El suelo en la agricultura y el medio ambiente (III)

FERTILIDAD DEL SUELO: DISPONIBILIDAD Y PERDIDAS DE NUTRIENTES

Aldizkari honen 2 zenbaki lehenago hasiera eman zitzaion "Lurra Nekazaritzan eta Ingurugiroan" izeneko lan sailaren jarraipen gisa, hirugarren lan honetan egileak lurraren emankortasunari buruzko azterketa bat egiten du, eta zehazkiago lurrean erabilgarri dauden nutriente eta galdu egiten direnei buruzkoa.

IÑAKI CERRAJERIA

El paso de agua desde la solución acuosa del suelo al interior de la planta es debido principalmente a dos tipos de procesos:

- La succión o vacío que efectúan las raíces, como consecuencia de la pérdida de vapor de agua por transpiración en las hojas

- El fenómeno conocido como ósmosis, que se deriva de la tendencia natural a igualarse las concentraciones de dos soluciones de sales que se hallan separadas por una membrana semiper-meable (figura 1), como la de las raíces de las plantas.

Salinidad

En condiciones normales, la concentración de sales en la solución acuosa del suelo es inferior a la de la savia; pero si se eleva excesivamente la cantidad de sales disueltas en la solución acuosa, el agua tenderá a salir por ósmosis del interior de la planta hacia el exterior. Se producirán unas condiciones de sequía debidas a un exceso de sales disueltas o salinidad, que pueden llegar a provocar la deshidratación y la muerte de la planta.

La cantidad de sales solubles de un suelo natural viene determinada por el balance hídrico de la zona. Los suelos salinos son propios de regiones áridas y semiáridas, en que las pérdidas de agua por evapotranspiración son superiores a la pluviometría (figura 2), y se produce de forma natural una acumulación de sales solubles en el suelo, o salinidad natural.

Por el contrario, en zonas húmedas la elevada pluviosidad favorece el lavado por arrastre de las sales del suelo hacia capas más profundas, por lo que no son habituales los suelos de naturaleza salina. La salinidad inducida en estos suelos por el empleo excesivo de fertilizantes orgánicos y minerales o por el riego con aguas salinas suele ser una de las causas más frecuentes que reducen la producción en cultivos de invernadero, y se corrige lavando el suelo con agua.

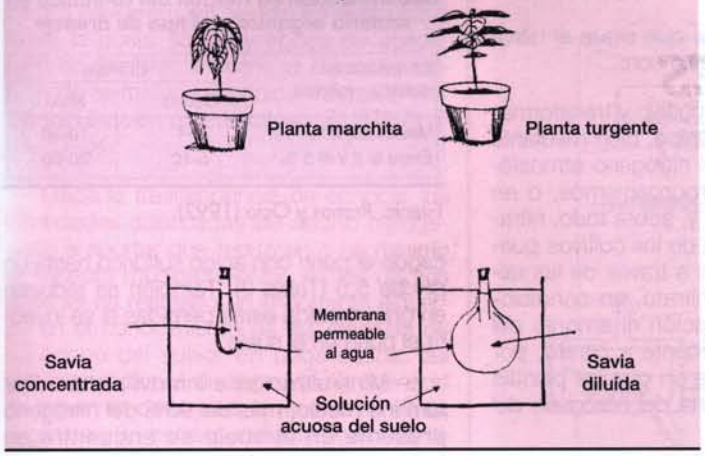
La cantidad de sales solubles del suelo se mide por medio de la conductividad eléctrica, o capacidad del agua para transportar la corriente eléctrica. El agua destilada y de lluvia, que apenas tienen sales disueltas, no conducen la corriente eléctrica; para que lo hagan, es necesario que se hallen presentes sustancias como las sales minerales que, al disolverse, se separan en dos iones con carga eléctrica opuesta. Cuanto más elevada sea la concentración de sales solubles en el suelo, mayor será la conductividad eléctrica de la solución acuosa resultante de extraer dichas sales con agua destilada.

Reserva de nutrientes

Excepto en las citadas condiciones adversas de salinidad, la concentración de sales disueltas en la solución acuosa del suelo suele ser baja, por lo que ha de existir algún tipo de reserva que vaya reponiendo los nutrientes disueltos a medida que su concentración disminuye, como consecuencia de la absorción por la planta. Sólo en los sistemas hidropónicos (es decir, con un sustrato inerte en lugar de suelo) se cultivan plantas en ausencia de una reserva de nutrientes.

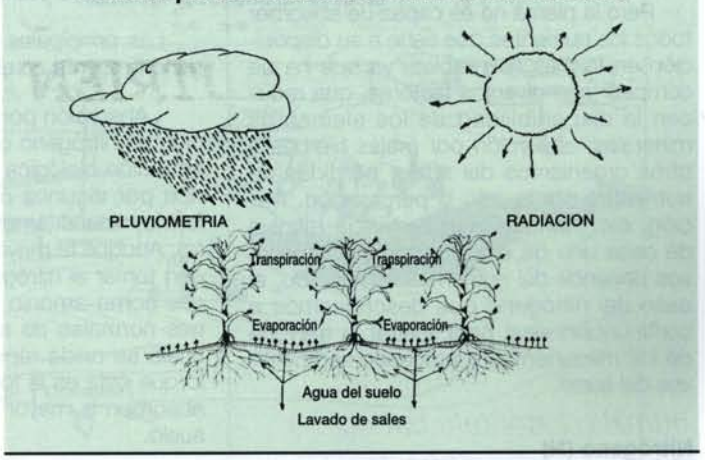
El cultivo hidropónico, aunque conceptualmente más sencillo, requiere un sistema de riego más complejo, ya que debe alimentarse continuamente a la planta en función de sus necesidades de agua y nutrientes, con una solución nutritiva equilibrada. Imaginemos la fertilización del césped de los modernos campos deportivos con zona de enraizamiento de arena pura, como el estadio de Anoeta o el Nou

FIGURA 1
Osmosis y salinidad



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2
Procesos que determinan la salinidad natural del suelo



Fuente: Elaboración propia.

Camp. Podemos aplicar un abono de liberación controlada, cuyos nutrientes de reserva se liberan gradualmente, pero de forma incontrolada, a medida que los microorganismos descomponen el abono; la otra opción es aplicar el fertilizante disuelto en el agua de riego por fertirrigación, como se alimenta a un bebé por medio de un biberón. Pero cualquier alteración que, por descuido o error, se produzca en dicha solución nutritiva (cambio de concentración o de acidez, contaminación, etc), se transmitirá inmediatamente a la planta, ya que, al no disponer de reserva, el medio de cultivo no se encuentra amortiguado; además, las pérdidas de nutrientes por lavado serán mayores en la arena que en un suelo amortiguado.

La figura 3 describe las proporciones en que se encuentran en el suelo las diferentes formas de nutrientes asimilables y de reserva, así como los procesos a través de los cuales están relacionadas. Los principales componentes de dicha reserva de nutrientes son los iones del Complejo de Cambio, que se encuentran en formas inmediatamente intercambiables con la solución acuosa y son, por tanto, fácilmente asimilables.

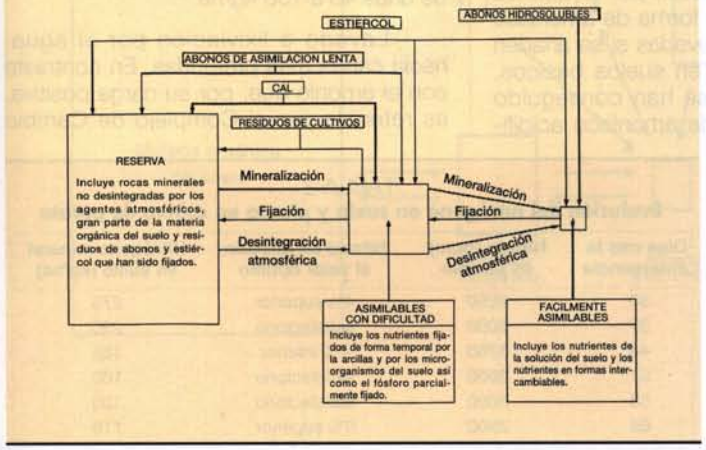
Estas formas de reserva son las que dan al suelo su poder amortiguador; igual que un trozo de hielo al fundirse amortigua el calentamiento de una bebida, actuando como una reserva de frío, el poder tampón de la arcilla y el humus amortiguan los cambios de acidez y concentración de nutrientes y contaminantes en la solución acuosa del suelo.

El poder tampón del suelo se manifiesta siempre que existen formas de reserva en cantidades superiores a las formas activas. Como se observa en el ejemplo de la figura 4, el nivel de agua en la rama lateral se encuentra amortiguado por la reserva de líquido, ya que al extraer agua de la rama estrecha la reserva del depósito actúa reponiendo el nivel de líquido a un valor prácticamente idéntico al inicial. Si se reduce el volumen de reserva disminuye el poder de amortiguación, ya que el descenso del nivel de líquido para una misma cantidad de agua extraída es mayor.

Algunos nutrientes se encuentran bloqueados temporalmente por procesos de fijación en los microorganismos del suelo y las arcillas (caso del potasio), o como compuestos insolubles que pueden solubilizarse a medida que desciende su concentración en la solución acuosa (caso del fósforo); estas formas constituyen una reserva de nutrientes menos solubles que los anteriores (asimilables con dificultad), y se consideran disponibles a medio plazo.

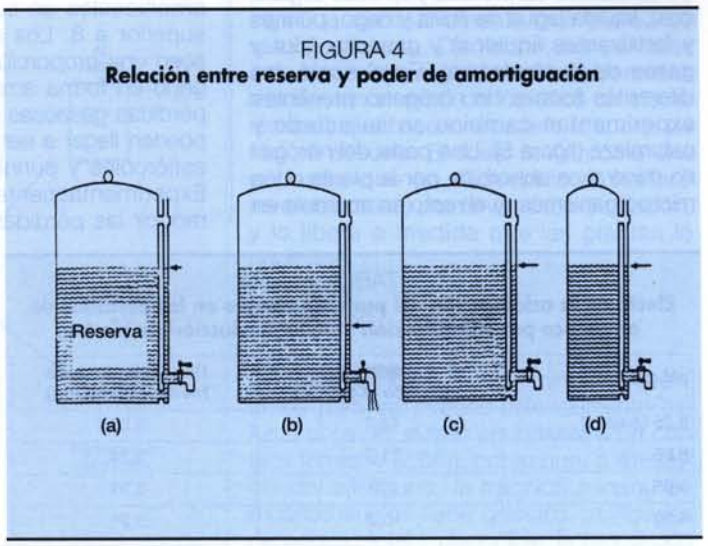
La reserva de nutrientes a largo plazo se compone de los minerales presentes en las rocas originarias del suelo y en la materia orgánica y residuos de fertilizantes, que han de ser descompuestos y transformados en iones (mineralización), por la acción de los agentes climáticos y de los microor-

FIGURA 3
Ciclo de la asimilación de los nutrientes



Fuente: K. Simpson (1991).

FIGURA 4
Relación entre reserva y poder de amortiguación



Fuente: Elaboración propia.

ganismos del suelo, para que puedan ser asimilables por la planta.

Pero la planta no es capaz de absorber todos los nutrientes que tiene a su disposición en formas asimilables, ya que ha de competir con diversos factores, que reducen la disponibilidad de los elementos minerales: absorción por malas hierbas y otros organismos del suelo, pérdidas de nutrientes por lavado o percolación, fijación, etc. Aunque la importancia relativa de cada uno de estos factores competitivos depende del nutriente considerado, el caso del nitrógeno que describiremos a continuación sirve para ilustrar la mayoría de los mecanismos o procesos competitivos del suelo.

Nitrógeno (N)

De todos los nutrientes minerales de las plantas, el nitrógeno es a la vez el más importante y el de más difícil manejo, tanto desde el punto de vista agrícola como medioambiental:

- Como componente esencial de las proteínas, es el nutriente que las plantas necesitan en mayor cantidad, por lo que las respuestas productivas de los cultivos a las aportaciones de nitrógeno suelen ser superiores a las de los restantes nutrientes.

- Las variadas formas orgánicas y minerales en que se encuentra en los suelos, plantas, aguas y aire presentan importantes riesgos potenciales, tanto para la salud humana y animal (diversas intoxicaciones por nitrato) como para el medio ambiente (eutrofización de aguas superficiales, contaminación de aguas subterráneas, lluvia ácida, cambio climático, etc).

El suelo agrícola recibe aportes externos y sufre pérdidas de nitrógeno por distintas vías y en muy variadas formas: sólida (fertilizantes minerales y abonos orgánicos), líquida (agua de lluvia y riego, purines y fertilizantes líquidos) y gaseosa (aire y gases de la atmósfera). En el suelo, las diferentes formas de nitrógeno presentes experimentan cambios en su estado y naturaleza (figura 5). Una parte del nitrógeno mineral es absorbida por la planta o los microorganismos, y el resto se acumula en el suelo o se pierde, bien en forma gaseosa a la atmósfera o por lavado como nitrato a las aguas subterráneas (figura 6).

Las principales vías que sigue el nitrógeno presente en el suelo son:

- Absorción por el cultivo y transformación en nitrógeno orgánico, bien mediante la fijación biológica del nitrógeno atmosférico por algunos microorganismos, o en forma mineral (amonio y, sobre todo, nitrato). Aunque la mayoría de los cultivos pueden tomar el nitrógeno a través de las raíces como amonio o nitrato, en condiciones normales de aireación el amonio del suelo se oxida rápidamente a nitrato, por lo que ésta es la forma en que las plantas absorben la mayor parte del nitrógeno del suelo.

- Pérdidas en forma gaseosa por desnitrificación o volatilización. La desnitrificación consiste en la transformación del nitrato en nitrógeno gaseoso u óxidos de nitrógeno, que pasan a la atmósfera (figura 7). Esta conversión se produce por la acción de unas bacterias que, en condiciones de escasa aireación, son capaces de tomar del nitrato el oxígeno que necesitan para respirar y alimentarse de la materia orgánica que descomponen. Por esta razón, las pérdidas por desnitrificación dependen de las condiciones de drenaje del suelo y de su contenido en materia orgánica (Tabla 1).

La volatilización del nitrógeno se produce en suelos básicos, en los que el nitrógeno presente en forma amoniacal (NH_4^+) reacciona con los OH^- del suelo, transformándose en gas amoníaco NH_3, que es volátil y pasa a la atmósfera:

$$NH_4^+ + OH^- \rightarrow NH_3 \uparrow + H_2O$$

Estas pérdidas suelen ser importantes cuando se abona con urea o fertilizantes amoniacales en suelos alcalinos de pH superior a 8. Los abonos orgánicos poseen una proporción importante del nitrógeno en forma amoniacal, por lo que las pérdidas gaseosas en forma de amoníaco pueden llegar a ser elevadas si se añaden estiércoles y purines en suelos básicos. Experimentalmente, se han conseguido reducir las pérdidas de amoníaco acidificando el purín con ácido sulfúrico hasta un pH de 5,5 (Tabla 2). También se reducen en gran medida estas pérdidas si se inyecta el purín en el suelo.

TABLA 1
Pérdidas de nitrógeno (%) por desnitrificación en función del contenido en materia orgánica y el tipo de drenaje

Contenido en materia orgánica	Drenaje	
	Bueno	Malo
Menos del 2 %	2-4	10-30
Entre el 2 y el 5 %	5-10	20-50

Fuente: Ramos y Ocio (1992).

- Mineralización e inmovilización. Por término medio, más del 90% del nitrógeno presente en el suelo se encuentra en forma orgánica, como una enorme reserva muy estable. A pesar de su estabilidad, pequeños cambios en el contenido en N orgánico del suelo pueden suponer la liberación de cantidades muy elevadas de N mineral. En los 25 cm superiores de un suelo con un contenido medio de N del 0,20%, habrá unos 5000 kg/ha de N, lo que supone una cantidad muy superior a las necesidades de las plantas.

A la gran reserva de nitrógeno presente en la materia orgánica del suelo se añade la elevada población microbiana capaz de descomponer dicha materia orgánica, cuyo peso en una hectárea de terreno ha sido estimado equivalente al de cien ovejas. Se comprende así la dimensión que pueden adquirir tanto los procesos de mineralización o descomposición microbiana de la materia orgánica, por los que el nitrógeno orgánico se transforma en mineral, como el inverso de inmovilización, por el cual el nitrógeno mineral se incorpora en forma orgánica a los tejidos de los microorganismos del suelo. La extensión de la mineralización depende de la temperatura, humedad, aireación, contenido de materia orgánica y relación C/N, siendo por término medio en climas húmedos de 1-2% del nitrógeno total, lo que supone una producción anual de nitrógeno mineral de unos 40 a 150 kg/ha.

- Lavado o lixiviación por el agua, hacia capas más profundas. En contraste con el amonio que, por su carga positiva, es retenido por el Complejo de Cambio

TABLA 2
Efecto de la acidificación del purín de vacuno en las pérdidas de amoníaco por volatilización y en la producción de hierba

pH del purín	Pérdidas de amoníaco (Kg N/ha)	Rendimiento de la hierba (Tm MS/ha)
8,25 (control)	42,7	3,03
6,65	21,7	3,34
5,65	2,2	3,91
4,60	-0,2	3,21

Fuente: Pain (1989).

TABLA 3
Evolución del nitrógeno en suelo y planta en cultivo de patata

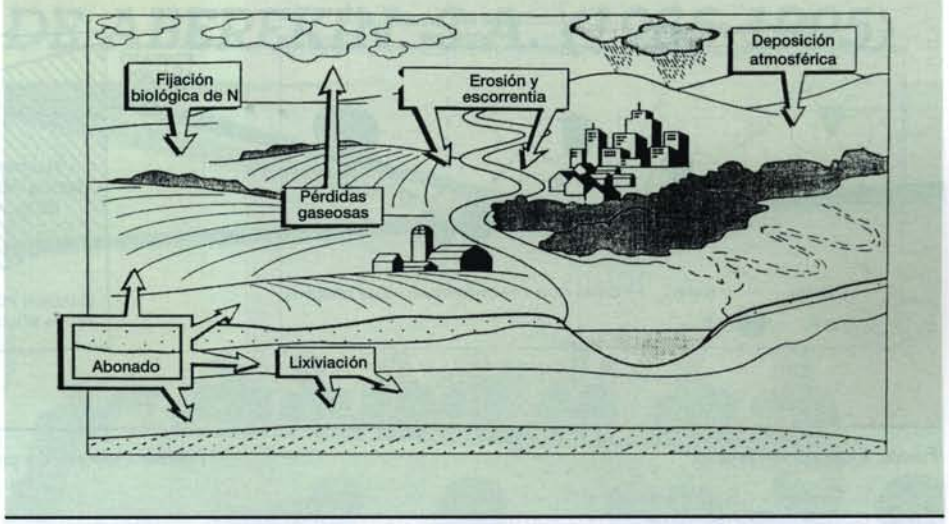
Días tras la emergencia	Nitrato (ppm) en pecíolo	Nitrato en relación al valor óptimo	Nitrógeno mineral en suelo (kg/ha)
30	6250	4% superior	275
37	5000	satisfactorio	230
44	3750	4% inferior	185
51	3500	satisfactorio	160
58	3000	satisfactorio	130
65	2500	9% superior	110

Fuente: Elaboración propia.

del suelo, el nitrato resulta fácilmente lavable. La proporción en que se pierde dependerá de la cantidad de agua y de nitrato presente, influyendo en esta última tanto la dosis, forma y época de aplicación de fertilizante como la descomposición de la materia orgánica del suelo (ver Contaminación agraria difusa, SUSTRAI nº 25, 31-34).

Dada la trascendencia de conocer las cantidades adecuadas de abono nitrogenado a aportar que reduzcan a un mínimo el impacto medioambiental, en los últimos años se ha realizado un importante esfuerzo en el conocimiento de las reservas de nitrógeno del suelo. En unos casos, las recomendaciones de abonado nitrogenado se basan en determinar la reserva en forma orgánica y su correspondiente potencial de mineralización; pero normalmente se mide la cantidad de nitrógeno mineral disponible para la planta en el suelo durante el período de cultivo. Con ello, además de optimizar los rendimientos, se evita la acumulación de cantidades tóxicas de nitrato en las plantas y la contaminación de las aguas subterráneas (Tabla 3).

FIGURA 5
Ciclo del nitrógeno en el suelo



Fuente: Pierzynski y col., 1994.

Fósforo (P)

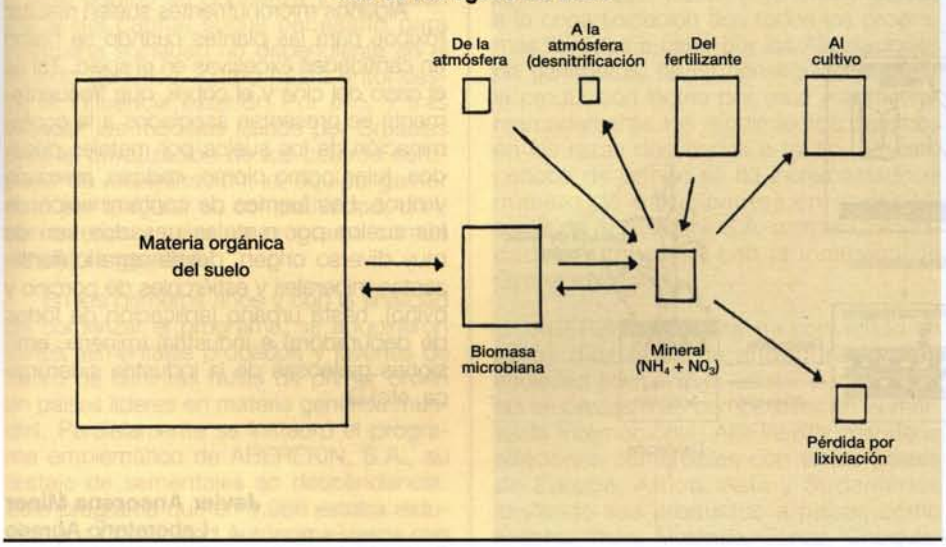
A diferencia del nitrógeno, este nutriente no forma compuestos gaseosos, encontrándose la mayor parte del fósforo del suelo en forma mineral en la fase sólida y siendo muy baja (inferior a 1 mg/l) su concentración en la solución acuosa. Esto hace que la movilidad del fosfato a través del suelo sea muy reducida, y quede acumulado en la capa superior de unos pocos centímetros. Por tanto, en situaciones normales las pérdidas de fósforo son muy pequeñas (inferiores a 1 kg anual por hectárea) y se limitan al arrastre superficial de formas sólidas o disueltas por fenómenos de erosión y escorrentía, quedando casi todo el fósforo añadido al suelo como reserva en la fase sólida.

El fósforo disuelto en la solución acuosa del suelo coexiste con otras formas de diferentes grados de disponibilidad, que pueden interconvertirse a través del fósforo en solución. En relación al comportamiento del fósforo en el suelo, merecen destacarse dos características propias que le diferencian de los restantes nutrientes: la fijación y el efecto residual.

Fijación. Del fósforo añadido al suelo con el fertilizante, el cultivo sólo extrae entre un 5 y un 30% durante el primer año. Al añadir fósforo en forma disuelta al suelo, su concentración en la fase acuosa aumenta bruscamente al principio; posteriormente se manifiesta el poder de amortiguación del suelo, que hace decrecer la cantidad de P disponible, como consecuencia de procesos de fijación con otros componentes del suelo, particularmente a valores extremos de pH (figura 8). Este es el motivo por el que, en suelos muy pobres en fósforo, no se consigue alcanzar los máximos rendimientos tras una primera aplicación anual de abono fosfórico, siendo necesario elevar hasta un determinado nivel las reservas de dicho elemento en forma absorbida y precipitada. Es decir, el suelo se comporta como un pozo que es necesario llenar de fósforo, hasta que las cantidades añadidas rebosen y se encuentren a disposición de la planta.

Efecto residual. El que el fósforo añadido al suelo pase a formas insolubles no significa necesariamente que pierda su valor fertilizante. De hecho, las parcelas que han sido regularmente abonadas manifiestan al cabo de los años un efecto residual, que hace innecesario el aporte de fósforo al suelo. El suelo actúa como una esponja, que ha absorbido el fósforo reversiblemente por fenómenos de fijación, y lo libera a medida que las plantas lo necesitan.

FIGURA 6
Vías de Nitrógeno del suelo

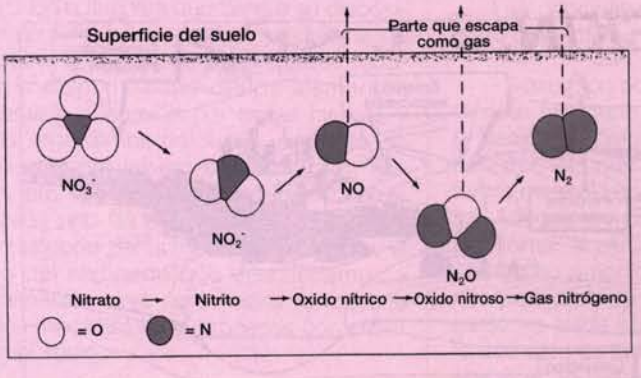


Fuente: Elaboración propia.

Potasio (K)

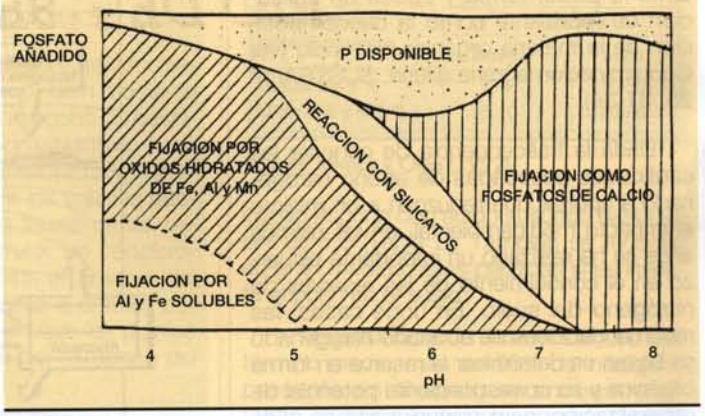
De todos los nutrientes minerales esenciales para las plantas este elemento es, junto al calcio, el más abundante en la corteza terrestre (2,6%), por lo que, a diferencia del nitrógeno, la fracción mineral de muchos suelos tiene grandes cantidades de potasio total y disponible; la proporción de este último depende de la naturaleza y grado de mineralización del suelo.

FIGURA 7
Desnitrificación y pérdidas de Nitrógeno en forma de gases



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8
Distribución del fósforo del suelo en función del pH



Fuente: Elaboración propia.

El potasio, como el amonio, forma sales muy solubles y es mucho más móvil que el fósforo, aunque a causa de su carga eléctrica positiva es retenido por el Complejo de Cambio del suelo. La capacidad de un suelo para suministrar potasio a la solución acuosa durante el período de cultivo depende de la cantidad almacenada como reserva en forma intercambiable. A largo plazo, es importante la capacidad del suelo para reponer las cantidades de potasio suministradas, desde formas de reserva no intercambiables fijadas en los minerales de arcilla (figura 9).

Calcio, magnesio, azufre y micronutrientes

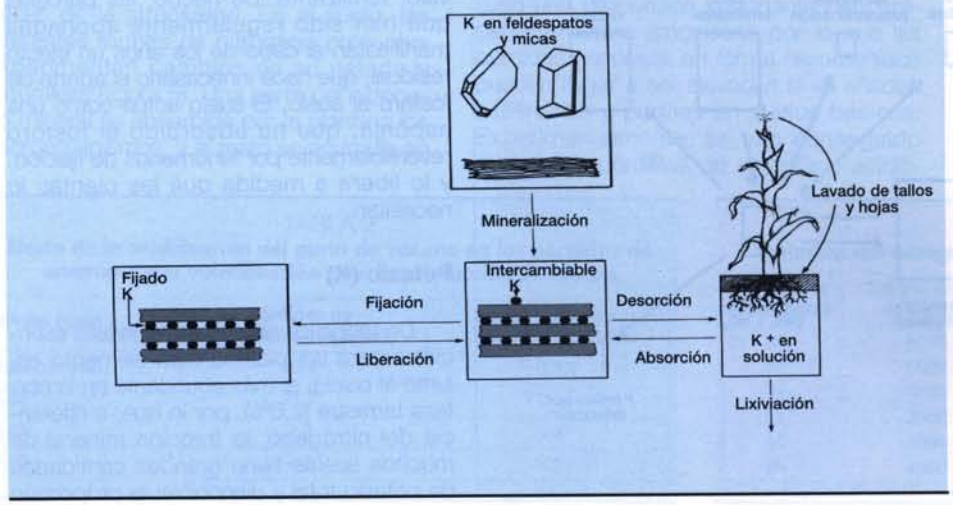
Normalmente, la concentración de calcio en el suelo está relacionada con el pH del mismo, siendo muy elevada en suelos calizos y baja en los suelos ácidos, aunque rara vez llega a ser deficiente. También la cantidad de magnesio suele ser baja en los suelos ácidos, y se corrige aplicando como enmienda dolomita, en lugar de cal. Las deficiencias de magnesio se presentan principalmente a consecuencia del conocido antagonismo con el potasio, cuando las concentraciones de este elemento son excesivas. La carencia de magnesio o hipomagnesemia en el ganado vacuno ocurre tras la aplicación de cantidades excesivas de purines en suelos de pradera. También puede presentarse deficiencia de magnesio en suelos de invernadero fuertemente abonados con fertilizantes potásicos, si la relación de potasio a magnesio es superior a 4.

El azufre es un elemento que las plantas absorben en cantidades relativamente importantes. En los últimos años, se han ido presentando cada vez con más frecuencia síntomas de deficiencia de azufre en cultivos sobre suelos arenosos y alcalinos pobres en materia orgánica. La razón radica en la progresiva reducción del aporte de azufre con los modernos superfosfatos, y en la disminución de la contaminación atmosférica, que también aporta cantidades importantes de este elemento a los suelos.

La mayoría de los suelos contienen cantidades suficientes de los llamados elementos traza, oligoelementos o micronutrientes, que las plantas necesitan en muy pequeñas cantidades: hierro, manganeso, boro, cobre, zinc, molibdeno y cloro. Las carencias de estos elementos se presentan más porque la concentración de las formas solubles o asimilables es baja en unas condiciones de acidez inadecuadas, que por hallarse en pequeñas cantidades en el suelo.

Algunos micronutrientes suelen resultar tóxicos para las plantas cuando se hallan en cantidades excesivas en el suelo. Tal es el caso del cinc y el cobre, que frecuentemente se presentan asociados a la contaminación de los suelos por metales pesados, tales como plomo, cadmio, mercurio y otros. Las fuentes de contaminación de los suelos por metales pesados son de muy diverso origen, desde agrario (fertilizantes minerales y estiércoles de porcino y ovino), hasta urbano (aplicación de lodos de depuradora) e industrial (minería, emisiones gaseosas de la industria siderúrgica, etc).❑

FIGURA 9
Formas de potasio en el suelo



Fuente: Foth y Ellis (1988).

Javier Ansorena Miner
Laboratorio Agrario
Dpto. de Agricultura y Espacios Naturales
Diputación Foral de Gipuzkoa