

Minerales utilizados en agricultura

Magdalena Rodas González y José Fernández Barrenechea

Universidad Complutense de Madrid

INTRODUCCIÓN

Las plantas obtienen sus nutrientes tanto del suelo como del aire (CO_2 , N, etc). Los nutrientes del suelo los incorporan a través del agua, debido a que las plantas en crecimiento usan más agua que cualquier otra sustancia. Los compuestos inorgánicos (minerales) constituyen $< 5\%$ en peso de la planta, pero la mayoría de los suelos son deficitarios en alguno de estos compuestos esenciales para un crecimiento adecuado, por lo que es necesario el uso de fertilizantes. En la naturaleza, habitualmente se mantiene el balance entre consumo y reposición de los elementos solubles en el suelo. Este equilibrio en cultivos comerciales se rompe al exigirse un ritmo de producción más acelerado por lo cual desde hace siglos el hombre ha utilizado residuos orgánicos vegetales y animales para subsanar ese déficit.

Hasta el año 1900, la creciente demanda de alimentos vegetales se subsanaba con el desarrollo de nuevas áreas de cultivo, pero hoy en día se tiende a buscar mayor productividad con ayuda de fertilizantes. El fuerte aumento de la población mundial ha llevado a la necesidad de producir más alimentos, lo que convierte a los fertilizantes artificiales y a los plaguicidas en una parte fundamental de las sociedades modernas. Los fosfatos, potasas, nitratos y el azufre, constituyen la base de la potente industria de fertilizantes químicos.

Los beneficios de los productos fitosanitarios (plaguicidas y fertilizantes) son muy variados: a) Los fertilizantes, por un lado, permiten el cultivo de tierras anteriormente improductivas, o bien la introducción de cultivos de mayor calidad en terrenos previamente explotados. Además, disminuyen los tiempos de barbecho, y aceleran el crecimiento de las plantas, a la vez que aumentan su tamaño; b) Los plaguicidas combaten los agentes nocivos para los vegetales, o previenen su acción, conservan y protegen los vegetales, y destruyen otros vegetales indeseables (“malas hierbas”), previniendo su crecimiento incontrolado. Así,

el uso eficaz de estas sustancias aumenta la producción. De los minerales empleados en la manufactura de plaguicidas, el más importante es la arsenopirita (FeAsS), de la cual se extrae el arsénico. Los compuestos de As se emplean en agricultura como pulverizaciones y baños para ganado, con el fin de destruir insectos y parásitos, ya que los óxidos y sales de As son venenos muy activos.

En cuanto a los fertilizantes, hay 13 nutrientes esenciales que podemos agrupar en:

- Primarios: N, P, K
- Secundarios: Ca, Mg, S
- Micronutrientes, o minerales traza: B, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, Cl

Los tres primeros suponen el 98% de las plantas vivas. El 2% restante es vital para el crecimiento. De los tres nutrientes primarios el fósforo es el más crítico, ya que sólo se puede extraer por la vía de explotación de fosfatos, fundamentalmente de fosforitas. El problema no radica tanto en la disponibilidad de este recurso a nivel mundial, sino en la desigual distribución geográfica y económica de los productores y de los usuarios. De los 150-170 Mt de roca fosfática que se explotan anualmente el 77 % proviene de USA, Rusia, China y Marruecos.

NUTRIENTES PRIMARIOS EN FERTILIZANTES:

Se les llama así porque la mayor parte de los suelos son deficitarios en estos tres elementos, por lo que constituyen la gran mayoría de los fertilizantes aplicados a los suelos.

FOSFATOS (P)

El fósforo es imprescindible para el desarrollo de los seres vivos. Es un nutriente fundamental en el crecimiento de las plantas, y sus compuestos son esenciales para las funciones energéticas de todos los seres vivos y para la formación de huesos y dientes. Los animales toman el fósforo al ingerir plantas y otros animales, pero las plantas lo toman del suelo.

El fósforo está presente, en pequeñas proporciones, en la mayoría de las rocas ígneas (0,4 % P_2O_5 en rocas ígneas intermedias) y sedimentarias (0,04 % en areniscas), así como en agua dulce y salada. No obstante, la recuperación económica se limita a aquellos depósitos donde se haya producido una concentración natural. En ocasiones, esta concentración es tal que permite la utilización del material sin apenas elaboración.

Aspectos geoquímicos y mineralógicos

a) Ciclo geoquímico del fósforo:

El fósforo es un elemento relativamente común en la corteza (0,23 %). Su distribución en la naturaleza se realiza a través de un ciclo que comienza en los depósitos ígneos primarios, especialmente en sienitas nefelínicas, carbonatitas y rocas ultramáficas alcalinas. Estas rocas pueden ser alteradas, liberando de esta forma el fósforo que pueden utilizar las plantas y los animales. Una parte de este P va a parar al mar, donde es asimilada por los organismos

marinos. Estos, al morir, caen al fondo, donde la oxidación y la acción bacteriana liberan de nuevo el fósforo. Las aguas de fondos oceánicos circulan tan lentamente que el proceso puede llevar miles de años, por lo que es fácil que el fósforo pueda acumularse en el agua y que sea incorporado a los sedimentos marinos.

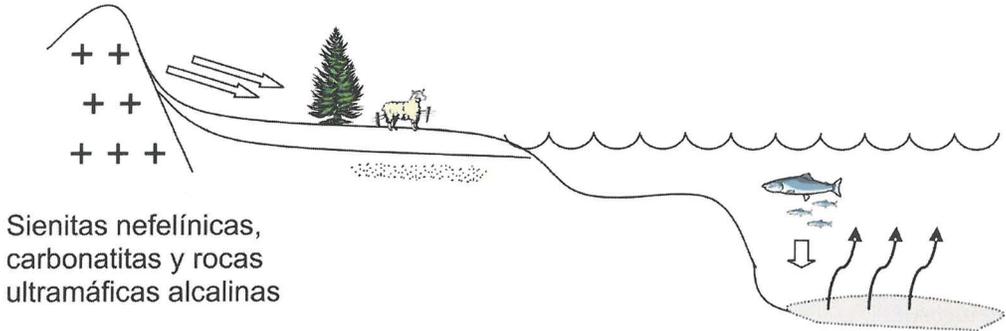


FIGURA 1. Esquema simplificado del ciclo geoquímico del fósforo en la corteza.

b) Mineralogía:

La mayoría del P se concentra en minerales del grupo del apatito $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$. La estructura del apatito está constituida por grupos $(\text{PO}_4)^{3-}$ enlazados al Ca^{2+} , de manera que 2/5 del Ca^{2+} de encuentran coordinados por 6 oxígenos, formando un antiprisma trigonal, y los restantes 3/5 del Ca están coordinados con 5 oxígenos y un F. Cada F⁻ (OH⁻ o Cl⁻) se encuentra en coordinación triangular con tres átomos de Ca.

Los dos tipos más frecuentes en la naturaleza son:

- 1.— El **hidroxi fluorapatito** $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$, abundante en depósitos ígneos.
- 2.— La **francolita**, o carbonato-apatito $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3, \text{OH})_3(\text{F}, \text{OH})$, típico de sedimentos marinos.

El apatito presenta habitualmente muchas sustituciones, tanto en los cationes como en los aniones. Las principales sustituciones isomórficas son:

Ca^{2+}	$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Ag}^+, \text{Mg}^{2+}, \text{Sr}^{2+}, \text{Ba}^{2+}, \text{Cd}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Zn}^{2+}, \text{Bi}^{3+}, \text{Sc}^{3+}, \text{Y}^{3+}, \text{REE}^{3+}, \text{U}^{4+}$
PO_4^{3-}	$\text{CO}_3^{2-}, \text{SO}_4^{2-}, \text{CrO}_4^{3-}, \text{CO}_3.\text{F}^{3-}, \text{CO}_3.\text{OH}^{3-}, \text{AsO}_4^{3-}, \text{VO}_4^{3-}$ y SiO_4^{4-}
F ⁻	OH ⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻ , O ²⁻

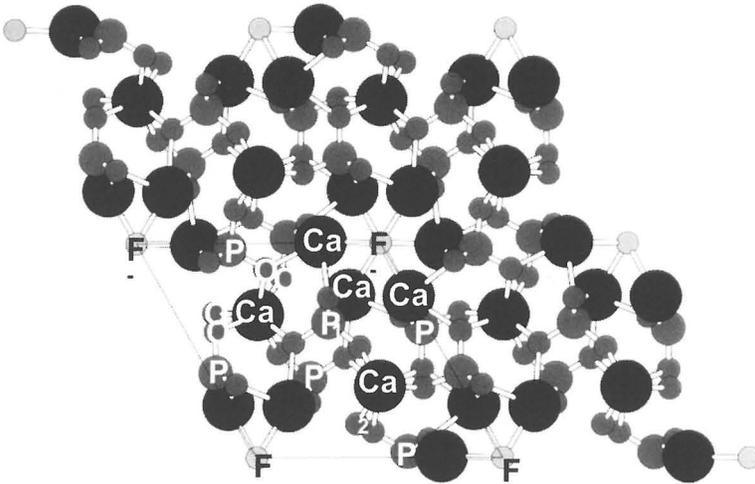


FIGURA 2. Estructura del apatito vista a lo largo del eje c , donde se aprecia claramente la simetría hexagonal.

La francolita es el principal mineral en las rocas fosfatadas sometidas a explotación. A pesar de su importancia, su composición y propiedades no son bien conocidas por dos razones:

- Se presenta como cristales submicroscópicos de composición poco homogénea.
- Su estructura, muy abierta, admite gran cantidad de sustituciones, lo que aumenta la complejidad.

Geología de los depósitos de fosfato:

Los fosfatos de interés económico se dan en dos tipos de depósito: ígneos y sedimentarios. Cerca del 85 % de la producción se extrae de depósitos sedimentarios marinos, y el resto casi por completo de rocas ígneas. Existe un tercer tipo de depósito, aunque cada vez es menos importante, que es el guano.

a) Depósitos ígneos: Aportan cerca del 20 % de la producción mundial. El apatito de origen ígneo se recupera de venas y cuerpos mineralizados de magnetita, donde aparece en pequeñas cantidades. Está asociado a rocas plutónicas alcalinas, generalmente sienitas nefelínicas, carbonatitas o complejos ultrabásicos alcalinos. Se cree que el apatito se habría concentrado por decantación dentro de la cámara magmática. Los complejos ígneos alcalinos de carbonatitas se consideraban antes como fenómenos raros y aislados, aunque actualmente se sabe de su amplia distribución por la mayoría de los continentes. Constituyen una asociación de rocas volcánicas y subvolcánicas distintiva, característica de zonas con fallas profundas en áreas de escudo y de plataforma continental. Se supone que este tipo de erupciones se origina en niveles subcorticales profundos, y que han tenido lugar desde el Precámbrico hasta la actualidad. El mayor depósito de este tipo se encuentra en el Macizo de Khibina (Península de Kola, Rusia), formado por sienitas nefelínicas. Se

trata de un plutón circular de edad Carbonífero-Pérmico inferior, que tiene unos 40 km de diámetro.

b) Depósitos sedimentarios: Estos depósitos podemos agruparlos en dos tipos: depósitos sedimentarios marinos y depósitos de guano.

- Depósitos sedimentarios marinos:

Constituyen más del 80 % de la producción mundial de fosfatos. En la mayoría de los casos el fosfato está presente como francolita, y se presenta como granos o *pellets* de tamaño variable (0,25 a 0,35 mm). Prácticamente todos los *pellets* estaban formados originalmente por aragonito, y fueron fosfatizados posteriormente en el agua de mar. Estas rocas incluyen generalmente otros materiales como cuarzo, arcilla, kerógeno, y pirita framboidal. El espesor de los depósitos puede variar desde pocos centímetros a decenas de metros, y pueden extenderse varios kilómetros lateralmente. El contenido en P_2O_5 varía desde un pequeño porcentaje hasta un 35 %.

La teoría más aceptada durante años para la formación de “fosforitas” es la llamada del “*up-welling*” (ascenso de aguas profundas cargadas en nutrientes). En esencia, la teoría considera que la fuente del P se halla en corrientes oceánicas frías y profundas, ricas en dicho elemento. Estas corrientes ascenderían a zonas fóticas más someras, de plataforma, donde se supone que el apatito precipita directamente o bien reemplaza otras fases. (Figura 4). Aunque existe controversia sobre el mecanismo preciso de formación, existe aceptación general sobre la necesidad de que se produzca movimiento de aguas marinas que aporten el fósforo.

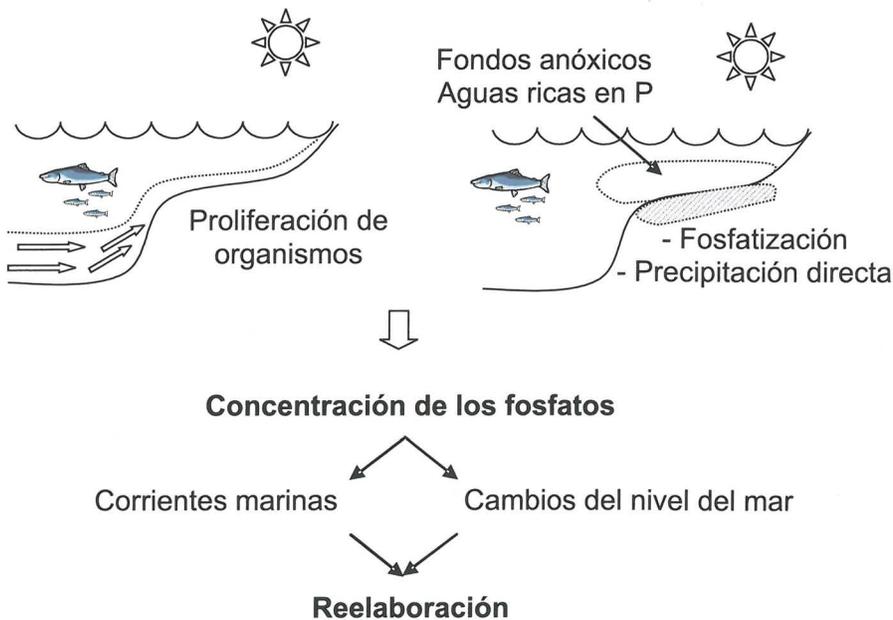


FIGURA 4. Esquema explicativo de los procesos que dan lugar a la formación de fosfatos sedimentarios marinos.

En resumen la génesis de las fosforitas estaría ligada a aguas marinas frías, saturadas en fósforo, que ascienden hasta la plataforma continental. Allí precipitan los fosfatos por acción microbiológica, en forma de barros micro-cristalinos, nódulos y costras. En algunos lugares, se producen también acumulaciones de huesos y dientes fósiles. Así mismo, es posible la percolación de soluciones fosfatadas a través del sustrato, que puede estar constituido por rocas carbonatadas, volcánicas (Figura 3), etc.



FIGURA 3. Depósitos de guano (zona blanqueada) a techo de la Formación La Portada (Plioceno marino). En la base se observan andesitas basálticas (Formación La Negra, Jurásico). Península de Mejillones (Antofagasta, Chile).

Alteración:

Los depósitos de fosforitas se han venido formando desde el Precámbrico, por lo que en muchos casos se ven afectados por esfuerzos tectónicos, fracturación, etc., lo que provoca cambios en su posición original. La mayoría de los depósitos de fosfatos son originalmente rocas en las que los pellets están cementados por calcita, dolomita, o menos frecuentemente cuarzo (chert, derivado de esqueletos de organismos marinos). La alteración superficial, con el lavado de los carbonatos que cementan, es el factor más importante en el desarrollo de depósitos económicos de fosfato. La eliminación de estos cementos carbonatados produce un material más blando, más rico en fosfato, y facilita la explotación y el tratamiento del material. La alteración superficial también produce la oxidación de las piritas dispersas y reduce la cantidad de hidrocarburos cuando están presentes, cambiando en este caso el color del depósito de negro a gris, o pardo.

Explotaciones de fosforita:

Las explotaciones de fosforita más importantes se encuentran en Marruecos y en Estados Unidos (Florida y Carolina del Norte). Generalmente se explotan capas de poca potencia (2-10 m) y gran extensión. En la mayoría de los casos el grado de consolidación de estos sedimentos es bajo, lo que permite que sean explotadas por minería de transferencia y dragas.

Hay que destacar que estas explotaciones llevan asociados frecuentemente graves problemas medioambientales, derivados por un lado del bombeo de aguas freáticas en cortas, que afectan a la formación y al infrayacente. Otro problema adicional está relacionado con la liberación de elementos radioactivos, ya que estos depósitos se asocian habitualmente con importantes concentraciones de uranio.

- Depósitos de guano:

Aportan una proporción muy pequeña de la producción mundial de fosfatos. Se forman a partir de la acumulación de excrementos de animales, principalmente de aves de gran tamaño. Los depósitos pueden ser de dos tipos:

- **En cuevas:** Por acumulación de excrementos de murciélagos. Se dan en zonas donde exista el tipo de roca adecuado (calizas y dolomías), y un clima húmedo y cálido.
- **Guano insular:** Aportan aproximadamente el 2 % de la producción mundial. Constituyen depósitos en finas costras, situados en islas poco elevadas sobre el nivel del mar. Los mayores depósitos se dan en islas más elevadas sobre dicho nivel, aunque son menos frecuentes. Se forman, al menos en parte, por la fosfatización secundaria del lecho rocoso, constituido generalmente por material coralino. Los depósitos más importantes se encuentran en la isla de Pascua (Chile), donde hay más de 200 Mt de reservas.

Procesado de rocas fosfatadas:

El fosfato se trata con ácido sulfúrico para obtener los productos comerciales:

- Superfosfato simple (SSP)
[Ca (H₂ PO₄)₂ + CaSO₄ · 2 H₂O] con 20 % de P₂O₅
- Superfosfato concentrado (TSP)
[Ca (H₂O PO₄)₂ H₂O] con 40-50 % de P₂O₅
- Fosfato Monoamónico (MAP): NH₄H₂PO₄
- Fosfato diamónico (DAP) : (NH₄)₂HPO₄.

El *grado de los fertilizantes* se especifica con tres números (N, P, K), que definen respectivamente el porcentaje de N, el de P₂O₅, y el de K₂O. Así, el superfosfato normal (0-18-0), mientras que el fosfato diamónico (18-46-0), etc. La principal fuente de P asimilable proviene de la fabricación de los llamados superfosfatos. Los fosfatos se procesan comercialmente de tres formas diferentes:

a) *Tratamiento por acidificación:*

- Con ácido sulfúrico, para producir fertilizantes: superfosfato normal, concentrado, y ácido fosfórico (este último se emplea también para producir fosfato cálcico, para alimentos de animales).
- Con ácido nítrico, para producir fertilizantes de fosfato nítrico.
- Con ácido clorhídrico (poco empleado).

b) *Tratamiento en horno eléctrico:*

El fósforo se produce en hornos eléctricos cargados con roca fosfatada calcinada, sílice y coque. Se emplea en la producción de compuestos de gran pureza (fosfatos de Na, Ca, K y amonio). Los hornos eléctricos de P operan en atmósfera reductora (el coque es el agente reductor), de forma que el P vaporizado puede ser extraído en forma de gases que no entran en contacto con el oxígeno del aire. Se rocían con agua vaporizada para enfriarlos, lo que provoca la condensación del P en gotas que sedimentan bajo el agua.

c) *Tratamiento físico sencillo:*

- Tamizado fino para emplearse como fertilizante por aplicación directa a suelos ácidos.
- Eliminación de fluoruros mediante calentamiento, para producir fosfato cálcico, como suplemento alimenticio para animales.
- Tratamiento térmico de wavellita (fosfato aluminico), con el mismo fin.
- Calentamiento de rocas alcalinas (poco utilizado).

Términos comerciales:

Phosphate rock (Roca fosfatada): Roca con $P_2O_5 > 20 \%$.

Fosforita: Depósito de origen sedimentario, y que tiene interés económico.

Grado de roca fosfatada: el contenido en fosfato cálcico se expresa, según los distintos países, por alguna de las siguientes relaciones:

Bone Phosphate of Lime (BPL): Término que se mantiene como herencia histórica, y que hace referencia a la época en que los fertilizantes fosfatados se obtenían a partir de huesos de animales.

% TPL (Trifosfato de lima)

% P_2O_5 (Pentóxido de fósforo)

% P (Poco empleado habitualmente)

La relación entre estos parámetros puede expresarse como:

$80 \% \text{ BPL} = 80 \% \text{ TPL} = 36,66 \% \text{ P}_2\text{O}_5 = 16 \% \text{ P}$

Producción:

La cantidad de fosfatos producidos al año (150 Mt) es similar a la de sal, y casi tres veces la de sulfuros. Sin embargo, el número de países productores es relativamente pe-

queño. Casi el 75 % viene de EEUU, China, Marruecos y Rusia (Figura 5). Este último país es el principal exportador, dado que los dos primeros dedican gran parte a su propio consumo.

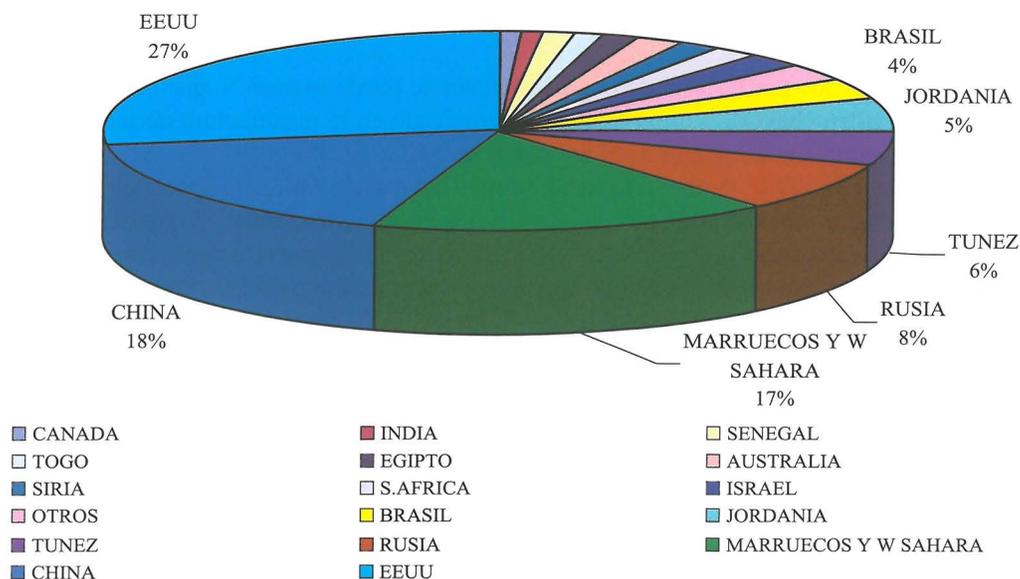


FIGURA 5. Datos de producción mundial de rocas fosfáticas para el año 2004 (fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>)

Subproductos:

- Yeso: Se produce en la manufactura de ácido fosfórico por vía húmeda, en proporción de 1,5 t de yeso por tonelada de roca tratada. El yeso no se elimina del fertilizante, de modo que el producto lleva normalmente un 12% de este mineral.
- Uranio: Cerca del 10 % de la producción de uranio deriva de plantas de tratamiento de fosfatos.
- Fluoruros: Los depósitos de fosfato son las mayores fuentes conocidas de flúor, que se recupera en el proceso de tratamiento, para emplearlo en fluoración de aguas, etc.

NITRATOS (N)

El nitrógeno es vital para la formación de proteínas y aminoácidos. Es parte integrante de la molécula de clorofila, proporcionando un valor nutritivo mayor y una producción más elevada.

Este elemento está presente en la atmósfera como N_2 , el cual en ocasiones es extraído naturalmente por ciertas plantas, como las leguminosas, pero en la mayoría de los casos es

obtenido directamente del suelo, considerándose que por debajo del 1% de N el suelo es pobre y debe suplementarse con abonos nitrogenados, que pueden ser amoniacales, nítricos o combinados. Es raro como mineral (nitratos, amonio) pero se encuentra en plantas, de donde pasa al suelo y se fija en partículas arcillosas.

Mineralogía

Existen sólo dos minerales a partir de los cuales se puede extraer N, que son **nitratina** (NaNO_3), y **nitro** (KNO_3). La mayoría del N empleado en la manufactura de fertilizantes se obtiene a partir de la fijación de N atmosférico.

Nitratina (NaNO_3): también conocida como *nitrateo de Chile*. Dada su elevada solubilidad, sólo se encuentra en grandes cantidades en regiones áridas y desérticas, como las zonas que quedan al norte de Chile y sur de Bolivia. Es isoestructural con la calcita (CaCO_3), pero mucho menos estable. Generalmente se presenta mezclado con sales de B, I, y otros elementos. La Sociedad Química y Minera de Chile controla el 100% del mercado mundial de nitrato sódico de origen mineral, aunque cada vez pierde más terreno a favor de los nitratos obtenidos por fijación de N del aire.

Nitro (KNO_3): Normalmente se presenta como eflorescencias o costras finas en zonas donde se ha producido descomposición de materia orgánica (suelos, muros, rocas, etc.). Es isoestructural con el aragonito, el polimorfo de la calcita. Aunque es mucho menos frecuente que la nitratina, se produce en España, Italia, Egipto, Arabia, India y Persia, como fuente de compuestos nitrogenados. Además de su empleo como fertilizantes, estos minerales también sirven de materia prima para la fabricación de explosivos.

Procesado actual del nitrógeno

Uno de los métodos más conocidos para la obtención de abonos nitrogenados es, el denominado método *Haber-Bosch*, que consiste en la producción de amoníaco sobre la base del nitrógeno atmosférico. Los productos finales obtenidos son sulfato de amonio (20 % de N), cloruro de amonio (21-23% de N) y fosfato de amonio (abono binario con 20% de N y 40-52% de ácido fosfórico soluble), urea, (la forma orgánica más común contiene 45% de N), nitrato de amonio sólido (33-34% N) y líquido (19-21 % N), amoníaco anhidro (82% N) y soluciones de nitrógeno (28-32 %). Los abonos nítricos tienen como ventaja que no necesitan una transformación en el suelo y son rápidamente solubilizados. Hoy el hidrógeno se sustituye por gas natural. El 99,8 % del nitrógeno consumido hoy se obtiene por el proceso Haber-Bosch (unos 120 Mt./año).

POTASAS (K)

Su función en la planta aún no se comprende exactamente (papel como regulador o catalizador), aunque es incuestionable que es un elemento indispensable para el crecimiento de los vegetales. La principal fuente de K es la silvita (KCl), un haluro isoestructural con la halita, pero que se forma únicamente en cuencas evaporíticas marinas restringidas. En estas cuencas es posible distinguir tres etapas: euxínica (generación de ambiente reductor), evaporítica, y de colmatación. El mejor ejemplo en España es el de las potasas de Suria y

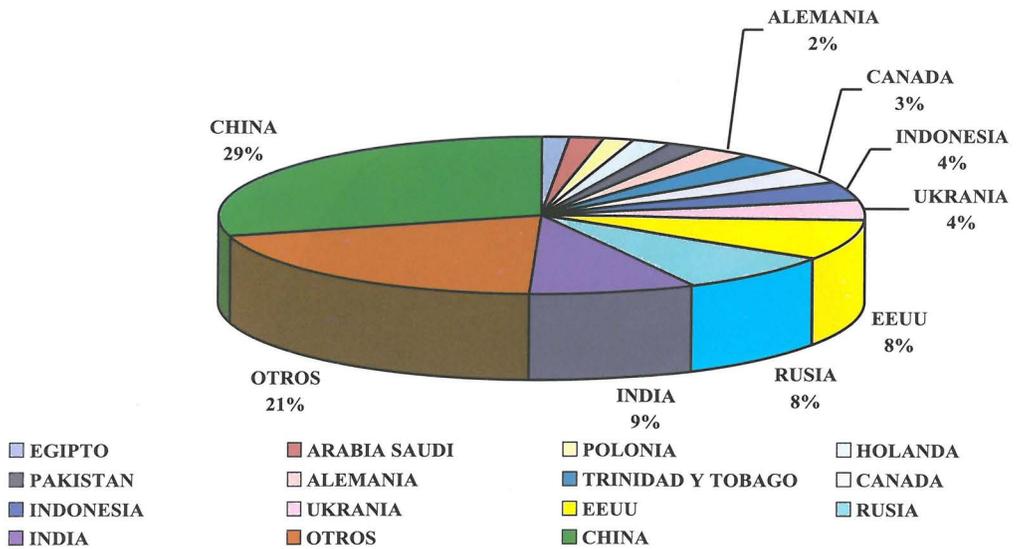


FIGURA 6. Datos de producción mundial de nitrógeno (amonio) para el año 2004 (fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>).

Sallent-Balsareny. Asociadas a la silvita es frecuente encontrar otra serie de sales potásicas como la carnalita (KMgCl₃), etc. La silvinita consiste en un intercrecimiento de halita y silvita. Menos frecuentemente encontramos sulfatos potásicos como kainita, langbeinita, etc. Además de las sales potásicas, existe otra fuente adicional de K, que es la alunita KAl(SO₄)₂(OH)₆, formado generalmente por alteración ácida (aguas ricas en H₂SO₄) de rocas ricas en feldespato o micas.

Generalmente la silvita se extrae por minería subterránea, o por disolución. Si es preciso separar la silvita de la halita, puede hacerse a) por flotación, empleando como espumante el aceite de pino, y como colector del KCl una amina; b) por disolución termal, dado que la solubilidad del KCl es mayor que la del NaCl a temperaturas >66°C, mientras que por debajo de esa temperatura el comportamiento es justo al contrario.

NUTRIENTES SECUNDARIOS EN FERTILIZANTES:

Calcio, magnesio y azufre son necesarios también para las plantas, aunque en cantidades menores que N, P, y K.

Calcio:

El Ca en los suelos es importante por un lado como nutriente, ya que el catión Ca²⁺ se acumula en los tejidos más viejos y en las paredes de las células, proporcionándoles su fuerza. También desempeña un papel fundamental por su influencia en el mantenimiento de las condiciones físicas y biológicas más adecuadas. La mayoría de los suelos contienen Ca suficiente para el crecimiento de la planta, pero en muchos casos el pH de los suelos es

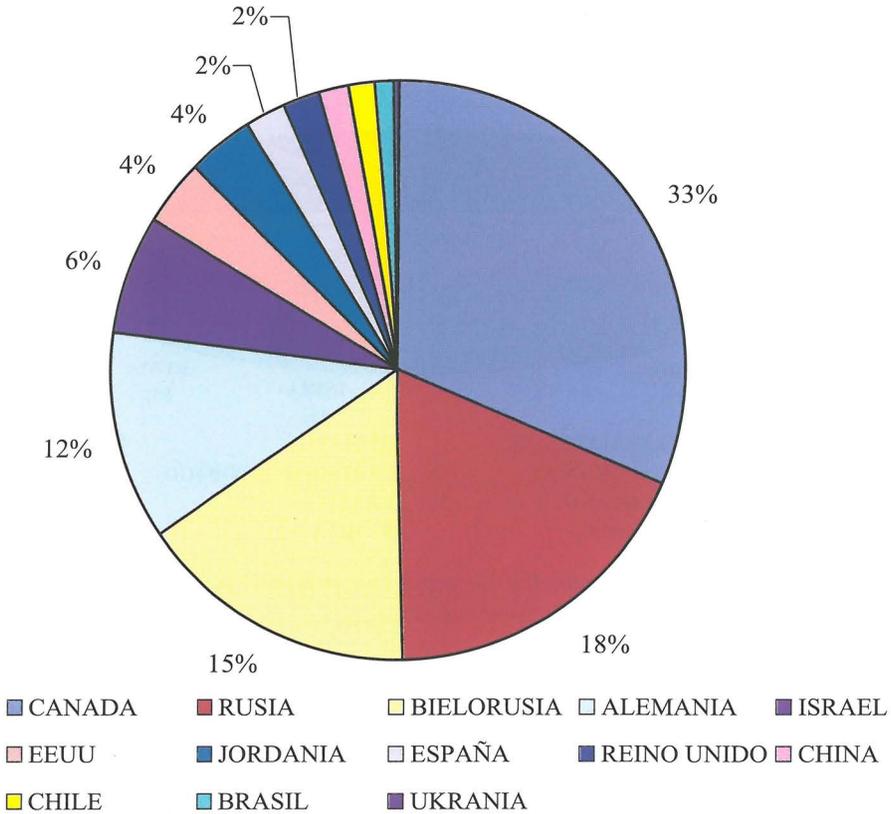


FIGURA 7. Datos de producción mundial de potasio para el año 2004 (fuente: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>)

mucho más bajo (más ácido) de lo que sería deseable. Esto puede solucionarse de forma fácil y económica añadiendo caliza finamente pulverizada. De este modo, además, se aumenta la disponibilidad de otros nutrientes, como el P. Por el contrario, se reduce la disponibilidad de micronutrientes como B, Mn, Fe, Cu, etc. Cuando se precisa añadir una cantidad importante de Ca soluble, se añade yeso directamente en los suelos.

Magnesio:

Es un importante constituyente de la molécula de clorofila. Normalmente los fertilizantes con Mg se clasifican según el grado de solubilidad, siendo los más solubles los sulfatos hidratados como la epsomita $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Hay un grupo de minerales entre los que están la dolomita, brucita, magnesita, periclusa, etc., que tardan de 2 a 4 años en alcanzar un grado de solubilidad alto. Por último, la serpentina y el olivino se emplean en ocasiones, aunque son sólo muy ligeramente solubles.

Azufre:

Se incorpora normalmente en los fertilizantes fosfatados, ya que el grupo SO_4^- es un constituyente importante de las proteínas. Sin embargo, el papel más importante del S en relación con los fertilizantes es su uso en forma de ácido sulfúrico para la producción de superfosfato. El ácido sulfúrico se fabrica a partir de azufre nativo, o menos frecuentemente a partir de la calcinación de sulfuros como la pirita. Cerca del 30% de la producción procede de esta fuente. Se calcina la pirita para liberar SO_2 gaseoso, que se emplea a su vez para producir ácido sulfúrico. En el caso del S nativo, el sistema de explotación más común es el método "Frasch", diseñado para mineralizaciones ligadas a ambientes evaporíticos. Se inyecta agua a temperatura elevada (163°C), y el S se disuelve y se concentra en el líquido. A continuación se inyecta aire comprimido para traer el agua a superficie con el S.

MICRONUTRIENTES EN FERTILIZANTES:**Boro:**

Muchas plantas no producen semillas a no ser que sean fertilizadas con este elemento, aunque hay que controlar las cantidades, ya que en otros vegetales el margen de tolerancia hacia el B es muy reducido. Normalmente se introduce en el suelo como bórax soluble en agua, y los minerales de los que se obtiene este fertilizante son el bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), y la colemanita ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Hierro y Manganeso:

Ambos juegan un papel similar en la planta, en relación con la formación de clorofila. Si falta Fe, la planta amarillea. En la mayoría de los casos estos elementos se incorporan en los fertilizantes fosfatados en cantidades suficientes, aunque a veces es preciso un aporte adicional, generalmente en forma de sulfatos solubles, etc. Los minerales de los que se obtiene el Fe son fundamentalmente óxidos e hidróxidos.

Cobre, Zinc y Molibdeno:

Los tres micronutrientes se añaden generalmente como sulfatos, óxidos, o molibdatos (sódico) en el caso del Mo. Los minerales a partir de los cuales se preparan estos compuestos fertilizantes son sulfuros fundamentalmente (calcopirita, calcosina, esfalerita, molibdenita, etc.)

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

- Baturin, G.N. (1982). *Fosforitas en el fondo marino: origen, composición y distribución*. Elsevier, Amsterdam, 343 pp.
- Burnett, W.C. y Riggs, S.R. (Eds.) (1990). *Phosphate deposits of the world*. SEPM, Special Publication 29, 247 pp.

- Chang, L.L.Y. (2001). “*Industrial Mineralogy: materials, processes, and uses*”. Prentice-Hall, New Jersey, 472 pp.
- Föllmi, K. B. (1996). The phosphorous cycle, phosphogenesis and marine phosphate rich deposits. *Earth Science Reviews* 40: 55-124.
- Harben, P.W. & Kuzvart, M. (1996). *Industrial Minerals. A global Geology Metall Bulletin* PLC. London.
- Kuzvart, M. (1984). *Industrial Minerals and Rocks*. Elsevier.
- Lefond, S. J. (1983). *Industrial Minerals and Rocks*. 5th edition. Amer. Inst. Mining, Metall., and Petroleum Engineers. New York.