

RECURSOS MINERALES Y SALUD

Mineral resources and health

Manuel Pozo (*) y María Isabel Carretero (**)

RESUMEN

La influencia de los recursos minerales en la salud humana tiene un aspecto beneficioso y otro perjudicial. Entre los efectos beneficiosos se encuentra el empleo de los minerales en la industria farmacéutica, en aplicaciones médicas y en la elaboración de barro termal para balnearios. Los efectos nocivos tienen su origen en la composición química de los minerales y en la textura (tamaño y morfología) de sus partículas, de gran importancia por su repercusión social y económica. Se describen los efectos en la salud humana de los principales elementos tóxicos (As, Se, Cd, Pb, Hg, F), de los minerales radiactivos y de las enfermedades producidas por la inhalación de partículas minerales (neumoconiosis y cáncer).

ABSTRACT

The effect of mineral resources on human health has two different aspects: beneficial and other harmful. Among beneficial effects are minerals used in pharmaceutical industry, medical applications and manufacture of thermal mud for spas. Harmful effect has its origin in both the chemistry and texture (size and shape) of mineral particles, being especially important because their social and economic repercussion. The effect on Human Health of main toxic elements (As, Se, Cd, Hg, Pb, F), radioactive minerals and the diseases caused by mineral particle inhalation (pneumoconiosis and cancer), are described.

Palabras clave: *elementos tóxicos, neumoconiosis, asbestos, salud humana*

Keywords: *toxic elements, pneumoconiosis, asbestos, human health*

INTRODUCCIÓN

La existencia de una completa interrelación entre el medio ambiente y el bienestar de los seres vivos es un hecho incuestionable, y de especial relevancia por su influencia en los seres humanos. En este sentido, los recursos minerales, componente principal del medio físico, pueden ser los responsables de provocar efectos beneficiosos o perjudiciales en la salud humana; por lo que la relación entre procesos o actuaciones que afectan al medio ambiente y su repercusión en la salud, es evidente (Carretero y Pozo, 2007).

En relación con la salud humana, los recursos minerales aportan un efecto netamente positivo cuando se utilizan en la elaboración de preparados farmacéuticos (como principios activos o excipientes), en algunas aplicaciones médicas y en la preparación de “barros” termales en centros terapéuticos de base hidroterapéutica, como los balnearios (Galán *et al.*, 1985; Carretero, 2002; Gomes y Silva, 2006; Carretero *et al.*, 2006). También se puede considerar como efecto beneficioso la ingesta voluntaria de arcillas y suelos arcillosos (geofagia), que se realiza en algunas culturas del planeta.

Los minerales empleados en Farmacia solo requieren de un control de calidad de las materias primas, aunque en algunos casos, la exigencia de una gran pureza o adecuado tamaño de partícula, hace

necesaria la obtención de sus análogos sintéticos en el laboratorio. En el caso de los “barros” termales madurados (peloides) existen, actualmente, líneas de investigación activas, donde mediante ensayos de laboratorio se optimizan sus propiedades termoterápicas y fisico-químicas para la aplicación en pacientes con diversas patologías (Carretero y Pozo, 2007; Veniale *et al.*, 2007).

Por su repercusión social y económica, en la actualidad los aspectos más emergentes en la investigación sobre la interacción entre minerales y salud son aquellos relacionados con el riesgo potencial que pueden representar los mismos, bien sea como resultado de la inhalación o ingestión de sus partículas, y/o como resultado de la liberación de especies iónicas tóxicas que pasan al agua y al suelo. En ambos casos intervienen los procesos naturales, pero también la actividad antropogénica durante las labores de exploración, explotación y tratamiento de los recursos minerales, que incluyen tanto menas metálicas, como minerales y rocas industriales.

Mineralogía aplicada y salud

El desarrollo más temprano de la obtención de los recursos minerales nos llevaría a la Prehistoria y a la antigüedad más remota. Así, el avance de la humanidad aparece ligado a la obtención y utilización de determinados materiales constituyentes de la de-

(*) Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid. manuel.pozo@uam.es

(**) Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla, Apdo. 553, 41071 Sevilla. carre@us.es

nominada industria lítica (silex y obsidiana, entre otros), de las arcillas cerámicas y de las piedras preciosas o gemas. Un estadio más avanzado se alcanzó con las técnicas de tratamiento mineral para la obtención de metales como hierro, cobre, plata y estaño, y la elaboración de aleaciones como el bronce y el acero. En todos estos casos se estaban realizando actividades de lo que en la actualidad conocemos como Mineralogía Aplicada (Galán, 2003).

En relación con la salud humana, la Mineralogía Aplicada (Fig.1) interviene en el empleo óptimo de los minerales (o sus análogos sintéticos) como principios activos y excipientes en productos farmacéuticos, o en aplicaciones médicas, terapéuticas y estéticas (Galán *et al.*, 1985; Bolger, 1995; Lefort des Ilounzes *et al.*, 2007). La interacción entre los minerales y la salud no es siempre beneficiosa, de manera que la Mineralogía Aplicada debe analizar, evaluar y dar soluciones a la problemática provocada en la salud por las emisiones de partículas, la contaminación por metales pesados y otros elementos tóxicos o por la presencia de compuestos radiactivos, todos ellos originados durante las labores mineras o en plantas de tratamiento (Vaughan y Wogelius, 2000).

La influencia negativa de factores medioambientales en la salud humana ha dado lugar recientemente a la ciencia denominada Geología Médica (Komatina, 2004; Selinus *et al.*, 2005) de la que se derivan la Mineralogía y Geoquímica Médica (Sahai y Schoonen, 2006; Sahai, 2007).

El término Geología Médica fue propuesto y aceptado en 1997 durante la celebración en Denver

(EE.UU) del “Fourth Symposium on Environmental Geochemistry”. Su definición es la siguiente: “*La Geología Médica es la ciencia que trata la relación entre los factores geológicos y la salud en el hombre y los animales, teniendo en consideración la influencia de los factores ambientales en la distribución geográfica de los problemas de salud*”.

Se trata, pues, de una ciencia interdisciplinar emergente que tiene como objetivos: determinar la influencia de los procesos geológicos en el origen y flujo de partículas nocivas o elementos tóxicos, que llegan a los seres vivos por diversas vías como la comida, el aire, el suelo o el agua. En algunos casos la Geología Médica no sólo aborda el estudio de los efectos nocivos provocados por un determinado elemento, sino las enfermedades o efectos que puede provocar su deficiencia.

Tal y como se deduce de lo anteriormente mencionado, parte de la Mineralogía Aplicada (ambiental) y de la Geología Médica pueden solaparse entre sí, y llegar a confundirse con la Geoquímica Ambiental (Eby, 2004).

El efecto de los minerales en la salud humana

Como ya se ha mencionado, la relación de los minerales con la salud humana presenta dos aspectos bien diferenciados, uno beneficioso y otro perjudicial (Fig.2). Esta relación se conoce desde la antigüedad, y así consta en antiguos textos chinos, egipcios o griegos, donde se describen tanto los beneficios terapéuticos de los minerales como los problemas de salud causados por ellos (Reinbacher, 2003). Es importante señalar que el paso

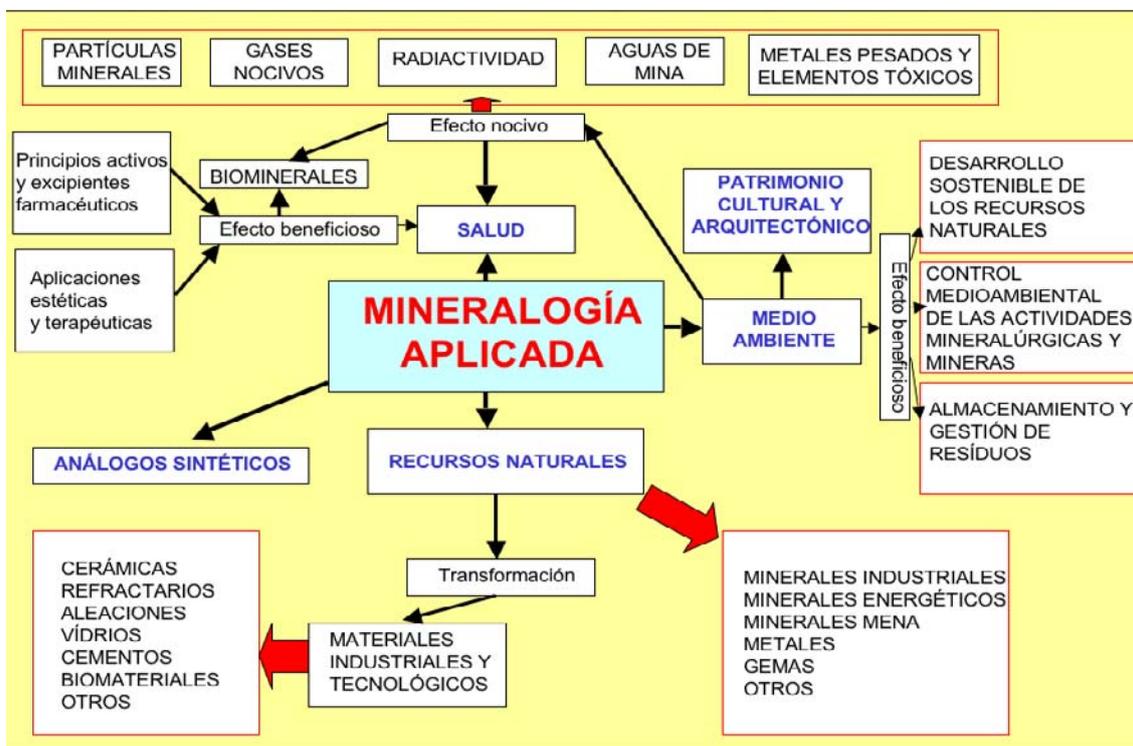


Fig. 1. Esquema con los diversos campos de actuación de la mineralogía aplicada. Se han resaltado los aspectos relacionados con la salud humana.

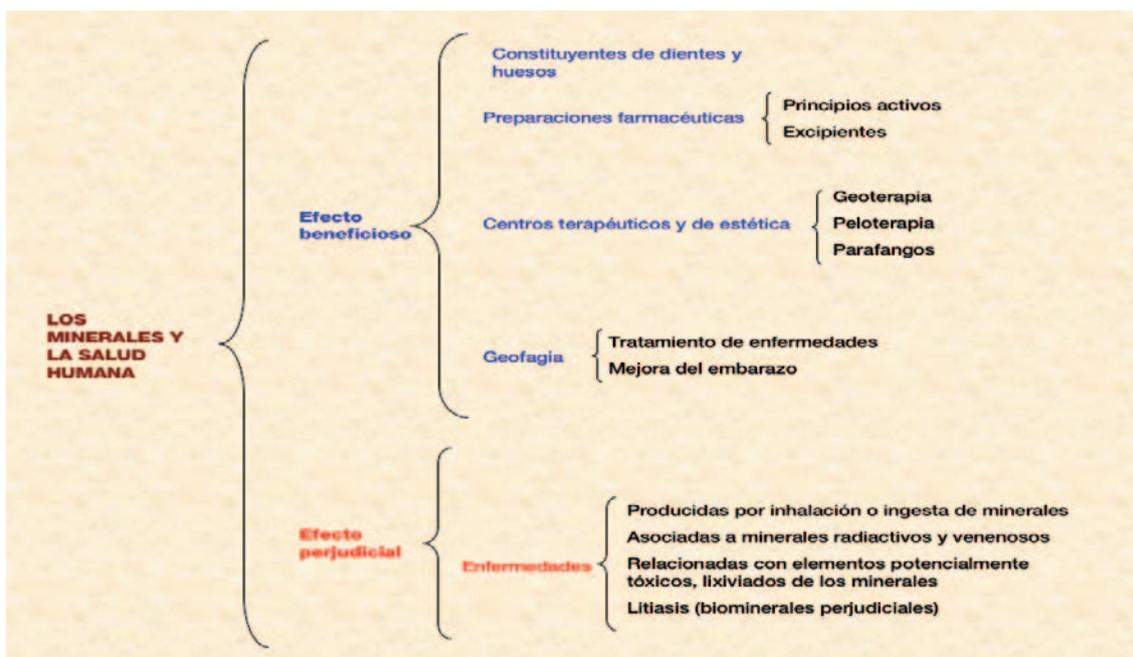


Fig. 2. Efectos beneficiosos y perjudiciales de los minerales en la salud humana.

del efecto beneficioso al nocivo es una delgada línea que se basa en la concentración. Efectivamente, como ya puso de manifiesto Paracelso (1493-1541): “todas las sustancias son venenos, no hay ninguna que no lo sea. La dosis correcta diferencia un veneno de un remedio”, afirmación que se convirtió posteriormente en la ley básica de la toxicología.

Aunque es evidente que hay un conjunto de elementos químicos que no sólo son beneficiosos, sino necesarios para los seres vivos (esenciales), también es cierto que, en determinadas concentraciones (a veces muy bajas), los niveles naturales de determinados elementos en sedimentos, suelos y aguas se pueden convertir en un riesgo ambiental, que conlleva, lógicamente, efectos nocivos (tóxicos) para la salud humana (Fergusson, 1990). En la figura

3 se muestra una tabla periódica en la que se recoge el carácter esencial o perjudicial (tóxico) de los elementos. Como puede observarse, determinados elementos pueden ser simultáneamente esenciales o perjudiciales, en función de la dosis suministrada (Selinus et al., 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007).

En el conjunto de los recursos minerales, los efectos beneficiosos o dañinos en la salud humana afectan tanto a silicatos como a no silicatos. Desde un punto de vista aplicado, muchos de estos minerales son, dentro de los recursos minerales, materias primas minerales en las que se incluyen tanto los minerales industriales como las menas, según se aprovechen sus propiedades físicas y físico-químicas o las sustancias que potencialmente se pueden extraer, respectivamente.

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	V	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	VV	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac																
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	E	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Esenciales
 Tóxicos

Fig. 3. Tabla periódica en la aparecen marcados los elementos esenciales y tóxicos para la salud humana (Carretero y Pozo, 2007).

Dentro de los silicatos se encuentran minerales de especial interés para la salud. En unos casos, por su efecto protector y beneficioso como sucede con algunos minerales de la arcilla (filosilicatos) y del grupo de las zeolitas (tectosilicatos). En otros casos, sin embargo, la inhalación de partículas formadas por asbestos (filosilicatos e inosilicatos) o cuarzo (tectosilicatos) y la ingesta de arcillas (filosilicatos) conteniendo elementos tóxicos, pueden producir daños orgánicos severos y enfermedades, a veces mortales.

A pesar de ser mucho menos abundantes que los silicatos (aproximadamente un 8% de la corteza terrestre), la mayoría del resto de los minerales son importantes desde el punto de vista industrial y económico. Así, en relación con la salud, diversos minerales no silicatados se emplean como principios activos y excipientes en productos farmacéuticos, principalmente carbonatos, óxidos e hidróxidos, sulfatos y cloruros (Galán *et al.*, 1985; Bolger, 1995; Lefort des Ilounzes *et al.*, 2007). Un ejemplo puede verse en la Tabla I donde se citan los minera-

les empleados como excipientes en la industria farmacéutica. Otros, sin embargo, pertenecientes a minerales mena o industriales, serán responsables de la liberación al medio físico (agua, suelo o aire) de elementos tóxicos o de partículas potencialmente nocivas, así como del origen del drenaje ácido de mina. Finalmente, no se debe olvidar que algunos minerales son fundamentales en la constitución de componentes esqueléticos de los seres vivos (biominerales) y en el desarrollo de biomineralizaciones perjudiciales (litiasis) (Skinner y Berger, 2003; Sahai y Schoonen, 2006).

En la actualidad adquiere especial relevancia, dentro de esta amplia temática, el análisis y evaluación de los efectos nocivos que determinados constituyentes de los recursos minerales pueden representar para la salud humana (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Sahai y Schoonen, 2006; Carretero y Pozo, 2007). Estos efectos nocivos se producen, principalmente, como resultado de la inhalación de partículas o de la ingestión de sustancias minerales de toxicidad

MINERAL	FORMULA QUÍMICA	USO COMO EXCIPIENTE
<i>Óxidos</i>		
RUTILO	TiO ₂	Pigmento
PERICLASA	MgO	Desecante, diluyente
HEMATITES	Fe ₂ O ₃	Pigmento
MAGHEMITA	Fe ₂ O ₃	Pigmento
MAGNETITA	Fe ₃ O ₄	Pigmento
<i>Hidróxidos</i>		
GOETHITA	FeOOH	Pigmento
<i>Carbonatos</i>		
CALCITA	CaCO ₃	Disgregante, diluyente
MAGNESITA	MgCO ₃	Disgregante, diluyente
<i>Sulfatos</i>		
YESO	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Diluyente
ANHIDRITA	CaSO ₄	Desecante
<i>Cloruros</i>		
HALITA	NaCl	Agente emulsionante y espesante
SILVINA	KCl	Agente emulsionante y espesante
<i>Fosfatos</i>		
HIDROXIAPATITO	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH)	Diluyente
<i>Filosilicatos</i>		
ESMECTITAS	Montmorillonita: (Al _{1,67} Mg _{0,33})Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ M ^{+0,33} Saponita: Mg ₃ (Si _{3,67} Al _{0,33})O ₁₀ (OH) ₂ M ^{+0,33} Hectorita: (Mg, Li) ₃ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ M ^{+0,33}	Disgregante, diluyente, agente emulsionante, espesante y antiapelmazante, corrector del sabor, portador-liberador de principios activos
PALYGORSKITA	(Mg, Al, Fe ³⁺) ₅ (Si, Al) ₈ O ₂₀ (OH) ₂ (OH ₂) ₄ · 4H ₂ O	
SEPIOLITA	Mg ₈ Si ₁₂ O ₃₀ (OH) ₄ (OH ₂) ₄ ·8H ₂ O	
CAOLINITA	(Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	Diluyente, agente emulsionante, espesante y antiapelmazante, corrector del sabor, portador-liberador de principios activos
TALCO	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Lubricante, diluyente, agente emulsionante, espesante y antiapelmazante, corrector del sabor, portador-liberador de principios activos
<i>Tectosilicatos</i>		
ZEOLITAS	Clinoptilolita: (Na,K) ₆ (Al ₆ Si ₃₀)O ₇₂ ·20H ₂ O	Portador-liberador de principios activos

Tabla I. Minerales empleados como excipientes en la industria farmacéutica.

variable, incluidos los elementos liberados al medio acuoso. De esta forma, según el efecto negativo ejercido en la salud humana, los recursos minerales se pueden clasificar en dos grandes grupos: a) recursos minerales cuyo efecto nocivo esta relacionado con su composición química, y b) recursos minerales cuyo efecto nocivo esta relacionado con la inhalación de sus partículas. Dentro del primer grupo se encuentran los minerales radiactivos y los que incluyen en su composición elementos potencialmente tóxicos, que pueden ser lavados o lixiviados por causas naturales o antropogénicas. El segundo grupo engloba fundamentalmente a varias familias de silicatos (Ross, 1981; Bignon, 1990; Guthrie & Mossman, 1993), que pueden producir efectos patógenos en el ser humano por inhalación.

EFFECTOS NOCIVOS RELACIONADOS CON LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MINERALES

La geoquímica del medio ambiente tiene una fuerte relación con la composición química de los recursos minerales de los que deriva, o con los que ha interactuado (Vaughan y Wogelius, 2000). Los elementos químicos (metales, metaloides y no metales) se incorporan al medio ambiente (medio físico y biosfera) y, por tanto, tienen efectos en la salud humana, a partir de procesos químicos que conducen a la alteración de los minerales durante la meteorización química. En la movilidad y concentración de los elementos influirá también el papel jugado por los seres vivos, especialmente el de los microorganismos (biogeoquímica). En otros casos, son las emisiones volcánicas las que, en episodios

explosivos, emiten al aire (o bajo lámina de agua) partículas de tamaño fino y gases de diversa composición. Ambos procesos, meteorización y vulcanismo, son formas naturales de suministrar elementos químicos al medio ambiente. Sin embargo, como ya se ha comentado previamente, el origen de los elementos en el medio ambiente no es solo natural, es evidente la superposición de una señal geoquímica de origen antropogénico desde época histórica.

El origen natural de los elementos

Los elementos químicos proceden del substrato sólido, la geosfera, siendo la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera depósitos temporales donde pueden sufrir cambios importantes. La interacción entre geosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera, determina el transporte y destino de los elementos químicos, entre ellos los metales. El abastecimiento de elementos a los ecosistemas biológicos depende del soporte físico (rocas y minerales) en el que se encuentran, de donde son recogidos en primer lugar por las plantas y, posteriormente, pasan a los animales.

Determinados elementos se presentan en contenidos altos en los minerales formadores de rocas, como es el caso de Si, Al, Ca, Na, K, Fe y Mg, otros lo hacen en bajas proporciones (elementos traza) pero con una elevada repercusión medioambiental cuando son liberados de las rocas que los contienen (Tabla II). Otros elementos ligados a los metales y metaloides tienden a concentrarse de forma más restringida en los yacimientos metálicos, donde con frecuencia se presentan como menas. Otra fuente natural de elementos son las emisiones

LITOLOGÍA	Cd	Cr	Cu	F	Pb	Mo	Se	Zn
Magmática ultrabásica	0-0,02 (0,05)	1000-3400 (1800)	2-100 (15)	-	(1)	(0,3)	(0,05)	(40)
Magmática basáltica	0,006-0,6 (0,2)	40-600 (220)	30-160 (90)	20-1060 (360)	2-18 (6)	0,9-7 (1,5)	(0,05)	48-240 (110)
Magmática granítica	0,003-0,18 (0,15)	2-90 (20)	4-30 (15)	20-2700 (870)	6-30 (18)	1-6 (1,4)	(0,05)	5-140 (40)
Lutitas y arcillas	0-11 (1,4)	30-590 (120)	18-120 (50)	10-7600 (800)	16-50 (20)	(2,6)	(0,6)	18-180 (90)
Lutitas carbonosas	0,3-8,4 (1,0)	20-200 (70)	20-200 (70)	-	7-150 (20)	1-300 (10)	-	34-1500 (100)
Calizas	(0,05)	(10)	(4)	0-1200 (220)	(9)	(0,4)	(0,08)	(20)
Areniscas	(0,05)	(35)	(2)	10-880 (180)	1-31 (7)	(0,2)	(0,05)	2-41 (16)
Fosforitas	0-170 (30)	30-3000 (300)	10-100 (30)	24000-41500 (31000)	10-30 (10)	3-300 (30)	1-100 (18)	20-300 (50)
Carbón (ceniza)	(2)	10-1000 (20)	2-40 (15)	40-480 (80)	2-50 (15)	0,2-16 (5)	0,4-3,9 (2)	7-108 (50)

Tabla II. Concentración de elementos traza potencialmente tóxicos en diversas litologías de la corteza terrestre (Carretero y Pozo, 2007).

volcánicas, principalmente exhalativas y explosivas. Efectivamente, la actividad volcánica explosiva suministra diversos elementos adsorbidos a las superficies de las partículas finas de tefra (principalmente cenizas), que al entrar en contacto con el agua se solubilizan y pueden movilizarse (Selinus *et al.*, 2005). Entre estos elementos tenemos: Cl, S, Na, Ca, K, Mg, F y, en menores proporciones, Mn, Zn, Cu, Ba, Se, Br, B, Al, Si y Fe. En las emisiones gaseosas (exhalativas) es además reseñable la emisión de Hg vaporizado y de HF.

Elementos tóxicos y contaminación

El término metales pesados se usa generalmente para indicar elementos trazas (<0,1% en medios naturales) con números atómicos superiores a 20 y una densidad superior a 5 g/cm³, que tienen la característica añadida que desde el punto de vista ambiental son tóxicos (Fergusson, 1990). Junto a ellos tienen también un especial interés medioambiental algunos metaloides como arsénico y selenio. Por ello, y aunque en la literatura suelen incluirse los verdaderos metales y los metaloides bajo el término de metales pesados, parece más adecuado el empleo del término metales y metaloides pesados para referirse a ambos conjuntamente, y dejar el de metales pesados sólo para los que realmente lo son. Existen, no obstante, otros elementos altamente tóxicos que no se incluyen, ni en los metales, ni en los metaloides, es el caso por ejemplo del F, perteneciente a los halógenos.

Un contaminante es un elemento o compuesto químico presente en la atmósfera, aguas, suelos o sedimentos, en una concentración más elevada de la habitual en esa zona, pero que además tiene un efecto nocivo sobre los organismos vivos cuando se encuentra en forma biodisponible (Sahai y Schoonen, 2006). La Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) incluyó en 1993 como contaminantes prioritarios los siguientes elementos: Be, Sb, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Ag, Pb, Se, Tl y Zn. Dentro de estos contaminantes, adquieren relevancia por su frecuente presencia y/o implicaciones nocivas en la salud humana, los elementos: As, Se, Cd, Pb, Zn, Ni, Cu y Hg.

Desde el punto de vista de los recursos minerales, son especialmente contaminantes los depósitos

de sulfuros, y entre ellos los que se explotan para la obtención de metales base como Pb (galena), Zn (esfalerita) y Cu (calcopirita), ya que con relativa facilidad se oxidan en el aire liberando sulfatos que, exceptuando el plomo, son solubles y pueden pasar a las aguas subterráneas y superficiales provocando impactos ambientales por contaminación. Es más, aunque estos minerales son las menas de metales concretos, un análisis químico detallado pone de manifiesto la presencia de otros elementos en muy bajo contenido (traza), pero de indudable repercusión ambiental y en la salud humana, como arsénico o cadmio, entre otros (Tabla III).

Un problema añadido se produce cuando en los yacimientos, tanto de menas metálicas como de carbón, hay sulfuros de hierro (pirita o marcasita, FeS₂), lo que es muy común. La oxidación de pirita o marcasita genera soluciones ricas en ácido sulfúrico y sulfato férrico, compuestos extremadamente oxidantes y activos en la disolución de otros minerales mena o componentes de las rocas. El resultado es la liberación de una gran cantidad y variedad de elementos, que pasan a constituir parte de las denominadas aguas ácidas de mina. La liberación de estos efluentes ácidos puede dañar directamente la vida acuática, pero también los "habitats" subaéreos. Un segundo efecto, con impacto ambiental mayor que la acidez, es el hecho de que el bajo pH de las soluciones incrementan la solubilización de metales y metaloides potencialmente tóxicos como Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Ni, Co, Al, Sb y As.

Es importante señalar que los metales y metaloides potencialmente tóxicos que pasan a la atmósfera, aguas, suelos y sedimentos, pueden llegar, a través de la cadena trófica, a los seres humanos provocando diversas enfermedades (Selinus *et al.*, 2005).

Origen y efecto de los principales elementos tóxicos en la salud humana

Como se ha mencionado previamente, la concentración de determinados elementos en suelos y sedimentos puede alcanzar valores tóxicos como resultado de la contribución natural y antropogénica.

Quizás debido a un efecto evolutivo, es un hecho afortunado que los elementos más tóxicos son

MINERAL	Ag	As	Bi	Cu	Cd	Co	Hg	Ni	Pb	Sb	Sn	Tl	Zn
Galena (PbS)	500-5000 (30.000)	200-5000 (10.000)	200-5000 (50.000)	10-200 (3.000)						200-5000 (30.000)		<10-50 (1.000)	
Esfalerita (ZnS)		200-500 (10.000)		1000-5000 (50.000)	1000-5000 (44.000)		10-50 (10.000)				100-200 (10.000)	10-50 (5.000)	
Calcopirita (CuFeS ₂)	10-1000 (2.300)					10-50 (2.000)		10-50 (2.000)			10-200 (770)		
Pirita (FeS ₂)		500-1000 (50.000)		10-10000 (60.000)		200-5000 (<25.000)		10-50 (25.000)	200-500 (5.000)	100-200 (700)		50-100 (100)	1000-5000 (45.000)

Tabla III. Concentración de elementos traza en sulfuros comunes en los yacimientos minerales (Carretero y Pozo, 2007).

los que menos abundan en la naturaleza (elementos traza). En el medio ambiente, los elementos traza participan de los ciclos biogeoquímicos con formación de compuestos órgano-metálicos en los que intervienen los microorganismos y las cadenas tróficas, que permiten su acceso al hombre a través de los alimentos, especialmente vegetales y pescados (Eby, 2004). De forma general (hay excepciones), los compuestos órgano-metálicos, especialmente lo de cadena corta, son más tóxicos que los inorgánicos, debido a que su lipofilia les proporciona mayor afinidad con el sistema nervioso.

Los metales y metaloides pueden cambiar su estado de oxidación a través de reacciones redox, que pueden ser inducidas por enzimas o por otros compuestos, y desencadenan estrés oxidativo. La interacción con proteínas puede provocar inmunodepresión y alergia, mientras que en los ácidos nucleicos las alteraciones pueden ser genotóxicas o carcinógenas. La actuación específica de diversos elementos traza sobre diversos sistemas orgánicos, se muestra en la Tabla IV. Se puede observar cómo algunos metales (Hg, Cd, Co, Ni, Pb, Zn, Cr) y metaloides (As, Se) son responsables de efectos tóxicos en diversos sistemas del organismo, destacando el elevado número de elementos que afectan al sistema nervioso (Selinus et al., 2005; Carretero y Pozo, 2007). El potencial tóxico de los elementos traza es, por lo tanto, alto, y su magnitud dependerá de diversos factores (Figura 4), que incluyen: la especie química, la pauta, la dosis, la vía de absorción y la duración de la exposición (Selinus et al., 2005; Skinner y Berger, 2003). Esta última implica la posibilidad de fenómenos de bioacumulación, en aquellos casos de intoxicación crónica, a largo plazo de tiempo (Sahai y Schoonen, 2006).

A continuación se hace un repaso de las características y efectos tóxicos de los elementos As, Se,

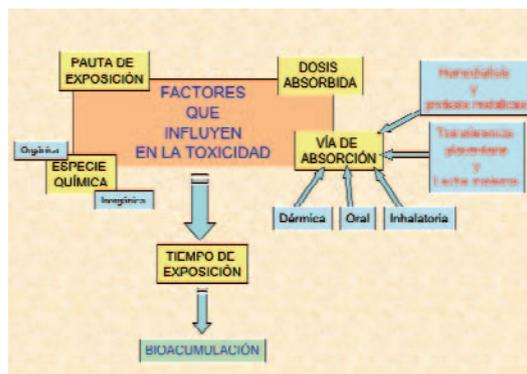


Fig. 4. Factores que influyen en la toxicidad.

Pb, Cd, Hg y F, por su importante repercusión negativa en la salud humana.

Arsénico

El arsénico es un metaloide que se presenta en la naturaleza, como elemento mayoritario o como traza, en numerosos minerales. Los sulfuros son los más frecuentes y sus minerales más representativos son: el oropimente (As_2S_3), rejalgar (AsS), arsenopirita ($AsFeS$) y tetraédrita-tennantita ($(Zn,Cu,Ag,Fe)_{12}(Sb,As)_4S_{13}$). Otros sulfuros, como la pirita (FeS_2), pueden presentar contenidos notables de arsénico por sustitución isomórfica del azufre (ver Tabla IV).

La contaminación ambiental en ámbitos mineros con minerales que contienen arsénico es evidente. La acción del oxígeno y de los microorganismos, especialmente en presencia de pirita, provoca la formación de soluciones ricas en ión férrico y con pH de elevado poder de disolución (aguas ácidas) que transportan, al sistema de aguas, metales y metaloides, entre estos últimos el arsénico.

EFEECTO TOXICO	ELEMENTOS															
Neurotoxicidad	Hg	As	Tl	Pb	Al	Sn	Fe	Mn	Co	Se	Ni	Cd	Zn			
Hepatotoxicidad		As					Fe							Mo	Cr	
Nefrotoxicidad	Hg		Tl	Pb								Cd		Mo	Cr	
Cardiovasculotoxicidad									Co			Cd				
Dermatotoxicidad		As							Co	Se	Ni		Zn		Cr	
Inmunotoxicidad	Hg	As		Pb		Sn			Co	Se	Ni	Cd			Cr	
Carcinogenicidad		As		Pb(?)							Ni	Cd		Cr	Be	
Hematotoxicidad		As		Pb			Fe							Mo		Cu
Gastrotoxicidad		As		Pb		Sn	Fe		Co	Se		Cd	Zn			Cu
Embriotoxicidad		As	Tl	Pb						Se		Cd	Zn	Mo		Li

Tabla IV. Efectos tóxicos de elementos traza seleccionados sobre órganos y sistemas del organismo. Los elementos en negrita destacan por sus amplios efectos nocivos.

Efectos en la salud humana

Aunque es de sobra conocido que los compuestos sólidos de arsénico son letales por ingestión (veneno), los principales impactos sobre la salud humana tienen lugar a través del consumo de aguas contaminadas y por inhalación de gases, resultado de la combustión de carbones que contienen compuestos de As (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007).

La intoxicación por arsénico se denomina arsenicosis y ha provocado graves consecuencias, por el consumo de aguas contaminadas con arsénico, en lugares del mundo tan distantes como la India-Bangladesh, México y Turquía.

El caso del envenenamiento con arsénico en la India y Bangladesh, es el más conocido por su magnitud (Selinus *et al.*, 2007). En Bangladesh los contenidos de arsénico en el agua de consumo alcanzan valores superiores a 50 $\mu\text{g/l}$, superando en 5 veces las recomendaciones de la OMS (10 $\mu\text{g/l}$). El origen de la contaminación fue el resultado de la composición mineralógica del substrato (piritas arsenicales) y de una extracción excesiva de agua (descenso del nivel freático).

El arsénico es letal para los seres humanos, siendo su forma reducida (As^{3+}) más tóxica que la forma oxidada (As^{5+}). También es mayor su toxicidad en los compuestos inorgánicos que en los organo-metálicos, mientras que en forma elemental (As^0) es poco tóxico.

Aunque el arsénico se elimina normalmente a través de los riñones, intestino y saliva, en determinadas dosis se acumula en el hígado, riñón, huesos, pelo y piel. Se considera, además, un elemento carcinógeno que provoca cánceres de piel, pulmón, riñón y vejiga. El consumo por ingestión de aguas contaminadas por arsénico provoca lesiones en la piel, melanosis (cambios de pigmentación) y keratosis o escamado de la piel. La exposición prolongada produce varios tipos de cánceres, como ya se ha comentado. También la enfermedad del pie negro (gangrena), reconocida en Taiwan, es el resultado de la ingestión de aguas contaminadas por arsénico, que provoca desórdenes en la piel y cáncer.

Con un carácter más local (región de Ghizou, China) la arsenicosis puede tener lugar también por inhalación de gases con arsénico, resultado de la combustión de carbones conteniendo sulfuros que poseen este elemento.

Selenio

El selenio es un elemento con escasos y raros minerales en la naturaleza, entre los que destacan los seleniuros ferroselita (FeSe_2), berzelianita (Cu_2Se) y clasuthalita (PbSe) y, como impureza, en la pirita.

La fuente principal del selenio es la actividad volcánica. Se libera en forma particulada que es fácilmente movilizadora del gas volcánico por la lluvia. Esto explica que se concentre generalmente en las proximidades de los edificios volcánicos.

Efectos en la salud humana

En elevadas concentraciones el selenio puede ser altamente tóxico en el medio ambiente (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007). El selenio requerido en la dieta de los animales es de 0,04 ppm, siendo beneficioso hasta 0,1 ppm, pero por encima de 4 ppm es tóxico. Es por lo tanto uno de los elementos con un rango más estrecho entre la deficiencia en la dieta (<40 $\mu\text{g/día}$) y los niveles tóxicos (400 $\mu\text{g/día}$).

En exceso el selenio es tóxico, originando la selenosis, enfermedad que provoca irritación gastrointestinal, pérdida de pelo y daños en el sistema nervioso. Una intoxicación aguda puede provocar daños en el hígado y riñones. En casos crónicos puede producir erupción cutánea, debilidad y diarrea. Además, puede provocar efectos teratogénicos, toxicidad fetal y cáncer.

Su deficiencia provoca enfermedades, como la enfermedad de Keshan (identificada en China en áreas donde el contenido en selenio de los suelos es muy bajo), caracterizada por el engrandecimiento del corazón, que conduce por congestión al fallo cardíaco. Otra enfermedad que parece estar relacionada con la deficiencia en selenio, también con amplio desarrollo en China, es la enfermedad de Kashin-Beck. Esta enfermedad conocida desde principios del siglo XIX provoca inflamación de las articulaciones, con el consiguiente dolor y malestar generalizado. Tanto la enfermedad de Keshan como la de Kashin-Beck suministran un excelente ejemplo de la interacción entre los recursos minerales y la salud humana. Así, el bajo contenido en selenio en aguas, rocas, sedimentos y suelos es responsable de su deficiencia nutricional.

Mercurio

El mercurio se presenta predominantemente en forma de cinabrio (HgS) en los yacimientos minerales, aunque las erupciones volcánicas también se encuentran entre las mayores fuentes de mercurio emitido a la atmósfera y a la hidrosfera. La fuente antropogénica también es importante y tiene su origen en la quema de combustibles fósiles e incineración de residuos.

Efectos en la salud humana

La toxicidad del mercurio depende del estado del elemento, tanto en compuestos orgánicos como inorgánicos, siendo menos peligroso en estos últimos al excretarse fácilmente por la orina (Eby, 2004). En el estado inorgánico el mercurio se presenta en tres formas: Hg^0 , Hg^+ (en sales y complejos inestables) y Hg^{2+} (unido a S, N, O y haluros). En la forma Hg^0 sería prácticamente inofensivo, pero su elevada volatilidad a temperatura ambiente forma un vapor dañino al entrar en el organismo por inhalación, pasando a los pulmones y la sangre, para alcanzar después el cerebro (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007). Las formas iónicas Hg^+ y

Hg²⁺ se presentan en sales, pero la segunda, además, se presenta en forma libre, por lo que puede entrar en el organismo por inhalación o a través de la piel.

El mercurio se puede presentar también en compuestos orgánicos y órgano-metálicos en los dos estados de oxidación: Hg⁺ y Hg²⁺. El mercurio se une al C con enlace covalente fuerte, formando compuestos estables con el radical metilo (CH₃), altamente tóxicos para el sistema nervioso central. El mayor daño que provocan los compuestos orgánicos del mercurio es su progresiva concentración (bioacumulación), conforme pasa de unos organismos a otros en la cadena trófica. A esto se denomina biomagnificación, es decir, un organismo vivo es capaz de incorporar y concentrar ciertas sustancias de las que puede alcanzar una elevada concentración, mayor que la existente en el medio incorporado. Así, el metil-mercurio existente en un medio poco contaminado puede ser absorbido y asimilado por sucesivos organismos dentro de la cadena trófica y alcanzar, cuando llega al hombre, unos contenidos letales. Este fue el caso de la grave intoxicación sufrida por los pescadores japoneses de Minamata entre 1950 y 1970, denominándose desde entonces enfermedad de Minamata.

La intoxicación por mercurio, o sus sales, se denomina hidrargirismo (mercuriosis) y provoca diarrea, deshidratación, convulsiones y colapso vascular. Largos periodos de exposición al mercurio en estado inorgánico, especialmente en trabajos en los que se emplea este elemento, provoca daños neurológicos.

Plomo

La fuente natural son los yacimientos que contienen minerales de plomo, especialmente sulfuros, entre los que destaca la galena (PbS). Es un metal muy poco móvil bajo condiciones oxidantes, y su contaminación puede tener tanto un origen natural como antropogénico. Entre las fuentes antropogénicas están las actividades de explotación y tratamiento mineral, que afectan al agua, suelo y biosfera; los combustibles y pinturas con plomo; los fertilizantes fosfatados y los lodos de depuradora usados como fertilizantes.

Efectos en la salud humana

El principal riesgo del plomo no tiene que ver con su disolución, ya que precipita rápidamente como sulfato o carbonato, sino con el plomo emitido como materia particulada (10-100 μm) en las fundiciones, durante el procesado metalúrgico. Estas partículas son altamente peligrosas porque se adhieren a la piel con intensidad, y su pequeño tamaño hace que sean más fácilmente inhaladas e ingeridas; lo que provoca un aumento de su solubilidad en el tracto intestinal.

Se trata de un elemento altamente tóxico que ataca al sistema nervioso central (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007). En casos agudos, las for-

mas órgano-metálicas son más tóxicas que las inorgánicas. El efecto del plomo es especialmente acusado en niños y más raramente en adultos. Los efectos son una encefalopatía aguda, que provoca frecuentes edemas y aumento de la presión intracraneana por hinchamiento cerebral. La intoxicación provoca también anemia y diversas alteraciones de los sistemas nervioso, renal y hepático. La intoxicación crónica con plomo es potencialmente letal; se denomina saturnismo y provoca anorexia, debilidad y pérdida de peso.

Cadmio

El cadmio se presenta en el mineral greenockita (CdS) y con diverso grado de sustitución del cinc en los sulfuros esfalerita y wurtzita (ZnS). Se encuentra por lo tanto asociado principalmente a yacimientos de sulfuros de cinc (ver Tabla IV). La contaminación por cadmio en el medio ambiente se produce como resultado de procesos naturales (yacimientos), pero también antropogénicos (Ej. metalurgia, combustión de combustibles fósiles).

Efectos en la salud humana

El cadmio está considerado como un elemento carcinógeno (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007). En áreas contaminadas por el metal, los daños provocados se concentran en huesos (malformaciones) y riñones, dando lugar a la enfermedad conocida como "itaitai" (que significa ¡ay! ¡ay!). La enfermedad es extremadamente dolorosa y ataca a los huesos que se hacen finos y frágiles de manera que se rompen con facilidad. Se descubrió en los pobladores de la cuenca del río Zinsu (Japón), que empleaban para uso doméstico y agrícola aguas contaminadas con Pb, Zn y Cd, resultado del vertido de residuos mineros. Se interpretó como causante el elevado contenido en cadmio, que debido a su capacidad de biomagnificación se encontraba en una concentración de 125 ppm en el arroz cosechado, a pesar de que en el agua del río no superaba 1 ppm.

Flúor

El flúor es un elemento halógeno que se presenta generalmente en bajos contenidos en rocas, sedimentos y suelos. Sin embargo, cuando ciertos minerales como la biotita están presentes, su contenido puede incrementarse notablemente. Este filosilicato rico en flúor puede liberarlo por meteorización química, permitiendo su paso al sistema de aguas subterráneas. Asimismo, la presencia de flúor en el agua, principalmente subterránea, es el resultado de su interacción con rocas que contienen minerales con este elemento, como el fluorapatito (Ca₅(PO₄)₃F) y fluorita CaF₂.

A diferencia de otros elementos esenciales, para los que el alimento es la fuente principal en más de un 80%, la principal fuente del flúor es el agua superficial y/o subterránea. Un origen de contaminación antropogénica son las emisiones de flúor por

parte de las industrias cerámicas. La materia prima principal de la industria cerámica son las arcillas, y el contenido de flúor en las mismas oscila entre 0,01-0,02% (100-200 ppm); mayor en illita y esmectita que en caolinita. Como ya se mencionó, estos valores pueden incrementarse si está presente la biotita, mineral ferromagnesiano que, como resultado de la sustitución de F por OH en su estructura, puede alcanzar contenidos en flúor del 2%.

Efectos en la salud humana

La presencia de fluoruros en el agua (0,1-1 ppm) favorece el desarrollo de huesos y dientes saludables (su déficit provoca caries), sin embargo, pasado un determinado umbral (>1,5 mg.l⁻¹) puede provocar las enfermedades denominadas fluorosis dental y fluorosis esquelética, responsables de la descomposición de los dientes y la osteoporosis con colapso vertebral, respectivamente (Fig. 5). (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005; Gomes y Silva, 2006; Carretero y Pozo, 2007).

Los efectos del flúor sobre los organismos no sólo tienen lugar por ingestión a través del agua, también por inhalación a través del aire; ya que el flúor en forma de gas originado en actividades industriales, como la de cerámica y vidrio, puede también causar fluorosis. Efectivamente, los aerosoles con flúor originados alrededor de las chimeneas son especialmente peligrosos para los seres vivos, y su presencia queda a veces plasmada en la existencia de fenómenos de corrosión en vidrios de ventana próximos y en un deterioro anormal de la vegetación. En estas zonas de actividad industrial la contaminación de los pastos con F (>30 ppm) puede provocar en el ganado daños irreparables por fluorosis, incluyendo malformaciones óseas y parálisis.

Efecto de los minerales radiactivos

La radiactividad es una propiedad que presentan algunos minerales que incluyen en su composición uranio, torio o radio. Existen numerosos minerales radiactivos que en unos casos se caracterizan por una radiactividad constante, mientras que otros la presentan ocasionalmente, según las inclusiones que contengan de los elementos anteriormente mencionados. Los principales minerales radiactivos son aquellos que contienen uranio, tanto silicatos como fosfatos, y especialmente óxidos.

La uraninita (UO₂) y su variedad desordenada, la pechblenda, son los principales minerales mena de este metal. Las aguas subterráneas pueden lixiviar y transportar este metal concentrándolo en áreas geoquímicamente favorables. El uranio presenta varios estados de oxidación (U³⁺, U⁴⁺, U⁵⁺ y U⁶⁺). En soluciones acuosas los dos primeros están como U³⁺ y U⁴⁺, mientras que los dos últimos forman los oxianiones UO₂²⁺ y UO₂²⁺, siendo las especies dominantes en los medios naturales el U⁴⁺ y el UO₂²⁺ (uranilo). La baja solubilidad de las fases de uranio hace que este elemento se encuentre en bajos contenidos en las aguas naturales.

De forma natural, el uranio tiene tres isótopos radiogénicos ²³⁴U (0,006%), ²³⁵U (0,72%) y ²³⁸U (92,2%). La vida media del isótopo más abundante es de 4468 x 10⁸ años, siendo el isótopo estable final el ²⁰⁶Pb.

Desde el punto de vista toxicológico, el uranio es perjudicial para los seres vivos si el metal o sus productos de descomposición entran en el organismo y está presente la forma de uranilo. La toxicidad del uranio como metal pesado depende del pH, es decir, de su especiación; una sobredosis de uranio provoca fallo renal agudo y disfunción hepática, entre otros efectos. La exposición al uranio puede ser el resultado del consumo de aguas y comidas contaminadas por el metal, pero también la inhalación de polvo rico en uranio o, incluso, de sus productos de descomposición radiactiva, entre los que destaca por sus efectos nocivos el radón.

El radón y la salud humana

El ²²²Rn es un gas radiactivo, incoloro, inodoro e insípido, presente de forma natural en rocas, suelo/sedimento, aire y agua. La principal fuente de radón son las rocas que contienen minerales de uranio. La descomposición radiactiva del ²³⁸U origina ²²⁶Ra que, a su vez, da por descomposición ²²²Rn. Tanto el tipo de roca como la estructura geológica son determinantes para establecer cómo el radón alcanza la superficie. Dependerá, en primer lugar, de la cantidad de uranio presente en rocas, sedimentos o suelos, particularmente alta es la concentración en granitos (3 ppm) y en algunas lutitas carbonosas; por otra parte, dependerá de la eficacia en la transferencia de la roca o suelo a las fases fluidas (gas o agua). Las zonas con fracturas y fallas están generalmente enriquecidas en uranio, lo que provoca anomalías de radón en los suelos suprayacentes.

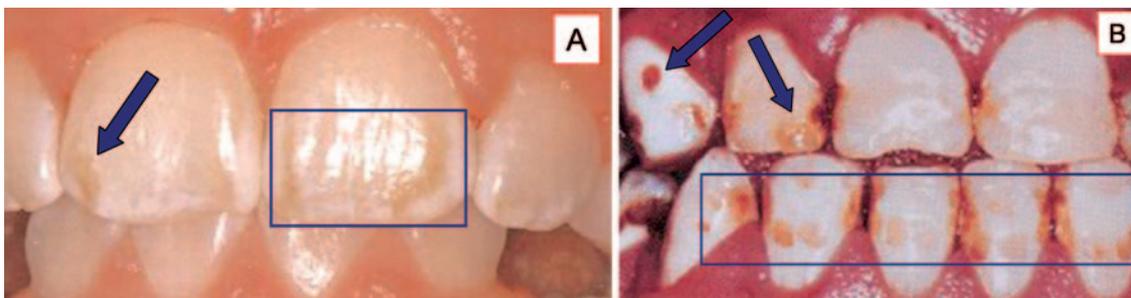


Fig. 5. Efectos de la fluorosis dental en un estadio inicial (A) y avanzado (B) (Carretero y Pozo, 2007).

La cantidad de radón que escapa a la atmósfera está relacionada con el contenido de agua, ya que la humedad atrapa el radón en los espacios entre el suelo y en las fracturas de las rocas. Por contrario, el movimiento de este gas desde fracturas en las rocas o desde los espacios porosos del suelo se ve favorecido por una escasa humedad.

En el organismo, el radón se absorbe a través de un doble proceso: a) por ingestión de aguas con el elemento disuelto y b) por inhalación del aire (más dañino).

La exposición a prolongadas y/o altas concentraciones de Rn desarrolla cáncer de pulmón (Selinus *et al.*, 2005). El riesgo no está en el Rn por sí mismo, sino en sus hijos radiactivos, principalmente el ^{218}Po , que tienen una gran facilidad para adherirse al polvo que, tras ser inhalado, afecta los pulmones por la emisión de partículas alfa originadas cuando el ^{218}Po se descompone para dar ^{214}Pb . Así, los aerosoles inhalados que transportan los isótopos hijos del Rn (^{218}Po) son atrapados en los pulmones afectando la radiación alfa a las células, lo que provoca mutaciones que facilitarán posteriormente el desarrollo del cáncer. Estudios recientes sugieren que el radón puede inducir enfermedades como la leucemia mieloide, el melanoma, el cáncer de riñón y, también, algunos cánceres infantiles.

EFFECTOS NOCIVOS PROVOCADOS POR LA INHALACIÓN DE PARTÍCULAS MINERALES

Aunque históricamente la humanidad ha estado siempre expuesta a la inhalación de partículas de origen mineral, afortunadamente solo unos cuantos minerales están relacionados con el desarrollo de enfermedades pulmonares (Ross, 1981; Bignon, 1990; Guthrie y Mossman, 1993; Carretero *et al.*, 2006). Las personas más afectadas son los trabajadores relacionados con las labores de extracción y tratamiento de minerales, y, en general, de industrias donde están expuestos durante largos periodos

de tiempo a la inhalación de polvo mineral. Sin embargo, no son las únicas personas que tienen este problema, ya que también inhalan polvo mineral durante largo tiempo las personas que viven cercanas a explotaciones mineras, industrias, o viven en edificios que contienen minerales peligrosos para la salud y que pueden ser inhalados. Son los llamados enfermos ambientales (Chisholm 1994).

El polvo mineral potencialmente peligroso para la salud no es solo de origen antropogénico, sino también de origen natural. Por ejemplo, pueden verse afectadas las personas que habitan cerca de zonas donde afloran estos minerales, que degradados por los procesos naturales de meteorización y erosión pueden ser transportados por el viento y alcanzar concentraciones suficientes para llegar a ser peligrosos para la salud. Asimismo, se verán afectadas las personas sometidas con frecuencia a tormentas de arena o que vivan en zonas áridas o semiáridas con acción eólica intensa. Finalmente, los volcanes con índice de explosividad elevada constituyen otra fuente de partículas que pueden ser peligrosas para la salud.

Desde el punto de vista médico, la inhalación de las partículas minerales puede causar diversas enfermedades (Tabla V). Las principales son las siguientes (Guthrie y Mossman, 1993; Skinner y Berger, 2004; Selinus *et al.*, 2005; Carretero y Pozo, 2007): neumoconiosis, enfermedad en la que el tejido del pulmón se vuelve fibroso y pierde su funcionalidad; cáncer de pulmón, que incluye cáncer de traquea, de bronquios y del propio pulmón, y mesotelioma, cáncer de la membrana pleural que recubre el pulmón.

Las neumoconiosis más importantes, por la cantidad de enfermos y muertos que han producido, son la silicosis y la asbestosis (Tabla V). La silicosis se produce por inhalación de partículas de sílice cristalina (cuarzo, cristobalita o tridimita, principalmente) y es la enfermedad ocupacional más frecuente y conocida a lo largo de la historia reciente. Anatómicamente se caracteriza por cambios fibróticos generalizados y el desarrollo de nódulos en am-

TIPO	NOMBRE	MINERAL QUE LA PRODUCE
Neumoconiosis	Silicosis	SÍLICE CRISTALINA
	Asbestosis	ANFÍBOLES FIBROSOS CRISOTILO
Cáncer de pulmón		ANFÍBOLES FIBROSOS CRISOTILO ZEOLITAS FIBROSAS CUARZO
Mesotelioma		CRISOTILO CROCIDOLITA ZEOLITAS FIBROSAS

Tabla V. Principales patologías provocadas por la inhalación de partículas minerales.

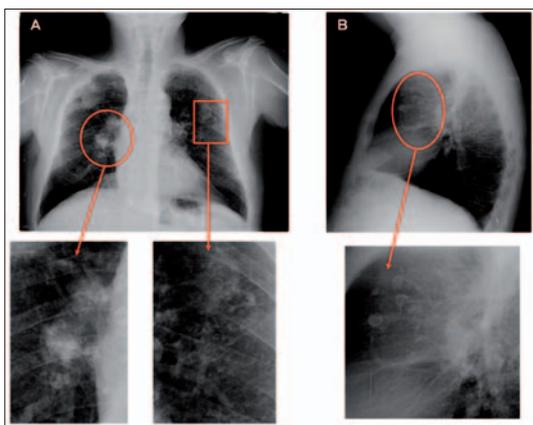


Fig. 6. Radiografía frontal (A) y lateral (B) de un paciente con silicosis. Se observa la presencia de nódulos silicóticos característicos de la enfermedad (Carretero y Pozo, 2007).

bos pulmones (Fig. 6). Por su parte, la asbestosis es una enfermedad causada por la inhalación de partículas de asbestos; se produce fibrosis pulmonar que puede derivar en cáncer de pulmón o mesotelioma.

Minerales patógenos por inhalación

Los minerales más peligrosos por inhalación son esencialmente silicatos, pertenecientes a las familias de los inosilicatos, filossilicatos y tectosilicatos



Fig. 7. Muestras naturales de asbestos. A. Crocidolita. B. Tremolita. C. Crisotilo.

tos (Tabla VI). Dentro de los inosilicatos son peligrosos los anfíboles de hábito fibroso como actinolita, tremolita, antofilita, crocidolita y amosita, que se han llamado comercialmente “asbestos” (Fig.7A y B). Así, la crocidolita es el “asbesto azul” y la amosita el “asbesto marrón”.

Los filossilicatos perjudiciales para la salud por inhalación pertenecen al grupo de las serpentinas (Bignon, 1990); el más peligroso dentro de este

			Estudios epidemiológicos	Estudios in vivo	Estudios in vitro
SILICATOS	Inosilicatos	Actinolita Tremolita Antofilita Crocidolita Amosita	Activo Activo Activo Muy activo Activo	Activo Activo Activo Muy activo Activo	Activo Activo Activo Muy activo Activo
	Filossilicatos: Grupo de las serpentinas	Crisotilo	Activo	Activo	Activo
	Filossilicatos: Grupo de los minerales de la arcilla	Caolinita	Activo en explotación minera (presencia de cuarzo)	¿? Resultados contradictorios	¿? Resultados contradictorios
		Talco	Activo en explotación minera (presencia de tremolita o crisotilo)	No activo	No activo
		Illita Esmectita	Activos en explotación minera (presencia de cuarzo)	Ligeramente activos	Ligeramente activos
		Sepiolita Palygorskita	No activos	Activos (*)	Activos(*)
	Tectosilicatos	Cuarzo	Activo	Activo	Activo
Zeolitas fibrosas (erionita)		Muy activo	Muy activo	Muy activo	

Tabla VI. Resultado de estudios in vivo e in vitro de la patogenicidad de diversos minerales peligrosos por inhalación.

grupo es el crisotilo, por su hábito fibroso y baja solubilidad, que es conocido comercialmente como “asbesto blanco” o “amianto” (Fig.7C). Dentro de los tectosilicatos, son perjudiciales por inhalación la sílice cristalina (cuarzo, cristobalita y tridimita) y algunas zeolitas fibrosas (Bish y Ming, 2001) como la erionita y la mordenita.

Todos ellos pertenecen a los minerales y rocas industriales, aunque hay que distinguir entre los minerales cuyas partículas son responsables directamente de la patogenicidad (asbestos, sílice o zeolitas) y aquellos que son inocuos cuando se presentan puros, pero en los que la presencia de impurezas de los anteriores les confiere efectos nocivos sobre la salud humana (caolín o talco). Se describen seguidamente los diversos grupos minerales implicados y sus efectos.

Asbestos

Los anfíboles fibrosos (asbestos anfibólicos) son peligrosos para la salud por inhalación, ya que son estables químicamente en el pulmón y las fibras son excesivamente largas para ser fagocitadas (Skinner *et al.*, 1988; Guthrie y Mossman, 1993). Además, la presencia de hierro en estos minerales cataliza la formación de radicales que pueden intervenir en el desarrollo celular y en la citotoxicidad (Fig.8). Dentro de este grupo, la crocidolita es la más dañina y puede llegar a ser más patógena que el crisotilo. Esto se debe al pequeño tamaño de sus fibras comparado con el de otros minerales anfibólicos como antofilita o amosita (Fig. 9), pero también al hecho de ser el asbesto menos soluble en los fluidos del pulmón (Stanton *et al.*, 1981).

Dentro de los filosilicatos es de destacar las serpentinas y, dentro de éstas, su variedad fibrosa el crisotilo (asbesto serpentínico) (Bignon, 1990). La patogenicidad del crisotilo es inferior a la de los anfíboles fibrosos (crocidolita) porque el tamaño y morfología de las fibras son distintas (Fig. 9) y, además, se disuelve lentamente en los fluidos del pulmón. Sin embargo, considerando todos los asbestos, es el crisotilo el que ha provocado un mayor número de enfermos y de mortalidad a consecuencia de la elevada producción industrial (95%) de este mineral.

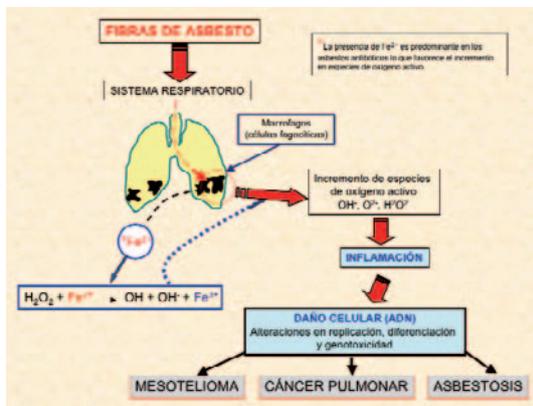


Fig. 8. Mecanismos de inflamación y desarrollo de enfermedades por inhalación de asbestos anfibólicos.

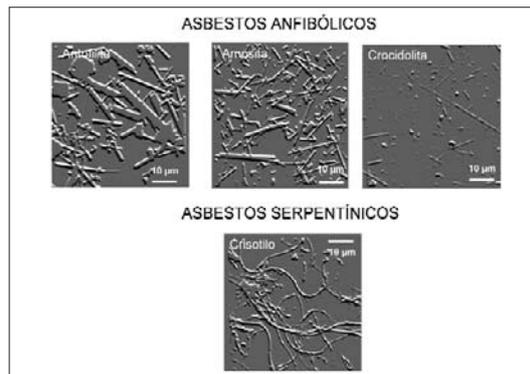


Fig. 9. Tamaños y formas de diversos tipos de asbestos. Destaca en el crisotilo la curvatura de las fibras y su mayor longitud (Carretero y Pozo, 2007).

Grupo de la sílice y zeolitas

Dentro del grupo de la sílice se ha demostrado que tan solo son peligrosas las formas de SiO₂ cristalinas, es decir, el cuarzo y sus principales polimorfos (cristobalita y tridimita). De acuerdo con lo anteriormente mencionado, la inhalación de sílice amorfa, como la constituyente de las diatomitas, no representaría un riesgo para la salud. La patogenicidad de la sílice cristalina está relacionada con el tamaño de partícula que es máxima cuando las partículas están entre 1-2 μm de diámetro (Selinus *et al.*, 2005). La exposición al polvo de cuarzo produce como consecuencia una fibrosis pulmonar, la conocida como silicosis.

Las zeolitas son perjudiciales para la salud cuando tienen hábito fibroso (erionita y mordenita) (Bish y Ming, 2001). La erionita es la zeolita sobre la que más estudios de patogenicidad se han realizado, estos estudios muestran que es extremadamente activa (Tabla VI) y provoca cáncer de pulmón y mesotelioma (Skinner y Berger, 2003; Selinus *et al.*, 2005).

Caolín y talco

Los minerales constituyentes (caolinita y talco) no son nocivos por sí mismos para la salud humana (Bignon, 1990), pero cuando se extraen como recurso mineral pueden contener impurezas asociadas que justifican su ocasional patogenicidad (Tabla VI). Este hecho es aplicable también a depósitos de arcillas, como las bentonitas (Fig.10) y las arcillas fibrosas (sepiolita y palygorskita).

En las explotaciones mineras, los trabajadores que han estado expuestos durante periodos prolongados de tiempo al polvo de caolinita (o sus polimorfos) han desarrollado un tipo de neumoconiosis llamado caolinosis. Afortunadamente, este mineral puede limpiarse rápidamente del pulmón, y por tanto no es perjudicial para el ser humano. Aunque la caolinita, como mineral de la arcilla, no se considera peligrosa para la salud humana es importante tener en cuenta que durante las labores de extracción de caolín en las canteras, el polvo inhalado puede llegar a ser perjudicial, especialmente cuando el caolín contiene cuarzo en pequeño tamaño de partícula, como componente minoritario.

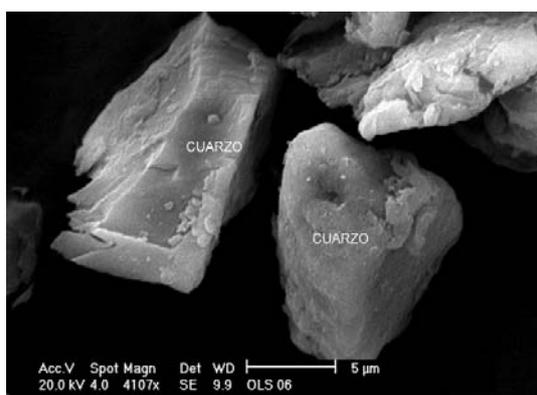


Fig. 10. Pequeñas partículas de cuarzo procedentes de una muestra de bentonita. Imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido.

Por su parte, el talco tampoco se considera un mineral peligroso para la salud por inhalación, y de hecho se emplea en cosmética en forma de polvo (Galán *et al.*, 1985). El principal problema del talco tiene lugar en las explotaciones mineras, ya que suele ir contaminado de crisotilo cuando está asociado a rocas ultramáficas, o de tremolita cuando el talco aparece en rocas carbonatadas metamorfozadas. Por lo tanto, ocasionalmente, los trabajadores de las explotaciones mineras pueden llegar a desarrollar enfermedades pulmonares provocadas, no por el talco, sino por las impurezas de anfíboles fibrosos o de crisotilo que lo acompañan. Al conjunto de estas enfermedades se las ha conocido tradicionalmente como talcosis, un tipo de neumoconiosis que en ocasiones puede derivar en cáncer.

BIBLIOGRAFÍA

- Bignon, J. (1990). *Health Related Effects of Phyllosilicates*. Ed. Springer-Verlag, Berlín.
- Bish, D.L. y D.W Ming (Eds). (2001). *Natural Zeolites: Occurrences, Properties, Applications*. Vol.45. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington. Mineralogical Society of America.
- Bolger, R. (1995). Industrial minerals in pharmaceuticals. *Ind. Min.*, August, 52-63.
- Carretero, M.I. (2002). Clay minerals and their beneficial effects upon human health. A review. *Appl. Clay Sci.*, 21, 155-163.
- Carretero, M.I. y Pozo, M. (2007). *Mineralogía Aplicada. Salud y Medio Ambiente*. Thomson. Madrid.
- Carretero, M.I., Gomes, C., Tateo, F., 2006. Clays and human health. In: *Handbook of Clay Science*. Bergaya, F., Theng, B. & Lagaly, G. (Eds.). Elsevier (The Netherlands), 717-741.
- Chisholm, J. (1994). Mineral dusts and occupational health. *Min. Soc. Bull.* 102, 3-7.
- Eby G,N. (2004). *Principles of Environmental Geochemistry*. Thompson, Brooks/Cole.
- Fergusson, J.E. (1990). *The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects*. Pergamon Press. Oxford.
- Galán, E. (Editor) (2003). *Mineralogía Aplicada*. Editorial Síntesis.
- Galán, E.; Liso, M.J. y Forteza, M. (1985). Minerales utilizados en la Industria Farmacéutica. *Bol. Soc. Esp. Min.*, 8, 369-378.
- Gomes, C.S.F. y Silva, J.B.P. (2006). *Minerals and Human Health. Benefits and Risks*. Centro de Investigação "Minerais Industriais e argilas". Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministerio da Ciencia, Tecnologia e Ensino superior. Aveiro (Portugal).
- Guthrie, G.D. (1992). Biological effects of inhaled minerals. *Am. Miner.*, 77, 225-243.
- Guthrie, G.D. & Mossman, B.T. (1993). *Health Effects of Mineral Dusts*. Reviews in Mineralogy, Vol. 28. Ed. Mineralogical Society of America, Washington.
- Komatina, M. (2004). *Medical Geology-Effects of Geological Environments on Human Health*. Amsterdam. Editorial Elsevier.
- Lefort des Ilounzes, D., Deloncle, R. y Dubois, P. (2007). Les mineraux en pharmacie *Géosciences n°5. Monográfico Géosciences et Santé*, 6-19.
- López-Galindo, A. y Viseras, C. (2004). Pharmaceutical and cosmetic applications of clays. In: *Clay Surfaces: Fundamentals and Applications* (F. Wypych y K.G. Satyanarayana, Eds). Elsevier, Amsterdam, 267-289.
- Reinbacher, R. (2003). *Healing Earths: The third leg of Medicine*. 1st Books Library.
- Ross, M. (1981). The geologic occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. In: *Amphiboles and other Hydrous Pyriboles*. Mineralogy. Reviews in Mineralogy, Vol. 9A. Ed. Mineralogical Society of America, Washington, 279-323.
- Sahai, N. (2007). Medical Mineralogy and Geochemistry: An interfacial science. *Elements* 3, 381-384.
- Sahai, N y Schoonen, M.A.A. (Eds) (2006). *Medical Mineralogy and Geochemistry*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry vol.64. Geochemical Society, Mineralogical Association of America
- Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J., Finkelman, R., Fuge, R., Lindh, U. y Smedley, P. (Eds) (2005). *Essentials of Medical Geology. Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Elsevier.
- Skinner, H.C.W., Ross, M. y Frondel, C. (1988). *Asbestos and Other Fibrous Materials. Mineralogy, Crystal Chemistry and Health Effects*. Oxford University Press, New York.
- Skinner, H.C.W y Berger, A.R. (Eds) (2003). *Geology and Health. Closing the Gap*. Oxford University Press.
- Stanton, M.F., Layard, M., Tegeris, A., Miller, E., May, M., Morgan, E., Smith, A., (1981). Relation of particle dimension to carcinogenicity of amphibole asbestos and other fibrous minerals. *Journal of the National Cancer Institute*, 67, 965-975.
- Vaughan, D.J. y Wogelius, R.A. (2000). *Environmental Mineralogy*. EMU Notes in Mineralogy 2. Eötvös University Press.
- Veniale, F., Bettero, Jobstraibizer, A., Setti, M., (2007). Thermal muds: Perspectives of innovations. *Appl. Clay Sci.* 36, 141-147. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 29 de noviembre de 2008 y aceptado definitivamente para su publicación el 18 de mayo de 2009.