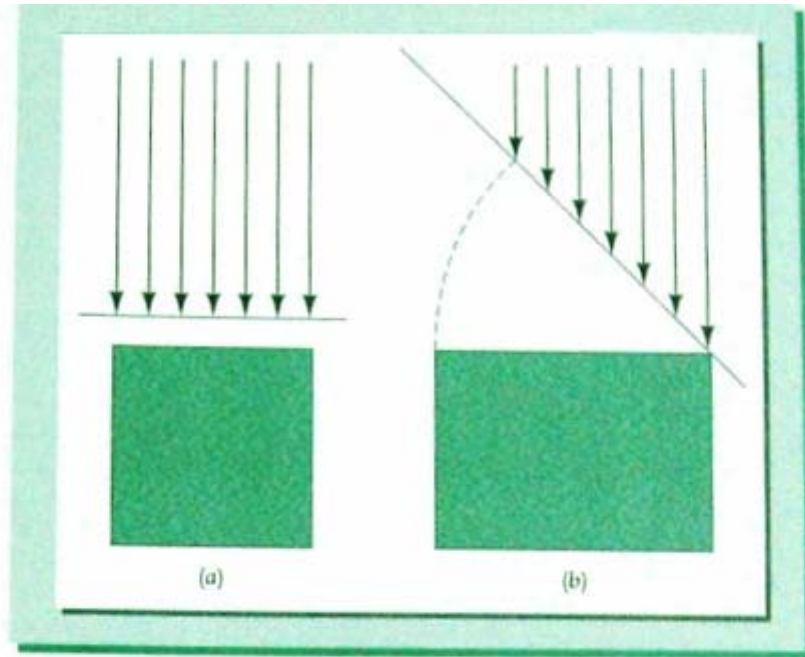
El efecto de un bosque denso es universalmente reconocido. Las prácticas de explotación maderera que dejan cobertura suficiente para producir un 50 % de sombra, posiblemente evitan un calentamiento inapropiado del suelo que podría acelerar la pérdida de materia orgánica del suelo o la generación de condiciones anaeróbicas en los suelos mojados. En la Tabla 7.2 se ve el efecto de la extracción de maderas en las temperaturas del suelo a profundidades tan grandes como 50 cm. En el caso presentado en la Tabla 7.2, la extracción de árboles caldeó el suelo en primavera, a pesar de que también aumentó el contenido de agua. Sin embargo, como podremos ver en la siguiente sección, normalmente un contenido de agua más alto frena el calentamiento primaveral de los suelos.

## 7.11 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS

### *Calor Específico de los Suelos*

Un suelo seco se calienta más fácilmente que uno mojado. Esto es debido a que la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura del agua en 1°C (su capacidad calórica) es mucho mayor que la requerida para elevar la de los sólidos del suelo en 1°C. Cuando la capacidad calórica se expresa por unidad de masa – por ejemplo, en calorías por gramo (cal/g) – es llamada **calor específico** o capacidad calórica *c*. El calor específico del agua pura es más o menos 1,00 cal/g (o 4,18 joules por gramo, J/g); la de un suelo seco es aproximadamente 0,2 cal/g (0,8 J/g).

El calor específico controla en gran medida cómo se calientan los suelos en la primavera, los suelos más mojados se calientan más lentamente que los más secos (ver Recuadro 7.2). Es más, si el agua no drena libremente del suelo mojado, debe evaporarse, un proceso que consume mucha energía, como se verá en la próxima sección.



**FIGURA 7.22** (arriba) Efecto del ángulo con que inciden los rayos solares en el área de suelo que se está calentando. (a) Si una cantidad dada de radiación solar incide en el suelo en forma perpendicular, la radiación se concentra en un área relativamente chica, y el suelo se calienta bastante rápido. (b) Si la misma cantidad de radiación incide en el suelo con un ángulo de  $45^\circ$ , el área involucrada es un 40% mayor, la radiación no está tan concentrada y el suelo se calienta más lentamente. Esta es una de las razones por las que las pendientes orientadas hacia el norte tienen suelos más fríos que las orientadas hacia el sur. Esto también explica por qué los suelos están más fríos en invierno que en verano. (Abajo) Una vista, según se mira hacia el este, de un área forestada de Virginia, ilustra el efecto de la temperatura. La loma principal (de izquierda a derecha) corre de norte a sur y las lomas laterales, más bajas, de este a oeste (de arriba hacia abajo). Los parches oscuros son árboles de pinos insertos en este bosque de árboles caducifolios de madera dura. Los pinos dominan en las laderas del sur (más cálidas y secas) de todas las lomadas que corren de este a oeste. (Foto cortesía de R. Weil)

TABLA 7.6 Temperaturas Superficiales Máximas de Cuatro Tipos de Superficie en un Día Soleado de Agosto en College Station, Texas

Tipo de superficie	Temperatura máxima, °C	
	Diurna	Nocturna
Prado de césped en crecimiento	31	24
Suelo desnudo, seco	39	26
Pasto en reposo estival, pardo	52	27
Campo deportivo con césped sintético seco	70	29

Datos tomados de Beard and Green (1994)

Los sistemas de control de temperatura, llamados **bombas de calor**, que están diseñados tanto para calentar como para enfriar edificios, aprovechan el alto calor específico de los suelos. Para maximizar el intercambio de calor por contacto con el suelo, se coloca una red subterránea de tubos cerca del edificio a ser enfriado y calentado. Se aprovecha que el subsuelo está generalmente más caliente que la atmósfera en invierno y más frío que la atmósfera en verano. A través de la red de tubos circula agua, que absorbe calor del suelo durante el invierno y libera calor hacia el suelo en verano. El alto calor específico de los suelos permite que haya un gran intercambio de energía sin que se modifique mucho la temperatura del suelo (Figura 7.23).

### Calor de Vaporización

La evaporación de agua desde las superficies de los suelos requiere una gran cantidad de energía, 540 kilocalorías (kcal) o 2,257 J por cada kilogramo de agua vaporizada. Esta energía debe ser provista por la radiación solar o debe venir del suelo circundante. En cualquier caso, la evaporación tiene el potencial de enfriar el suelo, en forma muy parecida a cómo enfría a una persona que sale de nadar en un día ventoso.

Por ejemplo, si la cantidad de agua contenida en 100 g de suelo seco se redujo por evaporación desde 25 a 24 g (una disminución de sólo un 1%) y si toda la energía térmica requerida para evaporar el agua provino del suelo húmedo, el suelo se habrá enfriado unos 12 °C. Esta cantidad es hipotética porque sólo una parte del calor de vaporización proviene del propio suelo. No obstante, indica la enorme importancia del enfriamiento por evaporación.

La temperatura baja de un suelo mojado es debida parcialmente a la evaporación y parcialmente al alto calor específico. La temperatura de los primeros centímetros superficiales de un suelo mojado es comúnmente 3 a 6°C más baja que la de uno húmedo o seco. En la primavera, este es un factor muy significativo en las regiones templadas, cuando unos pocos grados de diferencia determinarán la germinación o falta de germinación de las semillas, o la liberación o no liberación microbiológica de nutrientes de la materia orgánica.

### Conductividad Térmica de los Suelos

Como se muestra en la Sección 7.10, algo de la radiación que llega al suelo penetra lentamente dentro del perfil, mayormente por conducción; este es el mismo proceso por el que el calor se traslada a lo largo de un tubo de hierro, cuando una de las puntas se pone en un fuego. El movimiento de calor en el suelo es análogo al movimiento del agua (ver Sección 5.5), la velocidad de flujo está determinada por una fuerza impulsora y por la facilidad con que el calor fluye a través del suelo. Esto puede expresarse por la ley de Fourier:

$$Q_h = K \times \frac{\Delta T}{x}$$

donde  $Q_h$  es el *flujo térmico*, la cantidad de calor transferida a través de una unidad de área, perpendicular a la dirección del flujo, en una unidad de tiempo;  $K$  es la **conductividad térmica** del suelo y  $\Delta T/x$  es el gradiente de temperatura, a lo largo de la distancia  $x$ , que sirve como fuerza impulsora para la conducción del calor.

La conductividad térmica  $K$  de los suelos es afectada por varios factores, siendo los más importantes el contenido de humedad del suelo y el grado de compactación. El calor pasa mucho más rápido a través del agua que a través del aire. En un suelo, a medida que el contenido de agua aumenta disminuye el de aire y la resistencia a la transferencia es mucho menor. Cuando ya hay suficiente agua para formar un puente entre la mayoría de las partículas del suelo, agregar más no tendrá casi



## RECUADRO 7.2 CÁLCULO DEL CALOR ESPECÍFICO O CAPACIDAD CALÓRICA DE SUELOS HÚMEDOS

El contenido de agua incide notablemente en los cambios de temperatura del suelo debido a su efecto sobre el calor específico o capacidad calórica,  $c$ , de un suelo. Por ejemplo, considere dos suelos con características semejantes; el suelo A, está mojado con 30 g de agua / 100 g de sólidos de suelo y el suelo B está más seco, con sólo 10 g de agua / 100 g de sólidos de suelo.

Podemos asumir los siguientes valores para el calor específico:

$$\begin{aligned}\text{Agua} &= 1,0 \text{ cal/g} \\ \text{Suelo mineral seco} &= 0,2 \text{ cal/g}\end{aligned}$$

Para el suelo B (A?) con 10 g de agua / 100 g de suelo seco, o 0,1 g de agua / g de suelo seco, el número de calorías requeridas para elevar la temperatura de 0,1 g de agua en 1 °C es:

$$0,1 \text{ g} \times 1,0 \text{ cal/g} = 0,1 \text{ cal}$$

La cifra correspondiente para 1,0 g de sólido del suelo es:

$$1 \text{ g} \times 0,2 \text{ cal/g} = 0,2 \text{ cal}$$

Por lo tanto se requiere un total de 0,3 cal (0,1 + 0,2) para elevar la temperatura de 1,1 g (1,0 + 0,1) del suelo húmedo en 1 °C. Ya que el calor específico es el número de calorías requeridas para elevar la temperatura de 1 g de suelo húmedo en 1 °C, podemos calcular el calor específico del suelo B (A?) como sigue:

$$C_{\text{suelo B(A?)}} = 0,3 / 1,1 = 0,273 \text{ cal/g}$$

Estos cálculos pueden expresarse en una ecuación simple para calcular el calor específico medio ponderado de una mezcla de sustancias:

$$C_{\text{suelo húmedo}} = (c_1 m_1 + c_2 m_2) / (m_1 + m_2)$$

donde  $c_1$  y  $m_1$  son el calor específico y la masa de la sustancia 1 (en este caso el suelo mineral seco), y  $c_2$  y  $m_2$  son el calor específico y la masa de la sustancia 2 (en este caso el agua).

Aplicando esta ecuación al suelo B(A?), calculamos nuevamente que  $c_{\text{suelo B(A?)}}$  es 0,273 cal / g del modo siguiente:

$$\begin{aligned}C_{\text{suelo B(A?)}} &= (0,2 \text{ cal / g} * 1,0 \text{ g} + 1,0 \text{ cal / g} * 0,1 \text{ g}) / (1,0 \text{ g} + 0,1 \text{ g}) \\ &= 0,30 \text{ cal / 1,1 g} \\ &= 0,273 \text{ cal / g}\end{aligned}$$

De la misma forma calculamos el calor específico del suelo A (B?) mojado:

$$\begin{aligned}C_{\text{suelo A(B?)}} &= (0,2 \text{ cal / g} * 1,0 \text{ g} + 1,0 \text{ cal / g} * 0,3 \text{ g}) / (1,0 \text{ g} + 0,3 \text{ g}) \\ &= 0,50 \text{ cal / 1,3 g} \\ &= 0,385 \text{ cal / g}\end{aligned}$$

El suelo A(B?) mojado tiene un calor específico  $c_{\text{A(B?)}}$  de 0,385 cal / g, mientras que el suelo B(A?) más seco tiene un calor específico  $C_{\text{B(A?)}}$  de 0,273 cal / g. Debido a que el suelo mojado debe absorber 0,112 cal (0,385 – 0,273) adicionales de la radiación solar por cada grado de incremento de temperatura, se calentará mucho más lentamente que el suelo seco.



**FIGURA 7.23** Esta escuela superior de Oklahoma ha sido construida dentro del suelo, con un solo lado expuesto. Este diseño aprovecha el alto calor específico y la baja conductividad térmica del suelo circundante, manteniendo la escuela tibia en invierno y fresca en el verano, con un gasto mínimo de energía para calefacción o acondicionamiento de aire. (Foto cortesía de R. Weil)

ningún efecto en la conducción del calor. El calor se mueve a través de las partículas minerales aun más rápido que a través del agua, por esto, cuando se aumenta el contacto entre partículas por compactación del suelo, también aumenta la velocidad de transferencia del calor. Por esta razón, un suelo mojado compactado será el peor aislante, o el mejor conductor del calor. Aquí se demuestra una vez más la interconexión entre propiedades del suelo.

Los suelos relativamente secos son un buen material aislante. Los edificios construidos en gran parte bajo tierra, pueden aprovechar tanto la baja conductividad térmica como la relativamente alta capacidad calórica de grandes volúmenes de suelo (ver Figura 7.23).

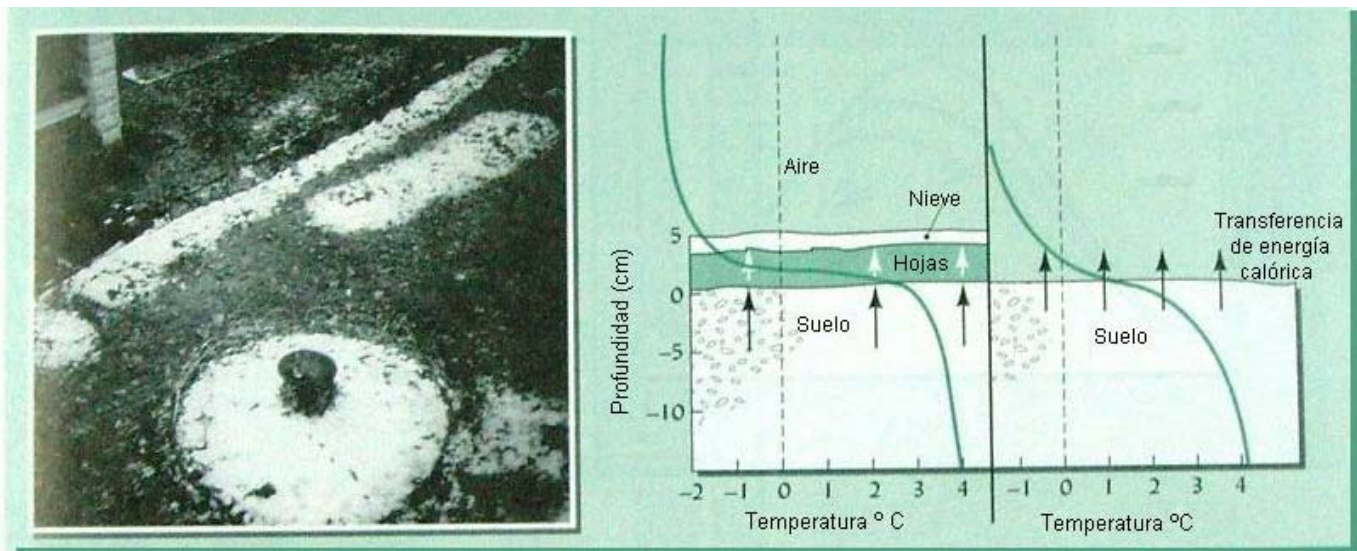
No es difícil comprender la importancia que tiene la conducción del calor en la temperatura del suelo en el terreno. La conducción del calor provee un medio de ajuste de la temperatura, pero debido a que es lenta, los cambios de temperatura del subsuelo se retrasan respecto a los de las capas superficiales. Más aun, los cambios de temperatura son siempre menores en el subsuelo. En las regiones templadas, en general, es de esperar que los suelos superficiales estén más cálidos en verano y más fríos en invierno que el subsuelo (que los horizontes más profundos del subsuelo en particular). Como se muestra en la Figura 7.24, la conductividad térmica del suelo puede afectar también a la temperatura del aire que está encima de él.

### *Fluctuaciones de la Temperatura del Suelo*

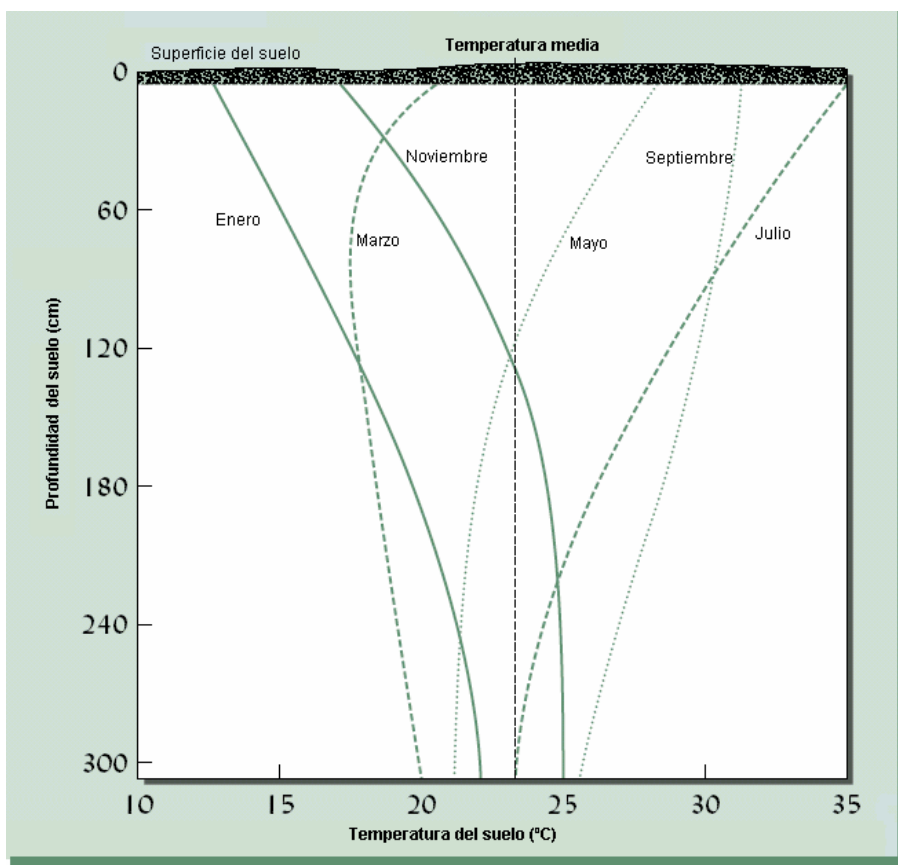
En cualquier instante, la temperatura del suelo depende de la relación entre la energía absorbida y la que se pierde. El cambio constante de esta relación se refleja en las temperaturas estacionales, mensuales y diarias. Los datos de College Station, Texas y de Lincoln, Nebraska que se adjuntan (Figuras 7.25 y 7.26) son representativos de las temperaturas promedio estacionales y mensuales, en función de la profundidad, en regiones sub-húmedas templadas.

### *Cambios Verticales y Estacionales de la Temperatura*

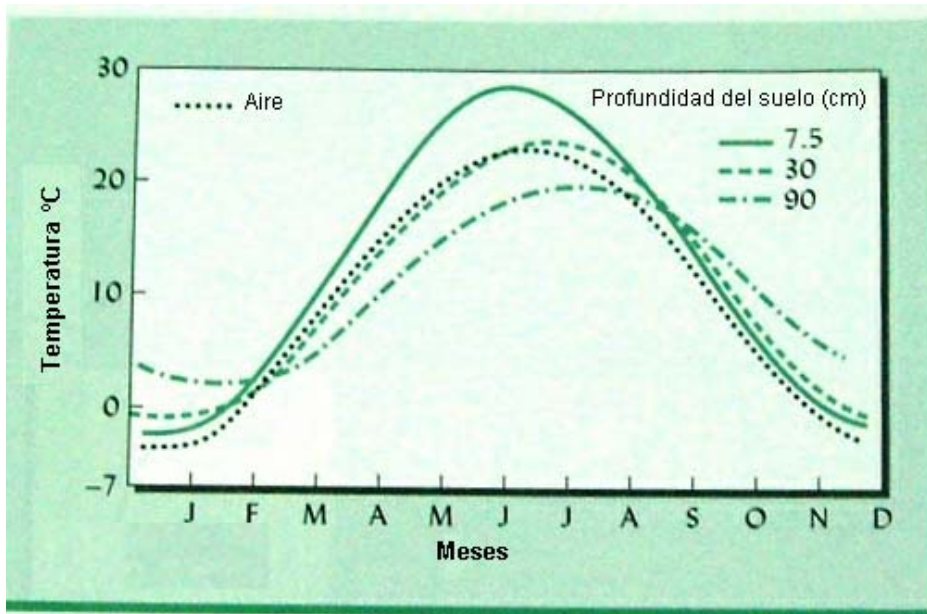
Las Figuras 7.25 y 7.26 evidencian que se producen variaciones estacionales y mensuales de temperatura del suelo considerables, aun en las profundidades mayores. La temperatura de las capas superficiales varía más o menos de acuerdo a la temperatura del aire, aunque estas capas están generalmente más calientes que el aire a lo largo de todo el año.



**FIGURA 7.24** Transferencia de energía calórica desde el suelo al aire. Esta vista desde arriba de un jardín después de una nevada temprana, muestra nieve en los macizos de flores cubiertos de hojas, pero no en las áreas donde el suelo está desnudo o cubierto con un césped corto. La razón de esta acumulación desapareja de nieve puede verse en los perfiles de temperatura. Debido a que las capas de suelo han acumulado calor del sol, frecuentemente están más calientes que el aire cuando las temperaturas comienzan a descender ( esto también sucede en otras estaciones durante la noche). En el suelo desnudo, la energía calórica se transfiere rápidamente desde las capas más profundas hacia la superficie, el contenido alto de humedad o la compactación, que aumentan la *conductividad térmica* del suelo aceleran la velocidad de transferencia. Como resultado, la superficie del suelo y el aire sobreyacente se calientan por encima del punto de congelación, por lo que la nieve se derrite y no se acumula. La cubierta de hojas, que tiene una conductividad térmica más baja, actúa como una manta aislante que frena la transferencia de la energía calórica almacenada desde el suelo al aire. Por esta razón es muy difícil que el suelo caliente la superficie externa de la cubierta, y la nieve permanece congelada y se acumula. Una capa espesa de nieve puede actuar en sí misma como una manta aislante. (Foto cortesía de R. Weil)



**FIGURA 7.25** Temperaturas medias a diferentes profundidades de suelo, de seis de los doce meses del año en College Station, Tex. (1951 – 1955). Nótese el retraso del cambio de temperatura en las profundidades mayores [Tomado de Fluker (1958)]



**FIGURA 7.26** Temperaturas medias mensuales (de 12 años) del aire y del suelo, en Lincoln, Nebr. Observe que la capa superior del suelo, de 7,5 cm de profundidad, está siempre más caliente que el aire sobreyacente, y que el horizonte de los 90 cm está más frío en primavera y verano que el suelo de la superficie, pero más caliente en otoño e invierno.

En el subsuelo la temperatura estacional aumenta y disminuye con retraso respecto a los cambios registrados en el suelo superficial y en el aire. En consecuencia, los datos de temperatura de marzo para College Station, indican que las temperaturas de la superficie del suelo ya han comenzado a responder al caldeoamiento de la primavera, mientras que las temperaturas del subsuelo profundo parecen estar respondiendo todavía al tiempo frío invernal.

Las temperaturas de subsuelo son menos variables que las del aire y las de la superficie del suelo, no obstante lo cual, aun a 300 cm de profundidad hay cierta variación. Generalmente, los subsuelos son más cálidos a fines del otoño y en invierno, y más fríos en la primavera y el verano que las capas superficiales y que el aire. Esto es de esperar, ya que los subsuelos no están expuestos a la radiación solar directa.

### *Variaciones Diarias*

En las regiones templadas con cielo claro, la temperatura del aire se eleva desde un mínimo en la mañana hasta un máximo alrededor de las 2 PM. Sin embargo, el suelo superficial alcanza su máximo más tarde, debido al retraso normal. A medida que la profundidad aumenta, este retraso es mayor y el cambio de temperatura es menor. El subsuelo inferior muestra poca fluctuación diaria o semanal, en él, como ya se enfatizó, la variación está dada por un cambio lento mensual o estacional.

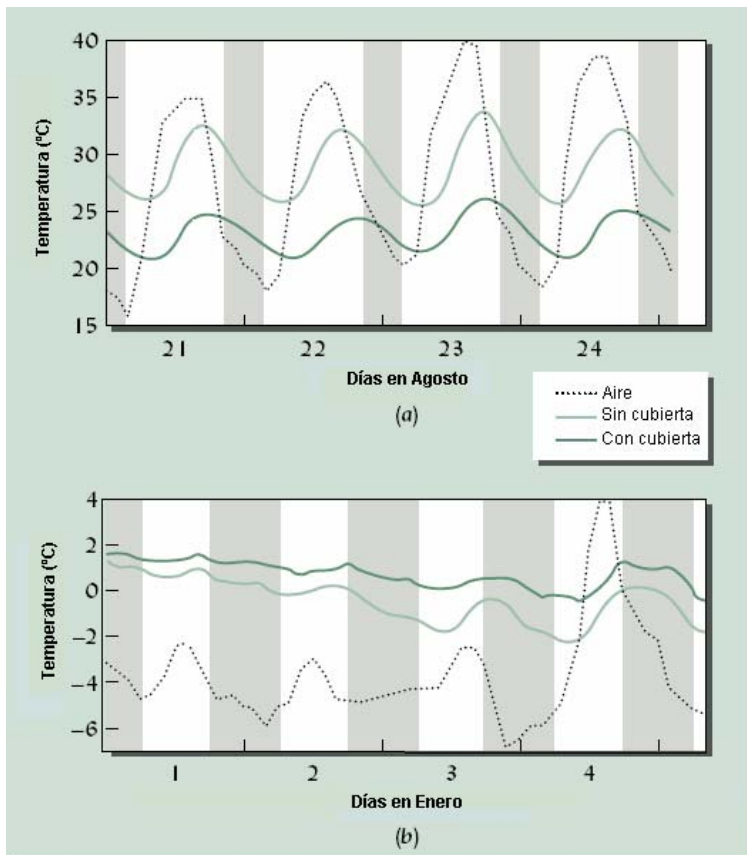
## CONTROL DE LA TEMPERATURA DEL SUELO

En el terreno, la temperatura de los suelos no está sujeta a una regulación humana estricta. Sin embargo, hay dos clases de prácticas de manejo que tienen efectos prácticos significativos en la temperatura del suelo: las que afectan la cobertura del suelo y las que reducen el exceso de humedad del suelo. Estos efectos tienen consecuencias biológicas importantes.

### *Cubiertas Orgánicas y Manejo de Residuos*

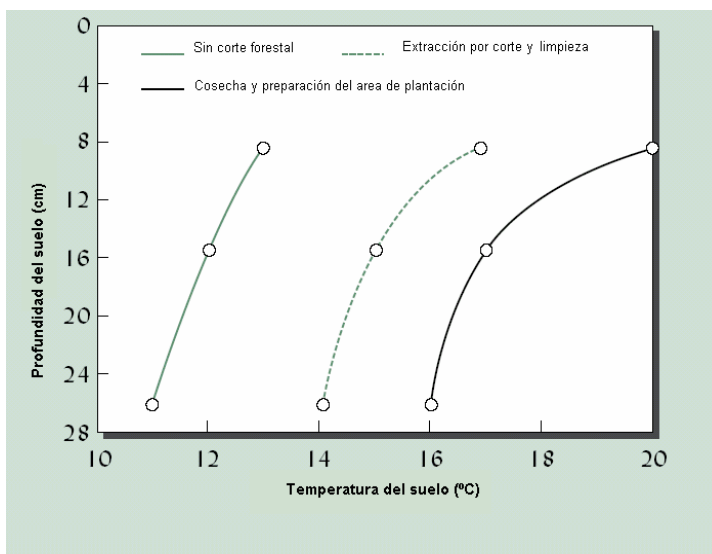
Las temperaturas del suelo están influenciadas por la cobertura de la superficie del suelo, especialmente por los residuos orgánicos u otros tipos de cubiertas. La Figura 7.27 muestra que las cubiertas amortiguan efectivamente las temperaturas extremas del suelo. En períodos de tiempo caluroso mantienen la superficie más fría que la superficie descubierta; en contraste, cuando el tiempo es frío, mantienen el suelo más cálido que si estuviese desnudo.

El suelo de un bosque es un muy buen ejemplo de cubierta natural que modifica la temperatura. Por esto, no es sorprendente que las prácticas de explotación forestal puedan afectar notablemente los regímenes de temperatura del suelo (Figura 7.28). La perturbación de la cubierta de hojas, los cambios en el contenido de agua debido a la reducción de la evapotranspiración y la compactación por uso de maquinaria, son factores que afectan la temperatura del suelo a través de la conductividad térmica. Además, la reducción del sombreado, después de la extracción de árboles, permite que entre más radiación solar.

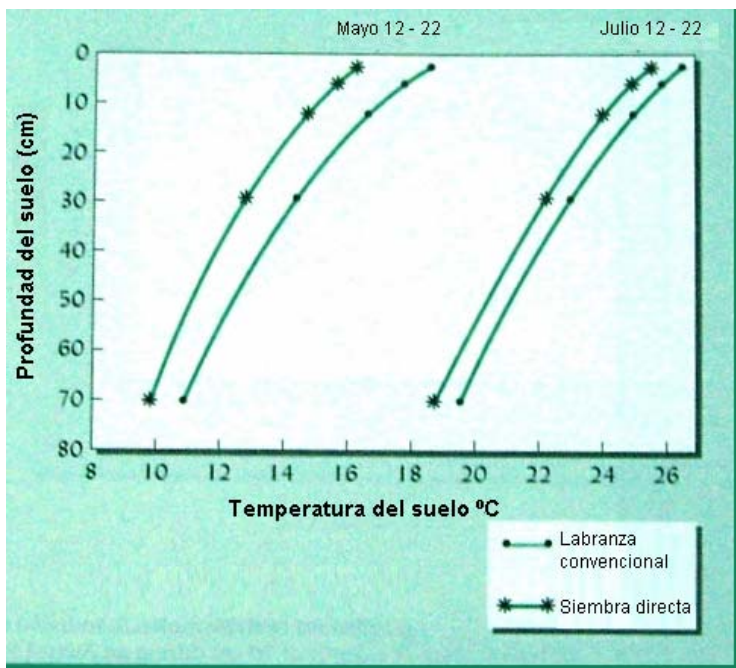


**FIGURA 7.27** (a) Influencia de una cubierta de paja (8 ton/ha) sobre la temperatura, a 10 cm de profundidad, durante un período caluroso de agosto en Bushland, Tex. Nótese que en el área de suelo cubierta las temperaturas son siempre más bajas que donde no se había aplicado cubierta. (b) Durante un período frío, en enero, la temperatura del suelo fue más alta en el área cubierta que en la no cubierta. Las barras sombreadas representan el período nocturno. [Redibujado a partir de Unger (1978); usado con permiso de la American Society of Agronomy]

**CUBIERTA A PARTIR DE LABRANZA CONSERVACIONISTA.** Hasta hace poco, el uso de materiales de cobertura para modificar las temperaturas extremas del suelo, se limitaba casi exclusivamente a los jardines domésticos y a los cultivos de flores, debido al trabajo y al costo de transportarlos y aplicarlos. Aunque estos usos son todavía importantes, el uso de cubiertas se ha extendido a cultivos en campo, en áreas donde se ha adoptado prácticas de labranza conservacionista. La labranza conservacionista deja casi todos los residuos de cosecha en o cerca de la superficie del suelo, por lo que la cubierta se produce en el terreno, en vez de ser transportada desde otro sitio. Los datos que se muestran en la Figura 7.29 ilustran la influencia de los residuos superficiales sobre



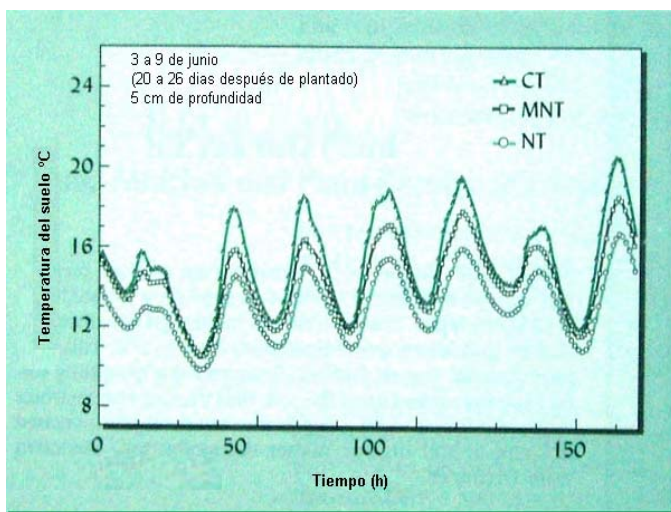
**FIGURA 7.28** Influencia de la extracción de maderas y las operaciones de preparación del suelo posteriores en los perfiles de temperatura del suelo del mes de junio en una tierra anegada forestal de Michigan. La extracción por corte y limpieza alteró mucho el sitio y elevó las temperaturas del suelo en 4 a 5 °C. La labranza preparatoria para la nueva plantación eliminó los restos de la cubierta de residuos del suelo de bosque y desecó el suelo, causando así un incremento adicional de temperatura de 2 a 3 °C. Las mayores temperaturas incrementaron la velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo. [Redibujado a partir de Trettin, et al. (1996)]



**FIGURA 7.29** La influencia del sistema de labranza sobre el perfil de temperatura de un campo de trigo en North Dakota. El suelo con una cubierta superficial de residuos generada por el sistema de labranza cero estaba más frío en primavera y en verano, hasta una profundidad de al menos 70 cm, que el suelo no protegido del sistema de aradura convencional. A comienzos de mayo, la diferencia cerca de la superficie era de más de 3°C. [Datos tomados de Merrill, et al. (1996)]

la temperatura del suelo. Durante mayo y julio las temperaturas de suelo, hasta en profundidades tan grandes como 70 cm, fueron siempre menores en el sistema de labranza cero, que deja todos los residuos del cultivo en la superficie formando una cubierta..

**PROBLEMAS EN CLIMAS FRÍOS.** En los climas fríos, mientras la cubierta de residuos controla en gran medida la erosión (ver Sección 17.6), algunas prácticas de cubrimiento producen disminuciones de la temperatura del suelo que inciden negativamente en la producción de cultivos como el maíz, tal como sucede en Canadá y en el norte de Estados Unidos. Las temperaturas de mayo y principios de junio resultantes de estas prácticas son más bajas e inhiben la germinación, el desarrollo de las plántulas y, frecuentemente, los rendimientos del maíz. El efecto más evidente de la cubierta de residuos es la disminución de la temperatura máxima del mediodía, siendo mucho menor el que produce en la temperatura mínima que se alcanza a la noche. Este efecto está bien ilustrado por los datos de la Figura 7.30, que también incluye una forma innovadora de mitigar este problema en el sistema de labranza cero, que consiste en empujar los residuos al costado de la línea de siembra, para formar una banda limpia angosta. Otra forma de resolver este problema es formando camellones en el suelo, que permiten drenar el agua de los mismos, para plantar en la parte alta mejor aireada y más caliente del camellón (o en el costado sur – ver Sección 7.10).



**FIGURA 7.30** Efectos de la labranza en los cambios de temperatura, hora por hora, cerca de la superficie de un Alfisol frío del norte de British Columbia. El suelo había sido manejado con labranza cero (NT) o labranza convencional (CT) (superficie limpia, sin residuos) para producir cebada durante los 14 años previos. En el suelo labrado limpio las temperaturas alcanzaban un pico, al promediar la tarde, que era 4 °C más alto que el del suelo no labrado cubierto con residuos. Una modificación del sistema de labranza cero (MNT), que empujaba los residuos al costado de una banda angosta (7,5 cm de ancho) coincidente con la línea de siembra, eliminaba gran parte del problema de disminución de temperatura, mientras mantenía la mayor parte de la superficie con la cubierta que conserva el suelo y el agua. Observe los cambios diarios de temperatura y la tendencia general de calentamiento durante los seis días que se muestran [Tomado de Arshad and Azooz (1996)]

**VENTAJAS EN CLIMAS CÁLIDOS.** En las regiones cálidas no hay problemas por el retraso de la plantación. En realidad, una cubierta produce cerca de la superficie temperaturas estivales más bajas, que pueden reducir el estrés de las raíces debido al calor. Las cubiertas de residuos de plantas también conservan la humedad del suelo al disminuir la evaporación. La capa superficial de suelo resultante, más fría y húmeda, es una característica importante de los sistemas de labranza cero que permite que las raíces proliferen en esta zona, donde las condiciones de nutrición y aireación son óptimas.

### *Cubiertas de Plástico*

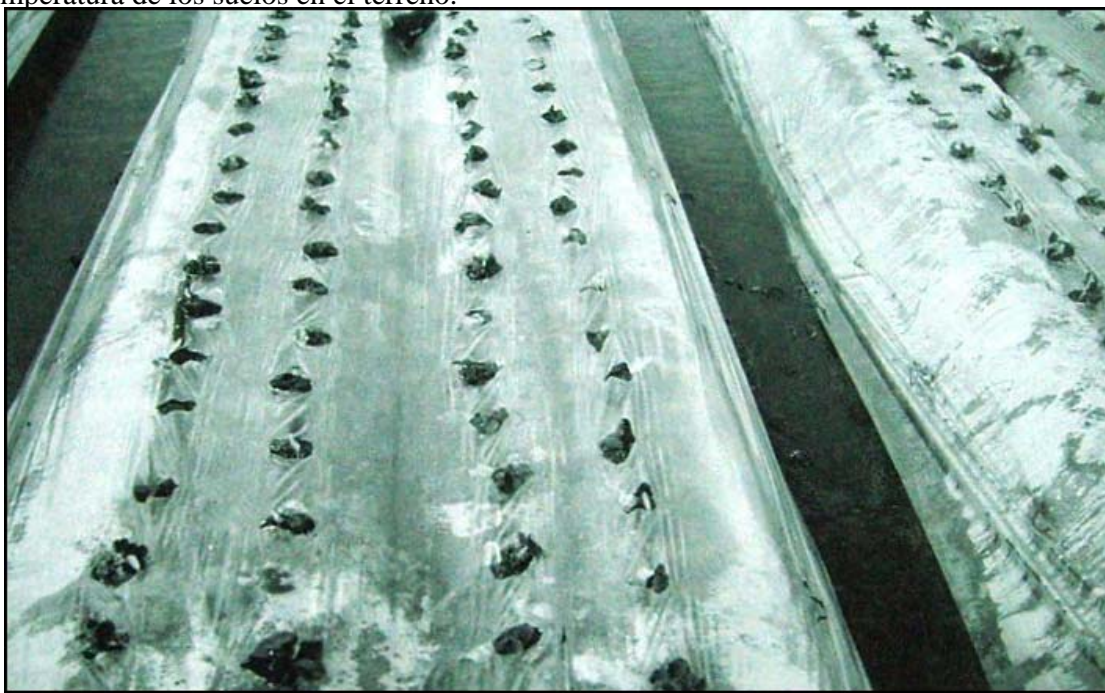
Una de las causas de la popularidad del uso de cubiertas plásticas en los jardines y cultivos intensivos de alto valor, es su efecto en la temperatura del suelo. En contraposición a las cubiertas orgánicas, las cubiertas plásticas generalmente aumentan la temperatura, siendo el plástico transparente más efectivo para calentar que el plástico negro. En las regiones templadas, se puede usar este efecto para extender el período de crecimiento, o para apurar la producción y aprovechar los precios más altos que ofrece el mercado al comienzo de temporada. La Figura 7.31 muestra el uso de una cubierta plástica en la producción invernal de frutillas en el sur de California.

En los climas más cálidos, durante los meses de verano el calentamiento del suelo por el uso de cubiertas plásticas puede ser muy perjudicial, por que inhibe el crecimiento radicular en las capas más altas del suelo y, algunas veces, disminuye mucho los rendimientos del cultivo (por ejemplo, ver la Tabla 7.7). Es obvio que, en algunas circunstancias, los efectos ventajosos de control de malezas y conservación de la humedad que producen las cubiertas plásticas, pueden ser superados por los efectos adversos del calentamiento excesivo.

### *Control de Humedad*

Otro medio de ejercer cierto control sobre la temperatura del suelo es mediante el control de la humedad del suelo. En las regiones templadas, los suelos mal drenados que están mojados en la primavera tienen temperaturas 3 a 6 °C más bajas que los suelos semejantes pero bien drenados. Esta disminución de temperatura sólo se puede remediar eliminando el exceso de agua. El agua se puede eliminar instalando sistemas de drenaje por zanjas o tubos subterráneos (ver Sección 6.9). Donde esto no es posible, se pueden usar los sistemas de labranza en camellones a los que nos referimos anteriormente.

Como en el caso del aire del suelo, el control que ejerce el agua del suelo en la temperatura es evidente en todas partes. El contenido de agua siempre es importante cuando hay un problema que afecta a la captación de energía solar, a la pérdida de energía hacia la atmósfera o al movimiento de calor dentro del suelo. El control del agua parece ser una clave para aquello que posibilita alguna modificación práctica de la temperatura de los suelos en el terreno.



**FIGURA 7.31** Estas frutillas de producción invernal del sur de California llegarán al mercado cuando los precios todavía son altos, gracias al efecto que produce la cubierta plástica transparente en la temperatura del suelo. (Foto cortesía de R. Weil)

**TABLA 7.7** Temperatura del Suelo y Rendimiento de Tomate con Cubierta de Paja o de Plástico Negro

*Los datos son promedios de dos años de producción de tomate en un Ultisol arenoso franco próximo a Griffin, Georgia. La paja evitó que el suelo superficial alcanzara temperaturas perjudicialmente altas, además incrementó la infiltración del agua de lluvia y redujo la compactación del suelo. El riego por goteo diario suministró agua suficiente, pero no pudo solucionar los problemas de temperatura producidos por la cubierta de plástico negro.*

	Sin riego		Con riego diario	
	Cubierta de paja	Cubierta plástica	Cubierta de paja	Cubierta plástica
Temperatura media del suelo, °C <sup>a</sup>	24	37	24	35
Rendimiento de tomate, Mg / ha	68	30	70	24

<sup>a</sup> Temperatura de suelo medida a 5 cm por debajo de la superficie; promedio de las semanas 2<sup>a</sup> a 10<sup>a</sup> del período de crecimiento. Datos calculados a partir de Tindall, et al. (1991)

## 7.12 CONCLUSIÓN

La aireación y la temperatura del suelo afectan decisivamente la calidad de los suelos como habitats para las plantas y otros organismos. La mayoría de las plantas tiene requerimientos precisos de oxígeno del suelo, y también una tolerancia limitada al dióxido de carbono, metano y otros gases que se encuentran en los suelos mal aireados. También algunos microbios, tales como los nitrificadores y los descomponedores, son afectados adversamente por los niveles bajos de oxígeno del suelo.

Los suelos con regímenes de humedad excesiva tienen una morfología y una química particulares y sustentan comunidades de plantas igualmente exclusivas. Tales suelos hídricos son característicos de las tierras anegadas y ayudan a que estos ecosistemas desarrollen innumerables funciones de gran utilidad.

Las plantas y también los microbios son bastante sensibles a las diferencias de temperatura del suelo, particularmente en los climas templados, donde las bajas temperaturas pueden limitar procesos biológicos esenciales. La temperatura del suelo también es importante en el uso de los suelos para construcción, en especial en los climas más fríos. La acción del congelamiento, que puede sacar del suelo plantas perennes como la alfalfa, puede hacer algo similar con los cimientos de edificios, postes de cercas, veredas pavimentadas y rutas.

El agua del suelo tiene una influencia preponderante tanto en la aireación como en la temperatura del suelo. El agua compite con el aire para ocupar los poros del suelo e interfiere con la difusión de gases hacia adentro y hacia afuera del suelo. El agua también se resiste a los cambios de temperatura del suelo, en virtud de su alto calor específico y de su alto requerimiento energético para evaporar.

## PREGUNTAS DE ESTUDIO

- Entre los gases involucrados en la aireación del suelo ¿cuáles son los dos más importantes y cómo cambian sus cantidades relativas a medida que uno toma muestras a mayor profundidad en un perfil?
- ¿Qué es un tejido de aerénquima y de qué modo influye en las relaciones planta – suelo?
- Escriba dos reacciones que esperaría que se produzcan cuando el potencial redox de un suelo, de pH 6, es próximo a cero. ¿Cómo afectaría a estas reacciones la presencia de una gran cantidad de nitratos?
- Algunas veces se dice que, en los ambientes anaeróbicos, los organismos usarán el oxígeno combinado en el nitrato o sulfato en vez del oxígeno del O<sub>2</sub>. ¿Por qué esta afirmación es incorrecta? ¿Qué es lo que realmente ocurre cuando los organismos reducen sulfato o nitrato?
- Si un suelo forestal aluvial permaneciera inundado durante 10 días y usted tomara muestras de los gases desprendidos del suelo mojado, ¿qué gases esperaría encontrar (otros, aparte del oxígeno y el dióxido de carbono)? ¿En qué orden aparecerían? Explique.
- Explique porqué es necesario que el tiempo sea cálido durante los períodos de saturación para que se forme un suelo hídrico.
- Si usted estuviera en el terreno, tratando de delinear lo que se llama el límite más seco de un área de tierra anegada; ¿cuáles son las tres propiedades de suelo y otros tres indicadores que podría buscar?
- Para cada uno de los siguientes gases, escriba una oración que explique su relación con las condiciones de tierra anegada: *etileno, metano, óxido nitroso y sulfuro de hidrógeno*.
- ¿Cuáles son los tres componentes principales que definen una tierra anegada?
- Analice cuatro procesos vegetales que son influenciados por la temperatura del suelo.



11. Explique porqué un incendio de matorrales podría provocar posteriores deslizamientos de barro, como ocurre con frecuencia en California.
12. Si, a fin de ahorrar costos de calefacción y refrigeración, estuviese por construir una casa debajo de la superficie, ¿compactaría firmemente el suelo alrededor de la casa? Explique su respuesta.
13. Si usted midiera una temperatura máxima diaria del aire de 28 °C a la 1 PM, ¿qué temperatura máxima diaria del suelo, a 15 cm de profundidad, podría esperar? ¿Aproximadamente a qué hora del día se produciría el máximo de temperatura a esa profundidad? Explique.
14. Con relación a la temperatura del suelo, explique porqué la labranza conservacionista ha sido más popular en Missouri que en Minnessota.

## **REFERENCIAS**