
**Minerales
para la Agricultura
en Latinoamérica**

AUTORIDADES

SECRETARIO GENERAL DEL PROGRAMA CYTED
Prof. Fernando Aldana Mayor

COORDINADOR INTERNACIONAL
DEL SUBPROGRAMA CYTED XIII - TECNOLOGÍA MINERAL
Prof. Roberto Villas Boas

COORDINADOR DEL PROYECTO CYTED XIII -2
FERTILIZANTES Y ENMIENDAS DE ORIGEN MINERAL
Ing. Hugo Nielson

RECTOR DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
Lic. Daniel Malcom

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE POSGRADO
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
Dr. Alberto Pochetino

EDITORES

Ing. Hugo Nielson
Lic. Roberto Sarudiansky

CONSEJO EDITORIAL

Dra. Liliana N. Castro
Dr. Sebastián Gambaudo
Lic. Natacha Izquierdo González
Dr. Ricardo Melgar
Lic. María Beatriz Ponce
Ing. Martín Torres Duggan

Impreso en la Argentina - Printed in Argentina

*Reservados todos los derechos. Queda rigurosamente prohibida,
sin la autorización escrita del autor, bajo
las sanciones establecidas en las leyes,
la reproducción parcial o total de esta obra por
cualquier medio o procedimiento, incluidos la
reprografía y el tratamiento informático.*

INDICE GENERAL

PREFACIO	<i>Pág. 9</i>
CAPÍTULO I	<i>Pág. 11</i>
El Marco General del Proyecto CYTED XII-2 Hugo Nielson y Roberto Sarudiansky	
CAPÍTULO II	<i>Pág. 19</i>
Los minerales y la agricultura Peter Van Straten	
CAPÍTULO III - FOSFATOS	<i>Pág. 37</i>
Rocas Fosfóricas	<i>Pág. 39</i>
Liliana N. Castro y Ricardo J. Melgar	<i>Pág. 62</i>
Argentina	
Ricardo J. Melgar y Liliana N. Castro	<i>Pág. 74</i>
Bolivia	
Liliana N. Castro y Ricardo J. Melgar	<i>Pág. 83</i>
Brasil	
Recursos Minerais e Produção de Fosfatos	
Francisco Eduardo Lapido-Loureiro, Núria Fernandez Castro y Rosana Elisa Copedê da Silva	<i>Pág. 100</i>
Uso Agrícola dos Solos do Brasil e Balanço de Nutrientes	<i>Pág. 127</i>
Alberto C. de Campos Bernardi y Pedro L. O. A. Machado	
Chile	<i>Pág. 134</i>
Carlos Rojas Walker y Liliana N. Castro	
Colombia	<i>Pág. 140</i>
Liliana Alvarado Florez y Jairo Ricardo Barreto Reyes	<i>Pág. 148</i>
Ecuador	
Ricardo J. Melgar y Liliana N. Castro	<i>Pág. 159</i>
México	
Roberto Núñez Escobar	<i>Pág. 164</i>
Paraguay	
Ricardo J. Melgar y Liliana N. Castro	
Perú	<i>Pág. 177</i>
Guillermo Aguirre Yato - Universidad Nacional Agraria La Molina	

Uruguay	<i>Pág. 184</i>
Demanda de Fertilizantes	
José Martín Bordoli	<i>Pág. 187</i>
Manifestaciones Fosfáticas	
E. Pecoits y N. Aubet	<i>Pág. 203</i>
Venezuela	
Eduardo Casanova	<i>Pág. 206</i>
Otros Países (Cuba, Nicaragua, Panamá)	
Liliana N. Castro	
Panorama de Mercado de Fosfatos	<i>Pág. 235</i>
Natacha Izquierdo González	<i>Pág. 237</i>
CAPÍTULO IV - POTASIO	<i>Pág. 254</i>
Potasio	
Ricardo J. Melgar y Liliana N. Castro	<i>Pág. 266</i>
Argentina	
Liliana N. Castro y Ricardo J. Melgar	<i>Pág. 267</i>
Bolivia	
Liliana N. Castro	<i>Pág. 278</i>
Brasil	
Francisco E. Lapidou-Loureiro, Marisa Nascimento y Clenilson Da Silva Sousa Junior	<i>Pág. 286</i>
Chile	
Rafael Ruiz Sch.	<i>Pág. 287</i>
Colombia	
Ricardo J. Melgar	<i>Pág. 288</i>
México	
Roberto Núñez Escobar	<i>Pág. 289</i>
Perú	
Ricardo Melgar y Guillermo Aguirre Yato	<i>Pág. 292</i>
Venezuela	
Eduardo Casanova	
Panorama de Mercado del Potasio	<i>Pág. 303</i>
..	<i>Pág. 305</i>
Natacha Izquierdo González	
	<i>Pág. 314</i>
CAPÍTULO V - CARBONATOS	
Carbonatos	<i>Pág. 335</i>
María Beatriz Ponce y Sebastián P. Gambaudo	
Argentina	<i>Pág. 339</i>
María Beatriz Ponce y Sebastián P. Gambaudo	
Bolivia	<i>Pág. 370</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	

Brasil	<i>Pág. 375</i>
.....	
Samir Nahass y Joaquim Severino	<i>Pág. 377</i>
Colombia	
.....	<i>Pág. 381</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
Costa Rica	<i>Pág. 385</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
Cuba	<i>Pág. 387</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
Chile	<i>Pág. 391</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
Ecuador	<i>Pág. 395</i>
Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
México	<i>Pág. 403</i>
Roberto Núñez Escobar y María Beatriz Ponce	
Perú	<i>Pág. 415</i>
Guillermo Aguirre Yato, Sebastián P. Gambaudo y María Beatriz Ponce	
Uruguay	
E. Pecoits, J. Spoturno y N. Aubet	<i>Pág. 425</i>
Venezuela	<i>Pág. 427</i>
Eduardo Casanova y María Beatriz Ponce	
Panorama de Mercado de los Carbonatos	<i>Pág. 450</i>
Lic. Natacha Izquierdo González	
	<i>Pág. 469</i>
CAPÍTULO VI - YESO -----	
Yeso	<i>Pág. 480</i>
María Beatriz Ponce y Martín Torres Duggan	
Argentina	<i>Pág. 483</i>
María Beatriz Ponce y Martín Torres Duggan	<i>Pág. 491</i>
Brasil	
Martín Torres Duggan y María Beatriz Ponce	<i>Pág. 496</i>
Colombia	
Liliana Alvarado Flórez y Jairo Ricardo Barreto Reyes	<i>Pág. 499</i>
Chile	
Carlos Rojas Walker , Martín Torres Duggan y Karina Suez Concha	<i>Pág. 502</i>
México	
Roberto Núñez Escobar, Martín Torres Duggan y María Beatriz Ponce	<i>Pág. 508</i>
Perú	
María Beatriz Ponce	

Venezuela	<i>Pág. 517</i>
Recursos Mineros y Actividad Extractiva	<i>Pág. 519</i>
María Beatriz Ponce	
Necesidades Agrícolas del Yeso	<i>Pág. 531</i>
Eduardo Casanova y Martín Torres Duggan	
Panorama de Mercado del Yeso	<i>Pág. 534</i>
Natacha Izquierdo González	
CAPÍTULO VII - OTROS MINERALES	<i>Pág. 544</i>
Azufre	
Javier Peroni y Liliana Castro	
Colombia	<i>Pág. 547</i>
Liliana Alvarado Flórez y Jairo Ricardo Barreto Reyes	
Boratos	<i>Pág. 554</i>
Ricardo N. Alonso y Leandro de los Hoyos	
Panorama de Mercado de Boratos	<i>Pág. 557</i>
Natacha Izquierdo González	
Nitratos	<i>Pág. 558</i>
Nitratos	
Corina Franzosi y Santiago Montagna	<i>Pág. 559</i>
Chile	
Carlos Rojas Walker	<i>Pág. 561</i>
Perú	
Guillermo Aguirre Yato	
Venezuela	
Eduardo Casanova	
Panorama de Mercado de Nitratos	
Natacha Izquierdo González	
Turba	
Mario Medana	

PREFACIO

El trabajo que aquí se presenta constituye el producto final de las actividades iniciadas en el año 2001, en el marco del Proyecto de Investigación CYTED XIII-2 "Fertilizantes y Enmiendas de Origen Mineral".

El Proyecto, que contó con financiamiento del Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED - y se desarrolló en el Subprograma XIII- Tecnología Mineral, tuvo como objetivo principal investigar y promover la contribución de la minería al desarrollo sustentable del sector agropecuario de los países de Latinoamérica.

Para ello se buscó relevar el conocimiento actual en la región de la disponibilidad de recursos mineros para la producción de fertilizantes y su utilización como enmiendas, identificar las necesidades del sector agropecuario en los países involucrados, analizar los mercados y las tecnologías existentes y disponibles, conocer el marco institucional y las acciones que se desarrollan así como también las condiciones medioambientales de la actividad extractiva minera y de la producción agropecuaria.

Las primeras acciones del Proyecto apuntaron a identificar y convocar a instituciones y especialistas en el tema y a generar documentos de información básicos que despertaran el interés en los sectores productivos involucrados.

Posteriormente, mientras se profundizaban las investigaciones de los especialistas en los distintos temas específicos, se desarrollaron acciones en numerosos países de la región para que los destinatarios principales de la información que se estaba generando, esto es productores mineros y agropecuarios, empresas, instituciones gubernamentales y no gubernamentales y la comunidad en general, tomaran conocimiento del proyecto, de sus objetivos y de los avances que se iban registrando. Esta acción de difusión permitió a su vez retroalimentar al proyecto con información provista por los principales actores vinculados al tema.

El documento final que aquí se publica representa a su vez un punto de partida para avanzar en la temática de los fertilizantes y enmiendas ya que ofrece un panorama global actualizado de la situación en la región latinoamericana.

Deseo expresamente dedicar este trabajo al Dr. Gildo Araújo de Sá C. de Albuquerque, destacado y distinguido profesional especialista en el tema, quien fuera uno de los principales impulsores del proyecto, y en el cual participó activamente hasta su fallecimiento en el año 2003.

Deseo asimismo agradecer a los autores de los distintos capítulos y subcapítulos de esta publicación, a CYTED, al Subprograma XIII- Tecnología Mineral- coordinado por el Prof. Roberto Villas Boas, a las organizaciones empresarias del sector minero y del sector agropecuario de Latinoamérica, a las instituciones gubernamentales, al Organismo Latinoamericano de

■

Minería - OLAMI -, a la Universidad Nacional de San Martín (Argentina) y a todos quienes de una manera u otra han participado de este proyecto. Expreso finalmente un reconocimiento especial a la señorita María Delia Idiartegaray quien eficazmente ha colaborado con los aspectos administrativos del proyecto.

Ing. Hugo Nielson

Coordinador del Proyecto CYTED XIII-2

Buenos Aires, noviembre de 2005

Capítulo I

**El marco general
del Proyecto Cyted XIII - 2**

El marco general del Proyecto Cyted XIII - 2

Hugo Nielson¹ y Roberto Sarudiansky¹

Los desafíos del Milenio

En septiembre de 2000, en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York, los Jefes de Estado y de Gobierno de todo el mundo se reunieron para discutir y acordar la denominada Declaración del Milenio.

La Declaración reafirmó el apoyo a los principios del desarrollo sustentable, convenidos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Río de Janeiro, 1992) y señaló expresamente la necesidad de actuar con prudencia en la gestión y ordenación de todas las especies vivas y todos los recursos naturales, conforme a los preceptos del desarrollo sustentable y que es preciso modificar las pautas insostenibles de producción y consumo en interés de nuestro bienestar futuro y en el de nuestros descendientes.

Dos de los principales desafíos planteados en la Declaración son:

- Reducir la pobreza y el hambre
- Velar por la sustentabilidad ambiental

Para ello se acordó desarrollar acciones para reducir a la mitad, para el año 2015, el porcentaje de habitantes del planeta cuyos ingresos sean inferiores a un dólar por día y el de las personas que padezcan hambre. Asimismo se decidió elaborar y aplicar estrategias que proporcionen a los jóvenes de todo el mundo la posibilidad real de encontrar un trabajo digno y productivo y velar para que todos puedan aprovechar los beneficios de las nuevas tecnologías.

Con el objetivo de delinear e implementar acciones para las próximas décadas y realizar ajustes para una mejor ejecución de la Agenda 21 de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Río de Janeiro, 1992), se desarrolló en la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica, en septiembre de 2002, la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible.

La Declaración Política de esta Cumbre reafirmó el compromiso de los países con el Desarrollo Sustentable, básicamente lo establecido en la Agenda 21, y se aprobó un Plan de Implementación.

En dicho Plan de Implementación se señala: "la erradicación de la pobreza es el mayor desafío que enfrenta hoy el mundo y es un requisito indispensable para el desarrollo sustentable, en particular en los países en desarrollo". En otras partes del mismo se resalta el rol crucial de actividades como la agricultura y la minería para cubrir las necesidades del crecimiento global de la

¹Centro de Estudios para la Sustentabilidad - Universidad Nacional de San Martín
hugo.nielson@unsam.edu.ar / sarudi@fibertel.com.ar

población y la erradicación de la pobreza, especialmente en los países en desarrollo. Asimismo reiteradamente se destacan las necesidades de asistencia técnica y financiera apropiada y de promover la inversión del sector privado y apoyar los esfuerzos de los países en desarrollo y con economías en transición para fortalecer la investigación en agricultura y la capacidad para el manejo del recurso natural y la diseminación de los resultados en las comunidades. También se promueven programas para mejorar las prácticas para el uso ambientalmente adecuado, efectivo y eficiente de la fertilidad del suelo.

En la Cumbre en Nueva York realizada recientemente (septiembre de 2005), en ocasión del 60° aniversario de la Organización de las Naciones Unidas, más de 150 Jefes de Estado y de Gobierno firmaron una nueva Declaración, donde se ratifican los Objetivos del Milenio, y se acuerda adoptar planes nacionales, a partir de 2006, para cumplir con dichos objetivos. Señalan allí: "Reafirmamos que el desarrollo es un objetivo central en sí mismo y que el desarrollo sustentable en sus aspectos económicos, sociales y ambientales es un elemento fundamental del marco general de actividades de las Naciones Unidas"

Los compromisos asumidos por los estados consisten básicamente en aumentar la asistencia oficial para el desarrollo en 50.000 millones de dólares anuales para 2010 y en acordar que el tema debe constituir el centro de las negociaciones de comercio internacional.

El primer acuerdo de carácter global sobre el modelo de desarrollo de una agricultura sustentable que pueda reducir el hambre y la pobreza y mejorar la protección del medio ambiente en los países en desarrollo se logró en reuniones celebradas en Beijing (China - septiembre de 2005) por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Como corolario de las reuniones se instó a los gobiernos a dar prioridad a las inversiones públicas en áreas rurales destinadas a carreteras, tecnología de la información e infraestructura rural, así como en investigación, formación profesional y educación.

El "Acuerdo de Beijing sobre el futuro de la agricultura mundial y las zonas rurales" pidió a los gobiernos que reconozcan el papel clave de la agricultura y las comunidades rurales en el crecimiento económico general y el desarrollo sustentable. Dado que la mayoría de los pobres y hambrientos viven en áreas rurales, se aboga por mayores inversiones en agricultura y desarrollo rural, consideradas "absolutamente cruciales para mejorar sus vidas y sus medios de subsistencia". El Acuerdo subraya la necesidad urgente de dar prioridad a la investigación agrícola, solicitando una "revolución verde, que armonice la reducción de costos con la conservación de los recursos y la mejora de la producción". Sobre el medio ambiente, el Acuerdo pide a las comunidades rurales que se conviertan en los principales guardianes de los ecosistemas locales. "La conservación y la gestión sustentable de los ecosistemas son la mejor garantía para que puedan mantener funciones como la biodiversidad, secuestro de carbono, polinización y la purificación del agua". Sugiere desarrollar una estrategia que permita a los pobres beneficiarse de la "venta" de estos servicios medioambientales. Finalmente, el Acuerdo reconoce que las prácticas agrícolas contribuyen al calentamiento global y que éste afecta de forma adversa a la productividad agrícola en la mayoría de los países en desarrollo. Por ello solicita que se potencien las prácticas agrícolas que reduzcan el impacto del sector en el cambio climático.

Posteriormente el mismo organismo internacional lanzó un llamamiento solicitando a los líderes mundiales que cumplan el compromiso adquirido de reducir a la mitad el número de hambrien-

tos en el planeta para el año 2015. Pidió allí a los gobiernos y al sector privado que "financien de forma adecuada las iniciativas en la lucha contra el hambre a través del desarrollo rural y la reducción de la pobreza rural, asegurando el acceso directo de los grupos más vulnerables a los alimentos". En un informe sobre la movilización de recursos para combatir el hambre presentado con motivo de la cumbre de la ONU, la FAO subrayó que "es inaceptable que 843 millones de personas en los países en desarrollo o de economías en transición continúen siendo víctimas del hambre y que más de 1.000 millones de personas tengan que vivir con menos de un dólar diario" y agregó que, desafortunadamente, el ritmo de reducción del porcentaje de hambrientos es demasiado lento, "lo que dificulta que se puedan alcanzar los Objetivos de Desarrollo del Milenio, especialmente en África".

Según la FAO, para reducir el hambre es esencial que los nuevos fondos destinados al desarrollo se asignen a la agricultura y al desarrollo rural en una proporción mayor que en las últimas décadas. La gran mayoría de los pobres del mundo viven en áreas rurales, y los estudios demuestran que el desarrollo de la agricultura es el principal motor para la generación de empleo e ingresos. El reducido nivel del gasto público a nivel nacional, junto con el descenso de la ayuda oficial a la agricultura y el desarrollo rural en los países en desarrollo, chocan con la importancia de la agricultura en sus economías nacionales, en especial para los países pobres que dependen de ella. También señala la FAO que la inversión privada es clave para la formación de un capital permanente en la agricultura, y es responsabilidad de los gobiernos lograr este objetivo a través de la investigación, la regulación de las inversiones públicas, los estímulos financieros y la formación. Destaca además que "los que se dedican a la agricultura son los agricultores, no los gobiernos. Sin embargo, la falta de financiación pública adecuada para bienes públicos esenciales como infraestructuras, investigación y formación, divulgación y desarrollo de los mercados, actúa como freno para las inversiones e iniciativas del sector privado".

La situación actual

Más de tres cuartas partes de las personas que pasan hambre viven en zonas rurales de los países en desarrollo. Aproximadamente la mitad de ellas pertenecen a familias rurales en tierras marginales, donde la producción agrícola está amenazada por la degradación ambiental. Cerca de la tercera parte vive en hogares rurales sin tierras que no se dedican a la agricultura, como los que dependen del pastoreo, la pesca y los recursos forestales. Otro fenómeno alarmante es el desplazamiento de la desnutrición a las ciudades.

Para cumplir el Objetivo de Desarrollo del Milenio vinculado con el hambre es necesario mejorar la distribución de los alimentos e incrementar la producción y es prioritario emprender las siguientes acciones:

- Centrarse en tecnologías que incrementen la producción agrícola. De esta manera aumentarán también los ingresos de las personas que poseen pocos bienes aparte de las tierras.
- Dedicar más recursos a la agricultura. Tanto en los países pobres como en los ricos, la agricultura está desatendida y es necesario invertir esta tendencia.
- Prevenir la degradación ambiental. Las nuevas políticas y tecnologías destinadas a poten-

ciar la productividad también deben proteger los ecosistemas frágiles. Las personas pobres son las más perjudicadas por la degradación ambiental y al mismo tiempo la pobreza provoca degradación ambiental. En los países en desarrollo, la baja productividad suele ser la causante de dicho deterioro, mientras que en Europa y en América del Norte, la responsable es la elevada productividad.

Se estima que la población mundial asciende aproximadamente, en el año 2005, a 6.500 millones de habitantes. La distribución entre zonas rurales y urbanas es prácticamente equivalente. En Latinoamérica, con casi el 10% de la población mundial, donde el 34% de la población rural (20% del total) es considerada población agraria por su vinculación y dependencia a esta actividad.

El total de la población activa en Latinoamérica es de 220 millones de personas. De éstas aproximadamente el 20% (más de 40 millones) trabajan directamente en actividades del sector agropecuario. A modo de comparación debemos señalar que en Europa esta relación no supera el 9%. Por lo tanto, en Latinoamérica el volumen de la población rural y la escasa disminución, en términos absolutos, de la población activa en el sector agrario en contraposición con la tendencia europea, muestra una clara y marcada dependencia de la región respecto al sector agrario.

El sector agrario es, por su parte, un importante oferente de alimentos para la población y un destacado demandante de mano de obra e insumos, así como una de las principales actividades económicas en casi todos los países de Latinoamérica

Cuadro I-1: Comparación del total de población, población rural y agraria activa en Latinoamérica, Europa y el mundo.
* Proyección

Área	Población total (en millones)			Población rural (en millones)			Población Agraria Activa (en millones)		
	1990	2000	2010*	1990	2000	2010*	1990	2000	2010*
Latinoamérica y Caribe	441.5	520.2	594.4	127.0	127.2	122.7	44.7	43.8	41.4
Europa	498.7	727.9	719.7	140.3	198.9	185.9	24.2	31.1	22.5
Mundial	5263.5	6070.5	6830.2	2990.3	3213.0	3324.9	1220.5	1317.8	1382.1

Fuente: FAOSTAT

La producción mundial de fertilizantes ronda los 250 millones de toneladas donde el 60% corresponde a nitrogenados, el 23% a fertilizantes fosfatados y el 17% a fertilizantes potásicos. La principal región productora es Asia (China e India) con el 45 %, seguida por Europa (26%), Norteamérica (20 %), África (4%), Latinoamérica (3.5%) y Oceanía (1%). En Latinoamérica, la producción, se distribuye de la siguiente manera: nitrogenados 52%, fertilizantes fosfatados 32% y fertilizantes potásicos 15%.

En Latinoamérica se cultivan alrededor de 109 millones de hectáreas, es decir el 9% del total mundial, y la región absorbe un porcentaje similar del consumo de fertilizantes (Figura I).

La mayoría de los países Latinoamericanos satisfacen parte o toda su demanda de fertilizantes vía la importación ya sea desde países de la misma región o fuera de la zona, pero solamente 7 de los 19 países realizan exportaciones, y la mayor parte de ellas son a otros países de la misma región.

La demanda aumenta cada año en respuesta al incremento mundial de la población, aunque el consumo aún es mayor en los países o regiones más desarrolladas. En respuesta al aumento de la población se espera un incremento en las áreas cultivadas y un mayor empleo de fertilizantes y enmiendas del suelo para mejorar su productividad y reparar el deterioro natural provocado por dicha actividad.

Los minerales para la agricultura: una oportunidad.

Los principales compuestos y elementos de origen mineral que se utilizan en la agricultura son nitratos, fosfatos, potasio, azufre, yeso, calcio, magnesio, boro, cobre, molibdeno, zinc, hierro, manganeso, zeolitas, bentonitas, vermiculitas y turbas.

En todos los países del continente americano existen recursos mineros identificados que son o podrían ser extraídos, procesados y aplicados en las distintas actividades agropecuarias.

Los recursos mineros pueden agruparse en:

- Recursos utilizados para la elaboración de fertilizantes (Nutrientes y Micronutrientes)
- Recursos utilizados para enmiendas (correctores de suelos)

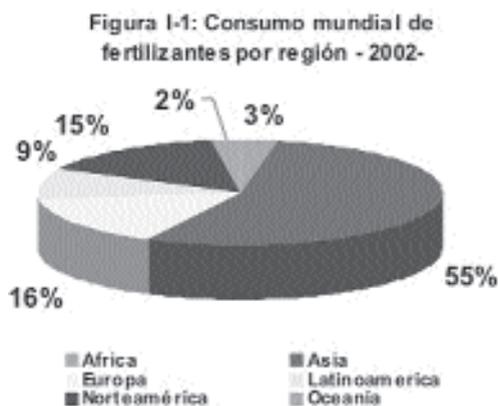
Entre los nutrientes primarios están el nitrógeno, el fósforo y el potasio. El calcio, el magnesio, y el azufre -los nutrientes secundarios - son requeridos por las plantas en cantidades menores que los nutrientes primarios.

Entre los micronutrientes que se agregan a los suelos como fertilizantes, están el boro, cobre, hierro, manganeso, molibdeno y zinc.

Se considera enmienda a cualquier material inorgánico u orgánico, excepto los usados principalmente como fertilizantes, con capacidad para modificar las características físicas, la acción microbiana, y/o cambiar la acidez de un suelo.

Entre las enmiendas de origen mineral están el azufre, las bentonitas, las rocas carbonáticas (calizas y dolomitas), las zeolitas, las perlitas, la turba, la vermiculita y el yeso.

En función de lo expresado anteriormente sobre la importancia del sector agrario en Latinoamérica, para un Desarrollo sectorial Sustentable se debe recurrir al uso de fertilizantes y enmiendas, elaboradas a partir de materias primas minerales, para mejorar la producción y disminuir la degradación de los suelos. Y es precisamente aquí donde el sector minero de la región enfrenta el desafío de convertirse en un proveedor confiable para satisfacer la demanda generada por el sector agrario.



Otras consideraciones

Implementar estas acciones permitiría lograr una mejor calidad de vida para todos los ciudadanos a través de un desarrollo más sustentable en lo social, lo ambiental, lo cultural y lo económico, especialmente para los más desfavorecidos.

La protección de la naturaleza debe ser compatible con el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Sobre todo en este siglo en el que las nuevas tecnologías, que conllevan un mayor respeto del medio ambiente, permiten alcanzar máximos niveles de expansión y de rentabilidad, tanto económica como ambiental.

Los planes para explotar cualquier recurso natural deben ser elaborados con participación u opinión de las comunidades afectadas. De no ser así existe el riesgo de enriquecer a unos pocos, de desposeer a la mayor parte de la comunidad y de destruir el ecosistema. La disponibilidad de fondos por sí sola no garantiza un desarrollo sólido con beneficios compartidos por todos. Es más, el éxito también depende de instituciones sólidas, de políticas prudentes, de procesos transparentes, de un amplio acceso a la información y de la participación equitativa en la adopción de decisiones, todas ellas características esenciales de una correcta gestión de los asuntos ambientales.

Para todo lo expuesto es indispensable una permanente, estrecha y responsable vinculación entre todos los actores involucrados: El gobierno (local, regional y nacional), las empresas (agropecuarias, mineras y de servicios) y las comunidades con sus diferentes sistemas de representación genuina.

El gobierno, que tiene a su cargo el rol de mayor responsabilidad, debe procurar una distribución más equitativa de la riqueza y de los beneficios de los proyectos entre las comunidades directamente involucradas. Asimismo debe considerar la posibilidad de aplicación de políticas activas que comprendan, armónicamente, a los dos sectores productivos. Incentivar a quienes inviertan en la preservación de los suelos y en la mayor industrialización de los productos, induciendo una producción minera y agrícola sustentable. También le corresponde fijar y consensuar las reglas de juego, gestionar la licencia social para los proyectos, controlar la aplicación de las legislaciones vigentes, garantizar los mecanismos de participación de TODOS los actores.

Por su parte las empresas mineras deben explicar con claridad los alcances de sus proyectos, evitar las zonas "oscuras" en las negociaciones con los gobiernos, no caer en paternalismos facilistas, establecer diálogos públicos con todos los actores, difundir sus compromisos de sustentabilidad y comprender la dimensión y características del nuevo mercado agropecuario.

En cuanto a los agricultores, tienen que tomar conciencia de la necesidad de reponer los minerales que se extraen con cada cosecha, lo que mejorará los rendimientos de esos suelos y contribuirá a una utilización responsable de los recursos naturales. Deben reconocer la responsabilidad que significa utilizar el suelo de todos, mejorar las condiciones de producción agropecuaria incorporando tecnología y comprender que una producción sustentable puede ser también un buen negocio.

Las comunidades tienen informarse y participar en los organismos de control de los proyectos, permitir la expresión de todas sus instancias organizativas, alejarse de los fundamentalismos paralizantes y comprender que la mayor agresión al medio ambiente surge del hambre y la pobreza.

Capítulo II

Minerales en la Agricultura

Introducción

Los suelos son esenciales para la producción de alimentos. Los cultivos y los animales en pastoreo requieren suelos fértiles para una producción de alimentos sustentable. La fertilidad de los suelos depende de un número de factores que interactúan, dentro de los que incluyen el clima (temperatura y precipitaciones), material parental (bedrock), morfología, actividad biológica y tiempo de formación. Las condiciones climáticas que influyen en la productividad del suelo están influenciadas por factores externos y están predominantemente relacionadas con la zonificación latitudinal, con climas tropicales que se encuentran alrededor del Ecuador pasando a zonas más frías y secas que se desarrollan tanto al norte como al sur del mismo. También los factores topográficos influyen sobre el desarrollo del clima y del suelo. Los climas frescos a gran altitud y las laderas empinadas reducen por lo general el potencial de producción de cultivos.

La geología y distribución de rocas y minerales sobre la superficie de la Tierra es el principal factor en el desarrollo y en la fertilidad del suelo. La distribución de las rocas y minerales sobre la superficie terrestre es, en gran parte, el resultado del movimiento de porciones extensas y relativamente rígidas de la corteza y manto superior, las denominadas "placas". Las fuerzas geológicas están constantemente cambiando la superficie de la tierra, aunque en "lento movimiento", en escalas de tiempos geológicos de miles y de millones de años. Las montañas, como la Cordillera de los Andes, se elevan y erosionan, los océanos se abren y se cierran, los continentes se separan o se acercan entre ellos y se producen plegamientos y ascensos de segmentos completos de la corteza, a esto se suma el cambio climático global en el tiempo. Todos estos factores y fuerzas influyen fuertemente en la distribución de rocas y minerales y en la distribución de suelos fértiles o infértiles.

La figura II-1 nos ofrece un corte en la sección de la corteza terrestre y el manto superior mostrando la localización de varias capas de la parte superior de la Tierra y los movimientos de placas

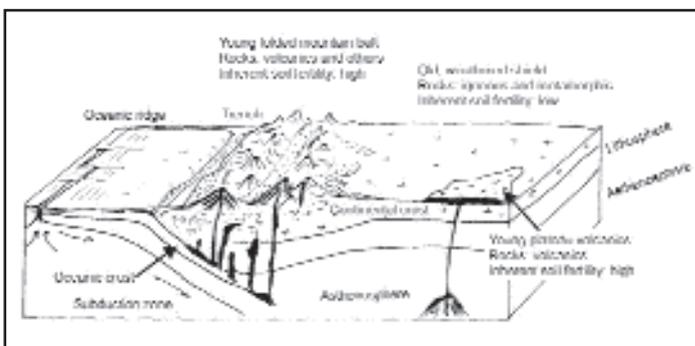


Fig. II-1. Sección geológica generalizada a través de Sudamérica con diferentes fertilidades de suelos desarrollados sobre diferentes materiales originales (fuente: van Straaten, en preparación)

que influyen en la formación de rocas y minerales, y además la distribución de la fertilidad potencial del suelo. Es un corte geológico generalizado de parte del continente Sudamericano y del Océano Pacífico hacia el oeste. La sección transversal muestra las áreas donde el material nuevo o relativamente no meteorizado es traído a la superficie, por ejemplo en los Andes. Aquí el potencial de desarrollo de los suelos fértiles tiende a ser alto (Fyfe et al. 1983; Fyfe, 1989). Sin embargo,

¹ Dept. of Land Resource Science - University of Guelph - pvanstra@uoguelph.ca

los factores climáticos (por ejemplo climas fríos a gran altura) y los factores topográficos, tales como laderas empinadas, limitan el desarrollo de suelos fértiles y la composición potencial del suelo. La fertilidad del suelo es generalmente baja en otros segmentos del continente. La baja fertilidad del suelo limita la producción de cultivos en áreas donde la superficie terrestre es antigua y ha estado sujeta a intensos procesos de erosión y lixiviación, por ejemplo en el Escudo Brasileño. Como en el Escudo Brasileño, grandes partes del continente africano Sub-sahariano, y partes de Asia del Sur y del Sudeste y Australia, los suelos que se desarrollan sobre estas rocas son inherentemente infértiles y no pueden soportar la producción de cultivos en forma continua e intensiva. Los suelos desarrollados sobre estos tipos de rocas y en estos climas, requieren agregados de nutrientes.

La intervención humana en la agricultura, por ejemplo la constante producción de cultivos intensivos sin adecuada reposición de nutrientes, puede llevar a balances de nutrientes negativos. En estos sistemas, se extraen más nutrientes del suelo que los que se agregan. Consecuentemente, la constante remoción de nutrientes del suelo por medio de los cultivos ("explotación o minado del suelo") es una de las principales causas biofísicas para la tendencia descendente de la producción de alimentos en muchas partes del mundo en desarrollo. Para superar los suelos inherentemente infértiles y el agotamiento o reducción de suelos infértiles inducidos antropogénicamente, los agricultores suelen utilizar insumos como fertilizantes y abonos. Estos agregados incrementan la productividad del suelo, la producción y la seguridad de los alimentos.

Con la excepción del nitrógeno (N), prácticamente todos los nutrientes agrícolas derivan de recursos geológicos. Estos recursos de nutrientes de origen geológico pueden ser aplicados al suelo directamente o sin mayores modificaciones (aparte de la molienda del producto) o son transformados industrialmente en fertilizantes o enmiendas del suelo antes de ser aplicados.

En los próximos capítulos se discutirán los diferentes recursos geológicos que constituyen materias primas para la fabricación de fertilizantes, a través de una revisión de cada nutriente, seguida por una breve revisión del contexto geológico de estos recursos.

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es esencial para el crecimiento de las plantas. Es parte de toda célula viviente. Las plantas requieren N para el crecimiento de las raíces, brotes, frutas y semillas. La adición de N a los suelos y plantas promueve la formación de clorofila y así es esencial en el proceso de la fotosíntesis. Una adecuada disponibilidad de N proveniente del suelo determina una coloración verde oscura en hojas, debido a una mayor concentración de clorofila en las mismas. El nitrógeno es un elemento esencial en la producción de proteínas; promueve el crecimiento vegetativo vigoroso en plantas así como la síntesis de azúcares. Los requerimientos de N de los cultivos varían. Mientras que los cultivos de cereales como el maíz o el arroz por lo general, tienen una relativa alta demanda de N que debe ser provista por la solución del suelo, las leguminosas cubren la mayor parte de la necesidad de N con las bacterias que crecen simbióticamente y que fijan el nitrógeno.

En la naturaleza, el nitrógeno es el único nutriente agrícola importante no provisto totalmente por materias primas de origen geológico. Los únicos recursos geológicos que contribuyen, en una parte menor en el mercado mundial de nitrógeno para fertilizantes, están en los depósitos de ni-

tratos de Chile y en otros pequeños yacimientos de guano, abonos orgánicos. La fuente principal de nitrógeno es, sin embargo, la atmósfera, que está formada por 79,1% de nitrógeno, 20,9% de oxígeno y 0,036% de dióxido de carbono y otros gases residuales.

Los cultivos de leguminosas tales como porotos, cacahuets (maní) y soja, y los árboles leguminosos son capaces de extraer nitrógeno del aire con la ayuda de las bacterias de la raíz. Durante este proceso de fijación biológica de nitrógeno (FBN) las bacterias simbióticas "fijan" y convierten el N de la forma inorgánica elemental en la atmósfera, en formas de nitrógeno orgánico-disponible para las plantas huéspedes.

La mayoría de los fertilizantes nitrogenados de síntesis química disponibles en el mercado derivan de la aplicación del proceso Haber-Bosch, un proceso químico estudiado por el químico Fritz Haber y el ingeniero químico Carl Bosch, ambos de origen alemán. El gas natural, un recurso geológico no renovable es la principal fuente de energía y alimentación para la producción de amoníaco sintético. En este proceso, el nitrógeno atmosférico es "fijado" industrialmente del aire y combinado con el hidrógeno para producir amoníaco, de acuerdo a la simplificada ecuación: $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$. El amoníaco producido por el proceso Haber-Bosch representa la base para aproximadamente el 97% de todos los fertilizantes nitrogenados producidos en el mundo. Los fertilizantes nitrogenados incluyen el amoníaco anhídrido, la urea, el nitrato de amonio, el sulfato de amonio y otros fertilizantes nitrogenados, así como fertilizantes N-P como fosfatos mono y di-amónico.

La distribución mundial de los recursos de gas natural y de petróleo no es uniforme y las mayores reservas se localizan en el Medio Oriente, en la antigua Unión Soviética, en África del Norte y en el Golfo de Méjico. Los sedimentos apropiados en los cuales se pueden formar y almacenar los productos petroleros tienen una amplia distribución areal. En un contexto geotectónico, los hidrocarburos son explotados principalmente en márgenes pasivos y en cuencas de retroarco. En Sudamérica, estos ambientes están ubicados fuera de la costa de Brasil y en los ambientes de retroarco, al este de la Cordillera.

Los precios del gas natural y de los fertilizantes nitrogenados fluctúan ampliamente. En el ejemplo se observa que el precio de la urea, tiende a seguir al precio del gas natural (Figura II-2).

Los nitratos del Desierto de Atacama, en el norte de Chile, son actualmente la única fuente comercial de nitrógeno a partir de un recurso geológico. Son, sin embargo, de una significación económica menor si se los compara con el amoníaco sintético producido por el proceso Haber-Bosch. Los nitratos de Chile se usan en algunos países para cultivos especiales, de invernadero y tabaco.

Dado que los nitratos minerales son altamente solubles, se encuentran en o cerca de la superficie en lugares como el Desierto de Atacama, en el norte de Chile donde persisten a lo largo del tiempo condiciones extremadamente áridas y libres de vegetación. Las acumulaciones de nitratos de Chile se encuentran en cuencas cerradas de alrededor de 30 km de ancho y 700 km de largo entre la cordillera costera del oeste y los Andes al este. Los depósitos de nitratos económicamente explotables aparecen en capas de "caliche" (depósitos de arena o arcilla mezclado con sales cristalinas como nitrato de sodio) de de 1 a 3 metros con una sobrecarga 2 a 3 metros. El contenido de nitrato del caliche varía pero el promedio de los yacimientos es de 7-25% $NaNO_3$, 2-3% KNO_3 , 4-10% $NaCl$ y 10-30 % $NaSO_4$, junto con concentraciones variables de Mg, Ca, K,

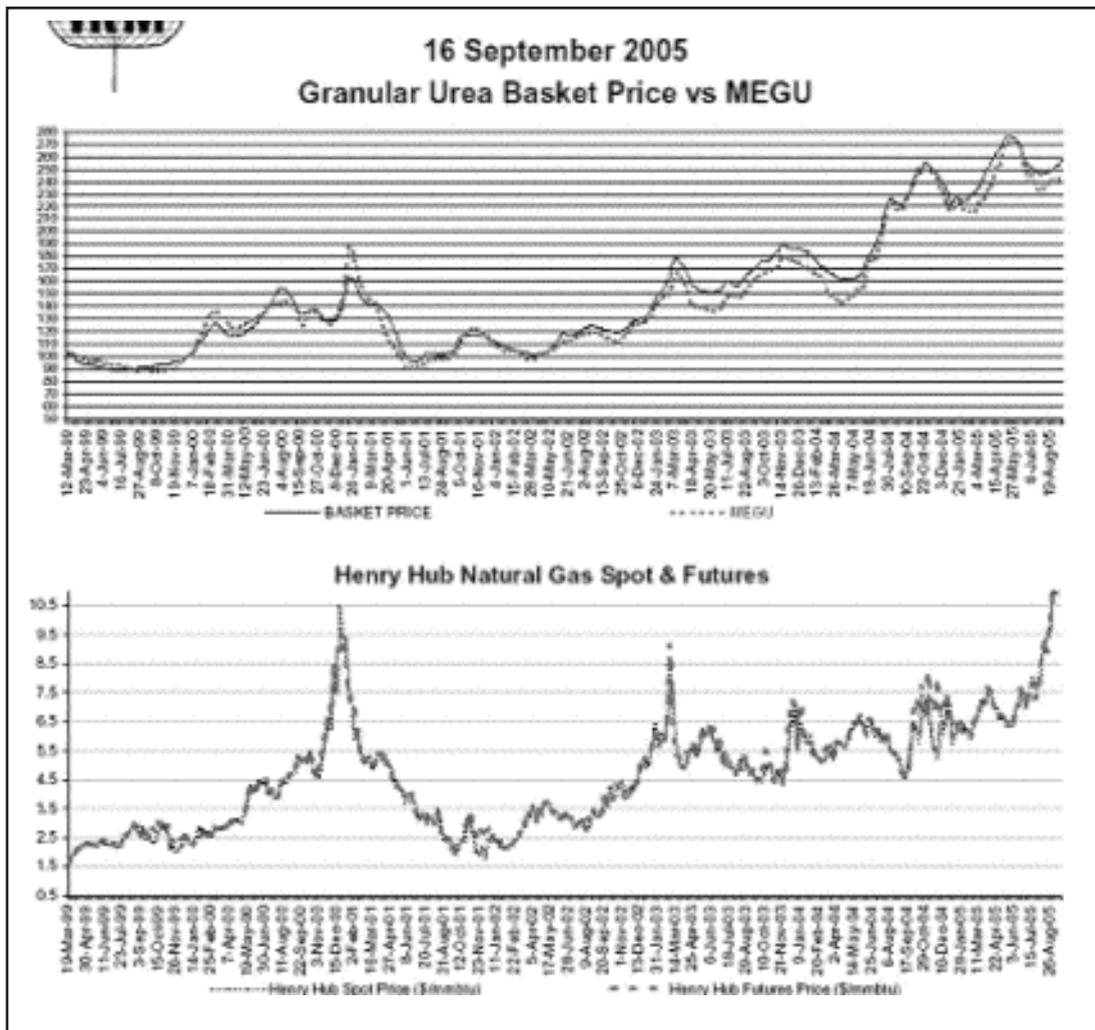


Figura II-2. Fluctuaciones en el precio de la urea en Norteamérica como función del precio del gas natural (IRM 26 agosto, 2005) / www.fertilizerworks.com/html/market/BasketPrice.pdf

B, y I (Eriksen 1981).

Los recursos de nitrógeno son muy amplios dado que, como gas, el nitrógeno forma más de dos tercios de la atmósfera. Sin embargo, para la producción industrial de fertilizantes nitrogenados, se requieren recursos no renovables tales como el gas natural. Aproximadamente dos tercios de las reservas de gas natural mundiales están localizadas en el Medio Oriente y en países de la antigua Unión Soviética.

El gas natural como elemento crítico para la producción de fertilizantes nitrogenados, insume el 70-90% de los costos de producción. La fuerte relación entre los precios del gas natural y los

fertilizantes nitrogenados se ilustra en la figura II-2. Es interesante notar que los precios del gas natural de Norteamérica casi se duplicaron desde mediados del 2003, de 3.65 US\$/mbtu a más de 6 US\$/mbtu respectivamente y en meses recientes por sobre 10 US\$/mbtu.

Hay nuevos recursos que se pueden utilizar para sintetizar amoníaco, por ejemplo metano de carbón e hidrato de gas natural. Se considera que el metano encontrado en la mayoría de las cuencas carboníferas del mundo, se convertirá en una fuente significativa de provisión de metano. Se estima actualmente que más de 146 trillones de pies cúbicos de metano (Tcf) pueden ser recuperados solamente en los Estados Unidos. Otra fuente potencial para la producción de fertilizantes sintéticos de N es el metano de los hidratos de gas, localizado en sedimentos marinos y en sedimentos continentales debajo de la zona permafrost del Ártico. Sin embargo, existen barreras tanto técnicas como ambientales, que necesitan ser consideradas antes de que estos recursos puedan ser desarrollados.

Fósforo

El fósforo juega un papel fundamental en los organismos vivos. El fósforo es esencial para las plantas y los animales porque es un componente fundamental de las células, formando parte del ácido ribonucleico (ARN) y desoxiribonucleico (ADN), ácidos nucleicos que forman parte del material genético celular. El fósforo es la clave para controlar la mayoría de los procesos que requieren energía en los organismos vivos. El fósforo es esencial para la formación de proteínas y enzimas, moléculas que son fundamentales para la vida. En las plantas, la provisión de fósforo es importante pues estimula el desarrollo temprano de las raíces y la floración, así como el crecimiento de las semillas y los frutos. La disponibilidad del fósforo influye en la adquisición de nitrógeno y otros nutrientes.

Las rocas fosfóricas proveen el principal recurso para producir fertilizantes fosforados y químicos fosfáticos. Más del 75% de los recursos de rocas fosfóricas son de origen marino, 10-15% de procedencia ígnea y sólo una pequeña proporción se encuentra en los depósitos de guano. Los depósitos de fosfatos están ampliamente distribuidos a lo largo y a lo ancho del mundo aunque los mayores depósitos se encuentran concentrados en África del Norte y el Medio Oriente (Marruecos, Túnez, Jordania, los EEUU, China y Rusia (Figura II-3).

Los fosfatos más comunes son los de calcio del grupo de la apatita. Otros fosfatos incluyen los minerales del grupo de la crandalita, así como la variscita y la estrengita, que contienen Al y Fe y que corresponden a ambientes de meteorización (fosfatos secundarios).

Los principales minerales de fosfato del grupo de la apatita son:

- Fluorapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$), principalmente asociado a rocas ígneas, por ejemplo, carbonatitas y piroxenitas biotíticas.
- Hidroxi-apatita ($\text{Ca}_{10-x-y}\text{NaxMgy}(\text{PO}_4)_6-z(\text{CO}_3)_z\text{F}_{0.4}z\text{F}_2$), encontradas principalmente en depósitos biogénicos de huesos, pero también en ambientes ígneos y metamórficos.
- Carbonato- hidroxiapatita - ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$), comúnmente encontrada en islas y cuevas, como parte del guano de pájaros y murciélagos.
- Francolita ($\text{Ca}_{10-x-y}\text{Nax}(\text{PO}_4)_6z(\text{CO}_3)_z\text{F}_{0.4}\text{F}_2$), predomina en ambientes marinos. En la

fórmula francolita "x" va desde 0-0.35, "y" va desde 0-0.14 "y" "z" va desde aproximadamente 1.26 (McClellan and Lehr 1969)

Los ambientes geológicos con rocas fosfóricas en concentraciones comerciales se clasifican en:

- sedimentarios marinos, principalmente poco profundo
- ígneos, mayormente asociada con complejos alcalinos
- guano y relacionados con el guano

Los depósitos sedimentarios de fosfatos, también conocidos como fosforitas, se encuentran en muchas regiones del mundo. Constituyen el más grande y fácilmente extraíble recurso de rocas fosfóricas. Las fosforitas se forman en ambientes marinos poco profundos, en plataformas cerca de la costa.

Los depósitos de fosfatos de origen ígneo forman aproximadamente un 10-15% de los recursos de fosfatos globales. Los principales yacimientos en explotación, se encuentran en Rusia, Sud Africa, Brasil y Finlandia. Las típicas asociaciones económicas vinculadas a rocas ígneas son: a) complejos de biotita - piroxenita y b) complejos de Anortosita-Gabbro

Los recursos de rocas fosfóricas ígneas asociadas con carbonatitas se encuentran principalmente en cortezas continentales estables, y sólo muy raramente en secuencias con plegamientos. Las carbonatitas se encuentran principalmente a lo largo de zonas de rift o zonas de fallas repetidamente activadas (van Straaten, 1989) y a lo largo de extensiones de fallas transformantes.



Figura II-3. Distribución de los principales depósitos de fosfato, potencialmente económicos del mundo (fuente: van Straaten, en preparación).

Muchos de los grandes depósitos de fosfatos de origen ígneo en países tropicales, como Brasil, Uganda, Sri Lanka, Mozambique, y Gabón aparecen en ambientes de meteorización. En estos casos, los extensos depósitos de fosfatos de baja ley son extraídos de los suelos o regolitos que están sobre las carbonatitas y otros depósitos de fosfatos ígneos, por ejemplo en Brasil. La erosión tropical de carbonatitas, por ejemplo, resulta en la descomposición y lixiviación de los minerales más solubles tales como carbonatos, dejando apatita, magnetita y otros óxidos de hierro como material residual.

En el pasado, las rocas fos-

fóricas no procesadas eran a menudo aplicadas directamente a los suelos, pero con resultados diversos. Algunas de las rocas fosfóricas, especialmente las francolitas muy sustituidas por carbonatos, mostraban una efectividad agronómica muy buena, particularmente en suelos deficientes en Ca. Mientras que la respuesta dada por los cultivos por la fertilización con rocas fosfóricas sedimentarias de Carolina del Norte, Túnez y Perú sobre suelos ácidos tropicales es comparable a superfosfato triple (Fig. II-4), en cambio la respuesta dada por la fluorapatita de origen ígneo (por ejemplo en las carbonatitas Jacupiranga, Catalao, Tapira en Brasil) es comúnmente demasiado baja para ser económicamente viable y de interés para los agricultores. (Fig. II-4)

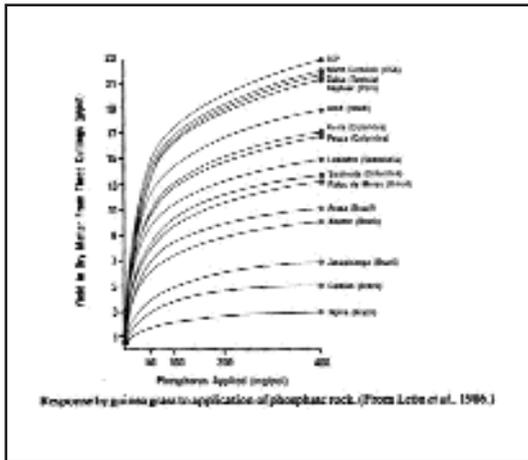


Figura II-4. Respuesta de "guinea grass" a la aplicación de distintas rocas fosfóricas (modificado de León et al.

En la industria de los fertilizantes, los superfosfatos se producen por medio de la reacción de rocas fosfóricas con ácidos, principalmente ácido sulfúrico y ácido fosfórico. El superfosfato simple se produce por la reacción de la roca fosfórica con ácido sulfúrico (H_2SO_4). El superfosfato contiene aproximadamente 30% de $Ca(H_2PO_4) \cdot H_2O$, aproximadamente 45% de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), alrededor de 10% de bifosfato de calcio ($CaHPO_4$), 10% de óxido de hierro, sílice y silicatos de aluminio, y aproximadamente 5% de agua. La producción de superfosfato triple requiere la reacción de roca fosfórica con ácido fosfórico. En años recientes, hay una tendencia a producir fertilizantes de N y P combinados, por ejemplo el fosfato mono-amoniaco (MAP) y el di-amoniaco (DAP), ambos productos de la reacción de amoniaco con ácido fosfórico.

Las rocas fosfóricas son recursos finitos no renovables. En 2004, la producción mundial de roca fosfórica fue de 138 millones de toneladas métricas (US Geological Survey, 2005). Los principales países productores en función del porcentaje de la producción total son: USA (26%), China (18%), Marruecos y Sahara Occidental (17%), Rusia (8%), Túnez (6%), Jordania (5%), Brasil (4%) e Israel (2%). La estimación de reservas y recursos de roca fosfórica son altamente variables. Las reservas globales (depósitos que pueden ser extraídos con ganancias bajo las condiciones económicas y técnicas actuales) se estiman según US Geological Survey (2005) en 18 billones de toneladas de roca fosfórica. Los recursos globales, reservas probadas más todos los demás recursos minerales que podrían estar disponibles, están en los 50 billones de toneladas (US Geological Survey, 2005). Esto significa que bajo las actuales condiciones técnicas y económicas, y con la actual cantidad de producción de roca fosfórica, las reservas durarían por 130 años aproximadamente. Sin embargo, se anticipa que en función del aumento de los precios de la roca fosfórica, algunos de los recursos conocidos se convertirán en reservas y el tiempo de vida de las rocas fosfóricas se incrementaría tremendamente.

Potasio

El rol del potasio (K) en las plantas es de naturaleza principalmente reguladora, tal como activación de enzimas para promover el metabolismo de carbohidratos, para promover el metabolismo de nitrógeno y síntesis de proteínas. El potasio es también necesario para proveer las condiciones para un mejor uso del agua, y para controlar y regular las actividades de varios nutrientes esenciales. La disponibilidad del potasio incrementa la resistencia de algunas plantas a ciertas enfermedades.

Las sales de potasio (en la industria del fertilizante se utiliza la denominación potasa) proveen el principal recurso para producir fertilizantes de K y químicos de K. La sal soluble de K más común es la silvita, cloruro de K (KCl), que también se conoce en las comunidades agrícolas como "muñato de potasa" (MOP). Otras sales solubles de K que encontramos naturalmente incluyen la langbeinita $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$, así como carnalita ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) y kainita ($4KCl \cdot 4MgSO_4 \cdot 11H_2O$). Casi todos los recursos de potasio se derivan de recursos evaporíticos, es decir originados por la evaporación de agua de mar o en salmueras en lagos secos o en salares en climas áridos.

Tanto como el gas natural para la fabricación de fertilizantes nitrogenados, y como las rocas fosfáticas, las sales que contienen potasio son finitas, esto es, recursos no renovables. En 2004, la producción total de potasa fue de 30 millones de toneladas de K_2O equivalente (US Geol. Survey 2005). Los principales productores de potasa son Canadá, Rusia, Bielorrusia y Alemania, seguidos por Israel, Jordania y los EEUU.

Las reservas globales de potasa se estiman en 8.3 billones de toneladas de K_2O equivalente.

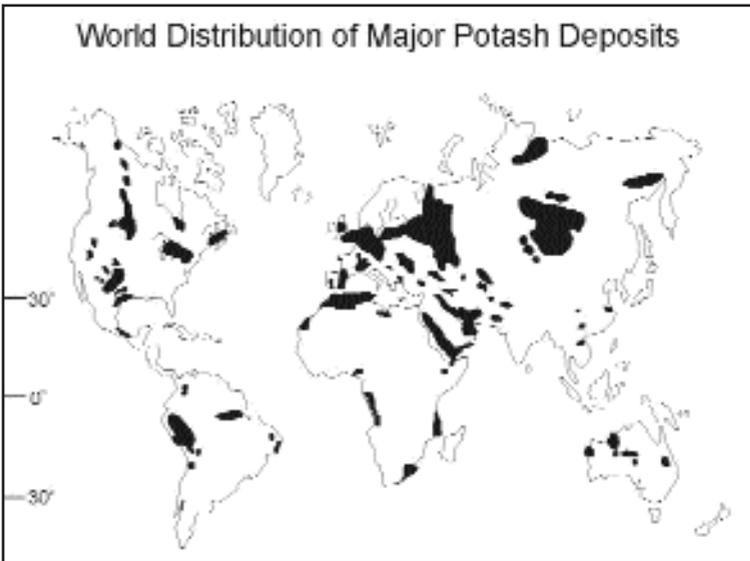


Figura II-5. Distribución de los principales depósitos de K en el mundo (fuente: Adams 1975).

Según el US Geological Survey, los recursos globales son de aproximadamente 250 billones de toneladas de K_2O (US Geological Survey 2005). Basado en los valores de las reservas probadas y considerando la actual tasa de producción, las reservas excederían los 270 años. Sin embargo, si se tomaran en cuenta los recursos, el tiempo de vida sería de varios miles de años.

Los depósitos ricos en potasio se encuentran en varias partes del mundo (Fig. II-5). Los más grandes depósitos de sales de potasio se originaron en mares epiconti-

mentales, (mares poco profundos, intracratónicos o cercanos a los continentes), por ejemplo en Canadá, en los EEUU y en Europa. Otros depósitos de K están relacionados a ambientes de rift, como por ejemplo en Israel y Jordania, y ambientes de lagos internos, como es el caso de los "salares" de Chile.

Un interesante conjunto de depósitos puede localizarse en ambos lados del Atlántico Sur, fuera de la costa de Brasil y en la cuenca de Gabón-Congo-Angola en África Occidental (de Ruitter 1979, Rona, 1982). Estudios geológicos detallados revelaron que estos depósitos de potasa fueron co-etáneos. Fueron formados en ambientes de rift durante los primeros estadios de la separación de los dos continentes, cuando el agua de mar invadió la abertura del Rift del Atlántico Sur (Rona, 1982).

En Sudamérica, los depósitos de sal de K asociados con evaporitas se encuentran en el margen pasivo este del continente, y en los salares a lo largo de los Andes.

Azufre, sulfatos y sulfuros

El azufre (S) se requiere en las plantas para la formación de aminoácidos y, específicamente, para la síntesis de tres aminoácidos: cistina, cisteína y metionina, estructuras básicas para la biosíntesis de proteínas. Aproximadamente el 90% del S en las plantas se encuentra en proteínas. Además, el azufre es esencial para la formación de vitaminas (ej. Vitamina B₁₂) y aceites tales como glucósido, que se encuentra en las cebollas, el ajo y las crucíferas. Las plantas tales como colza o mostaza, requieren más de 50 kg de S por hectárea y por año, y cultivos que producen una alta cantidad de materia orgánica, tales como la caña de azúcar, también pueden también requerir cantidades sustanciales de S (Mengel and Kirby 2001).

Las tres sustancias naturales sólidas que contienen S y pueden ser usadas para reponer S al suelo, son el azufre elemental (S⁰), los sulfuros (S²⁻) y los sulfatos (SO₄²⁻). El azufre nativo, puro, precipita en áreas volcánicas en la forma de S elemental, principalmente como sublimación en la superficie, como costras, impregnaciones y rellenos en vesículas en depósitos de lava y de toba. La precipitación del S elemental por condensación de los gases que tienen S es común cerca de centros volcánicos. Los depósitos volcánicos de S son generalmente pequeños y han sido explotados en escala local con técnicas físicas relativamente simples, fundidos en cubas y concentrados para eliminar impurezas.

Como resultado de reducción biológica, el S elemental se encuentra también en depósitos de yeso, o en secuencias estratificadas o en asociación con domos salinos.

En años recientes, grandes cantidades de S elemental se han recuperado como subproducto del refinado de petróleo, del procesamiento del gas natural y de las plantas de coque. El llamado "gas ácido", H₂S, que tiene un olor característico a "huevo podrido" es un subproducto del procesamiento del gas natural. El subproducto S elemental se recupera sacándole las impurezas de S al gas ácido. En 2003, aproximadamente 90% de la producción mundial de azufre se originó en el procesamiento de subproductos (US Geol. Survey 2004).

Además del azufre elemental hay grandes recursos de sulfatos en la forma de sulfatos de calcio,

yeso y anhidrita. El yeso y su forma anhidra, la anhidrita, ocurren naturalmente en sedimentos de evaporación que se acumularon en cuencas marinas y, en proporción menor, en ambientes de lagos internos, bajo condiciones áridas. La anhidrita y el yeso se encuentran también en domos salinos, los llamados "cap-rocks". Pero el yeso no se extrae solamente del recurso natural. En años recientes, grandes cantidades de yeso secundario se han producido a partir del procesamiento de roca fosfórica, como "fosfo-yeso", y como subproductos de plantas energéticas y de procesamiento de sulfuros.

Aparte del S elemental y de los sulfatos hay otros recursos geológicos que contienen S, por ejemplo, los sulfuros. El sulfuro más común es la pirita (FeS_2), que se encuentra en distintos ambientes geológicos, incluyendo los volcanogénicos, los hidrotermales y los sedimentarios. Hay pocos depósitos de pirita en el mundo de donde sólo se explote este mineral. Mayormente, la pirita es un subproducto de la extracción y procesamiento de Cu-Zn-Pb y de vetas de oro (piritas de flotación) y de mejorar los carbones ricos en azufre (piritas de carbón).

Calcio y Magnesio

El calcio (Ca) juega un papel crucial en la nutrición de organismos vivos. En la nutrición de las plantas, el calcio es esencial para estabilizar las células. El calcio activa o inhibe ciertas enzimas y controla la actividad de la raíz. Tiene que ver en la producción de nuevos puntos de crecimiento, tales como las puntas de las raíces. El magnesio (Mg) ocupa el centro de la molécula de la clorofila y es esencial para la fotosíntesis. También el magnesio se requiere en un número de enzimas asociadas con la transferencia de energía y es esencial para la síntesis de las proteínas. La disponibilidad de suficiente Mg es a menudo responsable del consumo y utilización del fósforo.

Los recursos de calcio y magnesio ocurren en muchas formas y en muchos lugares. La mayoría de los recursos de Ca y Mg usados en agricultura están en su forma natural como calizas y dolomitas (cuadro II-1). Por otra parte, algunos recursos de Ca y Mg se obtienen de procesar otros minerales, tal es el caso de los subproductos del procesamiento del fosfato, fosfo-yeso o yeso, o del procesamiento de combustible fósil que alimenta generadores eléctricos (gas fluido del yeso desulfurizado-FGDG). Las calizas y las dolomitas constituyen un grupo de rocas carbonáticas con variados contenidos de calcio y magnesio. En uno de los extremos, están las rocas que contienen más del 90% de dolomita, y en el otro, las piedras calizas conteniendo más de 90% de calcita. Entre los dos extremos están las dolomitas cálcicas y las calizas dolomíticas. Las rocas carbonáticas sedimentarias pueden también contener variables cantidades de impurezas, principalmente silicatos.

Hay varios tipos de piedra caliza: las calizas sedimentarias estratificadas y las calizas masivas, las calizas dolomíticas, las dolomitas cálcicas y las dolomitas. El término mármol se usa para la caliza o dolomita metamórfica, usualmente de grano grueso. Asimismo en el núcleo de los complejos de carbonatitas suelen presentarse acumulaciones de carbonato de origen ígneo. Otras rocas con contenidos de Ca y Mg son el travertino, las tobas, las margas y la magnesita. Las calizas y dolomitas se encuentran tanto como rocas sedimentarias y como en sedimentos metamorfoseados. Los carbonatos ígneos, por ejemplo las carbonatitas, son relativamente raros. Debido a su característica meteorización, no son fáciles de detectar bajo la cubierta de sedimentos glaciales, (en climas fríos) o en terrenos tropicales altamente meteorizados.

Mineral	CaO%	MgO%	S%
Calcita [CaCO ₃]	56		
	30.4	21.9	
Dolomita [CaMg(CO ₃) ₂]			23.5
	41.2		18.6
Anhidrita [CaSO ₄]	32.6		
Yeso [CaSO ₄ · 2H ₂ O]	55.8		
Apatita [Ca ₁₀ (PO ₄) ₆ F ₂]	48		23
		29	13

Cuadro II-1. Formas minerales naturales de calcio y magnesio, y del azufre.

Las calizas y dolomitas constituyen aproximadamente el 15% de todas las rocas sedimentarias del mundo (Carr y Rooney, 1983). Se presentan en terrenos desde el Precámbrico al Reciente. Geológicamente, la mayor parte de las calizas se originaron en ambientes marinos de escasa profundidad, cálidos y claros, por ejemplo ambientes de plataforma o ambientes arrecifales carbonáticos.

Otro recurso importante de Ca es el yeso (land plaster o yeso terroso) que se usa en agricultura por sus contenidos de Ca y sulfato y para mejorar los suelos física y biológicamente. Las principales aplicaciones del yeso en la agricultura son: como fuente de Ca, y de S para el crecimiento de las plantas, pero también se aplica para mejorar físicamente suelos sódicos y arcillosos pesados, y como mejorador de acidez del subsuelo y de la superficie. Otras aplicaciones, menos comunes, son para reducir la volatilización del amoníaco (Termeer y Warman, 1993), como un sustrato para abono de hongos con particular énfasis en reducir la pérdida del amoníaco (Gerrits, 1977), y como fungicida para controlar las enfermedades de las raíces, por ejemplo, las de las semillas de la palta. (Messenger et al., 2000)

Micronutrientes

Los micronutrientes como Fe, Mn, Zn, Cu, B y Mo y Cl son importantes para el crecimiento de las plantas en un número de sistemas enzimáticos que actúan como catalizadores, promoviendo reacciones orgánica-orgánica y orgánica-inorgánicas. La eficiencia de las enzimas depende de la disponibilidad de micronutrientes junto con condiciones ambientales favorables tales como adecuado pH, temperatura, humedad y otros factores. Los micronutrientes juegan un importante papel en la fijación simbiótica del nitrógeno. Además de la disponibilidad de un inóculo, las plantas leguminosas requieren nutrientes tales como P, K, Ca y S, así como pequeñas cantidades de Co, Mo y Fe que se necesitan para "fijar" el nitrógeno. La concentración de micronutrientes del suelo es una función de muchos factores, incluyendo la disponibilidad de micronutrientes en fase acuosa (especiación), pH y otros constituyentes del suelo como la arcilla, materia orgánica y óxidos de Fe y Mn. Las propiedades de estos "nutrientes" dependen mucho del pH.

Las fuentes de los micronutrientes inorgánicos son predominantemente minerales de rocas íg-

neas, metamórficas o sedimentarias. Las sales de los micronutrientes son relativamente raras, con la excepción de los boratos, que ocurren en evaporaciones de salinas. Los micronutrientes en minerales de silicato no están distribuidos de manera pareja en las rocas comunes. Algunos tipos de rocas contienen concentraciones más altas que otros. Por ejemplo, las rocas basálticas contienen concentraciones más altas de los micronutrientes Cu, Co, Zn y Fe que las graníticas. En ambientes graníticos la presencia de Mo como micronutriente es mayor. Las concentraciones más grandes de micronutrientes se encuentran comúnmente en pizarra negra.

Rocas silicáticas multi-nutrientes

En los últimos años se ha prestado atención al uso de rocas silicáticas como multinutrientes geológicos de bajo costo para el desarrollo de la agricultura. Una mejor comprensión de las características composicionales de "minerales y rocas" potencialmente fértiles, de nuevas técnicas de modificación para mejorar la disolución de los minerales, así como una mejor comprensión de la interacción entre estas rocas y suelos adecuados y receptivos, han dado renovados ímpetus para utilizar estos recursos. Distintos ejemplos de aplicación de rocas basálticas, así como de silicatos considerados "desperdicios" en minas de vermiculita y la utilización de vulcanitas ultra potásicas friables, muestran que estos recursos pueden ser usados exitosamente sobre suelos no fértiles. La combinación de estos recursos de silicatos multinutrientes con residuos orgánicos tiene un buen potencial para mejorar la fertilidad del suelo, especialmente en suelos muy ácidos e infértiles.

Minerales y Rocas Especiales

Estas incluyen la perlita, la piedra pómez, la vermiculita y las zeolitas. Estos recursos se usan en algunas partes del mundo en agricultura y horticultura para mejorar la calidad y cantidad de los cultivos, frutas, vegetales, flores y otros productos. Particularmente la industria de los invernaderos está usando cada vez más estas rocas y minerales. Hay millones, probablemente billones de plantas que crecen cada año en recipientes en donde se incorporan minerales como sustratos, tanto macetas, campos deportivos o lugares restringidos como jardines en las terrazas y otros espacios. Estos medios de crecimiento ofrecen varias ventajas sobre los convencionales: son homogéneos, están libres de enfermedades e insectos, y casi siempre son de poco peso. Además, la fertilización y el uso del agua pueden ser controlados externamente. Los medios de crecimiento dan anclaje para el crecimiento de raíces, buena aireación, y capacidad de mantener el agua. Entre los ingredientes comunes de crecimiento sin suelo están la turba, perlita, vermiculita y en algunas operaciones, piedra pómez. La aplicación de zeolitas en agricultura se restringe al uso como aditivo del alimento de los animales, como aditivo al suelo y al abono, como transportadores de pesticidas y herbicidas, y como sustrato en macetas. Las zeolitas cargadas de amoníaco han sido testeadas exitosamente también por su habilidad de incrementar la solubilización de minerales de fosfato (Lai and Erberl 1986), llevando a una mejora en el ingreso de fósforo.

Grandes recursos de pómez y perlita se encuentran en ambientes volcánicos jóvenes (Terciarios y más jóvenes) en las márgenes de placas activas, como es el caso de regiones de América Central y del Sur. Estos materiales rocosos se encuentran asociados espacialmente con vulcanismo rico en sílice. Los mayores depósitos de zeolitas naturales se encuentran principalmente

en áreas volcánicas y en playas donde los vidrios ricos en sílice reaccionaron con soluciones alcalinas.

Los recursos de vermiculita están restringidos a zonas de meteorización ricas en carbonatitas y biotitas, por ejemplo, biotita-piroxenita. Las concentraciones económicas de vermiculita se encuentran fundamentalmente en el ambiente de escudos.

El marco geológico de los recursos agrominerales.

La abundancia de agrominerales y rocas no tiene una distribución uniforme en espacio y tiempo en la superficie terrestre. Se presentan en marcos geotectónicos específicos y se originaron en períodos también específicos. Mathers (1992) presenta una descripción del potencial de minerales no metálicos o "minerales industriales" en Centroamérica. Agrupa la geología de Centroamérica en terrenos o dominios, y describe características y asociaciones predecibles de minerales industriales, incluyendo agrominerales, que ocurren en cada uno de los ambientes geológicos.

Los agrominerales pueden ser clasificados en aquellos asociados con ambientes ígneos y los encontrados en ambientes sedimentarios. Los agrominerales relacionados a actividades ígneas, principalmente volcanismo, son el azufre, la perlita, la piedra pómez, y, en algunos casos, las zeolitas. Los agrominerales asociados a acumulaciones sedimentarias incluyen los nitratos, los fosfatos, las sales de K, los sulfatos, los carbonatos y varios elementos residuales, tales como los boratos. Los agrominerales asociados con carbonatitas y complejos alcalinos son rocas fosfáticas, carbonatos y vermiculita.

La diversidad de agrominerales difiere de un terreno geológico a otro. Algunos responden a cinturones lineales, por ejemplo, el azufre volcanogénico, la perlita y la piedra pómez en los cinturones volcánicos andinos. Los fosfatos ígneos y la vermiculita asociados con pequeños cuerpos de carbonatitas ocurren alineados a lo largo de zonas de fallas. Otros recursos agrominerales son más comunes, y presentan ampliamente distribuidos como es el caso de los carbonatos de origen sedimentario.

La distribución temporal de agrominerales no es tampoco pareja, su formación se extiende del Precámbrico al Reciente. Gran parte de las dolomitas y las relativamente raras rocas fosfóricas sedimentarias en el ambiente continental fueron formadas durante el Precámbrico.

Los principales fosfatos ígneos relacionados con carbonatitas y muchos de los carbonatos y sulfatos fueron asignados al Mesozoico. Gran parte de los recursos geológicos micronutrientes, azufre volcanogénico y minerales como perlitas, piedra pómez y zeolitas, se presentan solamente en rocas de caja relativamente jóvenes, de edad Terciaria o más joven.

La distribución de los nutrientes principales, identificando los minerales y rocas en un encuadre tectónico, se presenta en el Cuadro II-2

	Cinturon Andico (margen de placa activo) Lado oeste del continente	Plateau Central (placa continental)	Near-shore y off-shore Márgen pasivo Lado este del continente
Nutriente			
N	<i>Edad: Mesozoico y más joven</i> Nitratos; guano; (sedimentos químicos y biológicos. Neógeno a Cuaternario Gas natural para producción de N	<i>Edad: Principalmente Precambrico; volcanismo rocas alcalinas Cretácico y más joven</i>	<i>Edad: Mesozoico y más joven</i> Gas natural para producción de N
P	Fosfatos sedimentarios	Fosfatos igneos asociados a carbonatitas (ppalmente; Fosfatos sedimentarios Precambriacos (subordinados)	
K	Cloruro de K y nitratos en salares	Silicatos ricos en pluma-relacionado con volcanismo ultralcalino (raro)	Salas de K en evaporitas ligados a márgenes pasivos
S	S ² (volcanogenico); Yeso/anhidrita en el Jurásic, Cretácico inferior, Neógeno evaporitas		Yeso/anhidrita en el sedimentos transición y evaporita de márgenes pasivos
Ca, Mg	Calizas y coquina Dolomitas (Cretácico inferior),	Cinturones móviles y <i>greenstone belts</i> ; carbonatos metamórficos incluyendo dolomitas y magnesitas Dolomitas y calizas en Cinturones móviles	Calizas sedimentarias
Micro-nutrientes	Micronutrientes (Cu, Mo, Zn etc.) in sulfuros relacionados a cobres porfiricos; Boratos en salares	Micronutrientes (Cu, Zn etc.) en depósitos de sulfuros en <i>greenstone belts</i>	
Minerales Especiales	Perlita; pumicita; zeolita, asociada a volcanismo silicico del Neógeno Cuaternario	Vermiculitas en ambientes de meteorización, asociado con carbonatitas	

Cuadro II-2 . Diversidad Agromineral en Sudamérica en el contexto tectónico

Conclusiones

Los suelos son esenciales para la producción de alimentos. La distribución de suelos productivos está ampliamente influenciada por factores climáticos y las rocas subyacentes. La distribución de "rocas fértiles" no es uniforme está muy relacionada a la tectónica de placas.

Con la excepción del N todos los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas son derivados de recursos geológicos. Pequeñas cantidades de nitratos se encuentran como recurso minero, pero la mayor parte del nitrógeno usado en la industria del fertilizante es fijado del aire. El gas natural, un recurso geológico no renovable, es la fuente de energía principal para la producción de amoníaco sintético. Todos los recursos geológicos proveedores de nutrientes son re-

cursos finitos y no renovables. Según las actuales tasas de extracción, la mayoría de los recursos geológicos fuentes de nutrientes agrícolas durarán varios cientos de años. La energía requerida para extraer estos nutrientes a partir del recurso o para fijar industrialmente el nitrógeno del aire, es variable. La economía de la fijación de nitrógeno industrial está relacionada a la disponibilidad y al precio del gas natural. La abundancia y la geodiversidad de los minerales para la agricultura no están uniformemente distribuidas en tiempo y espacio, su acumulación está relacionada de modo importante con locaciones específicas y periodos específicos.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS SS 1975. Potash. In: Lefond SJ (editor) *Industrial Minerals and Rocks*, 4th edition. AIME, New York, pp. 963-990.
- CARR DD AND ROONEY LF 1983. Limestone and dolomite. In: Lefond SJ (editor). *Industrial minerals and rocks* 5th edition. AIME, New York, pp. 833-868
- de Ruiter PAC 1979. The Gabon and Congo Basins Salt Deposits. *Econ. Geol.* 74:419-431.
- ERICKSEN GE 1981. Geology and origin of the Chilean nitrate deposits. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 1188. 37p.
- FYFE WS 1989. Soil and global change. *Episodes* 12:249-254.
- FYFE WS, Kronberg BI, Leonardos OH and Olorunfemi N 1983. Global tectonics and agriculture: a geochemical perspective. *Agr. Ecosyst. Env.* 9:383-399.
- GERRITS JPG 1977. The significance of gypsum applied to mushroom compost, in particular in relation to the ammonia content. *Netherl. J. Agric. Sci* 25:288-302.
- LÉON LA, FENSTER WE AND HAMMOND LL 1986. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Peru and Venezuela. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:798-802.
- MATHERS SJ 1992. The potential for development of industrial minerals in Central America. *British Geol. Surv. Tech. Rep.* WC/92/55, Keyworth Nottingham, UK, 60p.
- MCCLELLAN GH AND LEHR JR 1969. Crystal chemical investigation of natural apatites. *Am. Mineralogist*, 54:1374-1391.
- MENGEL K AND KIRKBY EA 2001. *Principles of plant nutrition* (5th edition). Kluwer Academic Publ. Dordrecht, Netherlands, 849p.
- MESSINGER BJ, MENGE JA AND POND E 2000. Effects of gypsum soil amendments on avocado growth, soil drainage, and resistance to *Phytophthora cinnamomi*. *Plant Dis.* 84:612-616.
- RONA PA 1982. Evaporites at passive margins. In: Scrutton RA (editor) *Dynamics of passive margins*. *Am. Geophys. Union and Geol. Soc. Am. Geodynamics Series* 6:116-132.
- TERMEER WC AND WARMAN PR 1993. Use of mineral amendments to reduce ammonia losses from dairy-cattle and chicken-manure slurries. *Bioresource Techn.* 44:217-222.
- VAN STRAATEN P 1989. Nature and structural relationships of carbonatites from Southwest and West Tanzania. In: Bell (editor) *Carbonatites, genesis and evolution*. Unwin Hyman, London, 177-199.
- VAN STRAATEN P, IN PREPARATION. *AGROGEOLOGY - the use of rocks for crops*, 356p.
- US GEOLOGICAL SURVEY 2004. Commodity statistics and information. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>
- US GEOLOGICAL SURVEY 2004. Commodity statistics and information. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>