

CALIDAD DEL AIRE EN LAS MINAS MUSEO SUBTERRÁNEAS. PROPUESTA DE ÍNDICES DE REFERENCIA

Dr. Ing. Enrique Orche García

Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM)

eorche@gmail.com

RESUMEN

Las minas museo subterráneas (MMS) son una alternativa al cierre de las explotaciones cada vez más extendidas en muy distintos países. Son galerías u otros espacios subterráneos preparados para ser visitados por personas interesadas con fines lúdicos o culturales. En España reciben 500.000 visitantes anuales. A pesar de ello, carecen de legislación específica, lo cual es especialmente preocupante si los aspectos no regulados atañen a su seguridad. Uno de los componentes fundamentales de ésta es la vigilancia y control de la calidad del aire existente en estos espacios. Como no existe normativa de referencia, el presente trabajo trata de la posibilidad de establecerla a partir de la abundante legislación existente en España. Para ello ha sido preciso investigar la problemática general de las MMS y, a partir de su censo aproximado, establecer los gases y otros elementos que pueden contaminar el aire en ella. Conocidos éstos, se ha analizado la amplia legislación vigente y normativa oficial no vinculante que les puede ser de aplicación en España, y se ha seleccionado la que puede ser empleada en dichas instalaciones considerando la peculiaridad específica de las MMS. Los resultados obtenidos demuestran que dicha iniciativa es perfectamente posible y viable, de manera que se han establecido límites máximos y mínimos de seguridad para los distintos componentes de la atmósfera en estos lugares subterráneos como son gases, vapores, radiaciones ionizantes, polvo, temperatura, humedad relativa y caudal y velocidad del aire de ventilación. En total se han establecido dieciséis valores límite que, sin dificultad, se podrían aplicar a dichas instalaciones subterráneas pues ya se están utilizando en otros sectores industriales españoles. Por extrapolación, dichos valores límites podrían ser extrapolables a minas no españolas que se encuentren en situaciones similares. De todas formas, la tarea realizada debe ser acometida por la Administración pública competente de la que es responsabilidad.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire, espacios subterráneos, legislación, minería subterránea, museos.

AIR QUALITY IN THE UNDERGROUND MUSEUM. PROPOSAL OF REFERENCE INDICES

ABSTRACT

Musealized underground mines (MMS) are an alternative to the closure of exploitations which is increasingly widespread in many different countries. They are galleries or other underground spaces prepared to be visited by interested people for recreational or cultural purposes. In Spain they receive 500,000 annual visitors. Despite this, they lack specific legislation, which is especially worrying if the unregulated aspects concern their safety. One of the fundamental components of this is the surveillance and control of the air quality in these spaces. As there is no reference regulation, the present work deals with the possibility of establishing it from the abundant legislation in Spain. For this, it has been necessary to investigate the general problems of the MMS and, from its approximate census, establish the gases and other elements that can pollute the air in it. Once these are known, the broad current legislation and non-binding official regulations that may be applicable in Spain have been analyzed, and the one that can be used in said facilities has been selected considering the specific peculiarity of the MMS. The results obtained show that this initiative is perfectly possible and feasible, so that maximum and minimum safety limits have been established for the different components of the atmosphere in these underground places such as gases, vapors, ionizing radiation, dust, temperature, humidity, relative flow and velocity of the ventilation air. In total, sixteen limit values have been established that, without difficulty, could be applied to these underground installations as they are already being used in other Spanish industrial sectors. By extrapolation, these limit values could be extrapolated to non-Spanish mines that are in similar situations. In any case, the task carried out must be undertaken by the competent public administration for which it is responsible.

KEY WORDS: Air quality, legislation, museums, underground mining, underground spaces.

1. Introducción

La decreciente actividad minera en los sectores metálico y energético en diversos países tradicionalmente involucrados con esta industria se traduce en el cierre de numerosas explotaciones. Eso conlleva el deterioro e incluso la pérdida de un importante patrimonio geológico y minero constituido por los propios yacimientos minerales y las labores mineras que los ponen al descubierto las cuales, en su momento, fueron el motor económico de zonas rurales, con frecuencia carentes de otros recursos.

La actual preocupación ambiental ha conducido a la restauración de estos restos mineros lo que, muchas veces, ha supuesto su enterramiento o sellado con objeto de restaurar, en la medida de lo posible, el paisaje original. Sin embargo, cada vez está extendida la idea de que un afloramiento de mineral en el fondo de una corta o en la pared de una galería, o una instalación industrial que ha sido durante años el centro vital de una región, tienen un valor patrimonial cuya conservación, en muchas ocasiones, es más defendible que su destrucción [1,2,3].

Para articular la utilización práctica de este patrimonio geológico y minero existen diversas alternativas. Por una parte los parques mineros o culturales constituyen las iniciativas más completas desde el punto de vista de puesta en valor del patrimonio geológico y minero, restaurando galerías e instalaciones. También es posible montar museos y centros de interpretación mineros, normalmente constreñidos a un edificio o lugar, sea minero o no. Una tercera alternativa consiste en presentar la explotación minera desde un enfoque que prime sus valores naturales, incluido el añadido paisajístico que la mina ha incorporado, antes de ella inexistente. Sea cual fuere la opción elegida, cualquiera de ellas constituye una alternativa a la degradación del patrimonio geológico minero que puede ser viable y positiva.

A semejanza de lo acaecido en Europa, en donde un buen número de países han dedicado un esfuerzo importante a la conservación y utilización de su patrimonio geológico y minero, en España se han desarrollado en los últimos años un buen número de proyectos hasta el punto de que en 2011, fecha del único inventario realizado conocido, existían unas setenta minas parcialmente rehabilitadas, museos y centros de interpretación de temática minera, que eran utilizados por el público con éxito creciente pues su número aumentaba sin cesar.

De este conjunto, el presente trabajo va a tratar de aquellos espacios que se han denominado Minas Museo Subterráneas (MMS), los cuales consisten en instalaciones que tienen en común mostrar alguna galería subterránea real rehabilitada con fines museísticos. No se incluyen, por tanto, aquellas otras que disponen de galerías que no tuvieron origen minero, sean excavadas en roca o ficticias a modo de mina imagen.

Lamentablemente no existe legislación que regule las MMS de manera que los trabajos de rehabilitación y la consiguiente explotación turística o cultural se efectúan mediante acciones puntuales, promovidas básicamente por los ayuntamientos y las administraciones regionales, de la mano de empresas que frecuentemente carecen de experiencia minera. En el mejor de los casos la Autoridad Minera española, que no tiene competencias explícitas sobre estas instalaciones, hace una aplicación analógica del derecho minero en un loable intento por controlarlas, especialmente para velar por la seguridad de los visitantes.

Se estima que, antes de la pandemia por Covid-19, en España visitaban anualmente los parques y museos mineros unos dos millones de personas y, de ellas, aproximadamente medio millón acudían a las MMS. Sin embargo, en lo que se refiere a estas últimas, los aspectos de seguridad y, concretamente, de la calidad del aire en el interior de las labores son tratados de muy diverso modo de unos lugares a otros. La ventilación de las minas rehabilitadas suele ser natural, aprovechando las galerías y aberturas existentes abiertas al exterior, lo que a veces es insuficiente desde el punto de vista de la seguridad de abastecimiento de aire respirable. Por otra parte, la vigilancia de la calidad atmosférica no suele realizarse de forma sistemática y regular. A falta de legislación propia, la aplicación analógica del derecho podría resolver esta cuestión, aunque las normas mineras están diseñadas para aplicarse en unas condiciones, las mineras, que son más severas que las de una MMS. Por otra parte, la legislación relativa a la calidad del aire en instalaciones industriales tampoco sería de aplicación ya que está diseñada para actividades que no se encuentran en las MMS.



Fotografía 1. Parque minero de Andorra (España) (Fuente: Autor)

El presente trabajo constituye un intento de llenar este vacío en lo relativo a definir la calidad del aire existente en las MMS, sin otra pretensión que mostrar que tal iniciativa es posible a la vista de la legislación española actual pues, en definitiva, es la Administración del Estado la que tiene que decidirse a abordar y resolver esta cuestión. Para ello se han tomado como referencia tanto las minas como la legislación y normativa españolas, que son suficientemente amplias para dar respuesta a esta cuestión.

La metodología del presente trabajo ha consistido en realizar un análisis de la situación actual, un análisis de las características de las MMS españolas, una revisión de la legislación y las normas técnicas oficiales no vinculantes vigentes al día de hoy en España y, finalmente, la adaptación de éstas a los espacios subterráneos musealizados. El resultado final es una propuesta técnica razonable que demuestra que la regulación del sector en lo relativo a la calidad del aire es posible en el corto plazo sin más que utilizar la amplia gama de disposiciones existente. El presente trabajo actualiza otros previos del autor sobre esta misma cuestión [4,5]

2. Estrategia para abordar el problema de la calidad del aire en las MMS

La calidad ambiental en las MMS es un asunto que involucra directamente a la seguridad. El hecho de que estos espacios no estén al aire libre añade una exigencia y complejidad mayores.

En todos los casos españoles, las MMS son el resultado de la rehabilitación de labores mineras y de su acondicionamiento para ser visitadas por personas interesadas que, en la mayor parte de los casos, no son conscientes de los riesgos que dichas labores pueden entrañar. Al no existir normativa desarrollada específicamente para estos espacios, se plantea

entonces el dilema de interpretar cuáles deben ser la referencia legislativa y la Autoridad competente que:

- Controle la rehabilitación de las labores e instalaciones mineras.
- Autorice su apertura para uso público.
- Posteriormente vele por la seguridad de los visitantes que transitan por ellas, seguridad que debe incluir obligatoriamente la presencia de una atmósfera inocua.

La legislación minera española es rica en normativa de calidad ambiental pero está diseñada para aplicarse en unas condiciones que son más severas que las de una MMS. Por otro lado, la legislación relativa a la calidad del aire en la industria tampoco sería de aplicación ya que está diseñada para instalaciones entre las que no se encuentran las MMS. Algo similar se puede indicar sobre la legislación de la calidad del aire en locales cerrados como oficinas, naves industriales y espacios similares, aunque la extrapolación de ambientes es posible.

Para cubrir este vacío legal es necesario recurrir a lo que el Derecho español denomina aplicación analógica de la ley, que consiste en que el principio o la regla previstos para un caso o situación concreta puede extenderse a otro que guarda con el primero una gran semejanza. El supuesto necesario para la aplicación analógica de la ley es que la disposición se refiera a situaciones no previstas pero semejantes a las previstas en la norma. Procede la aplicación analógica cuando las normas no contemplan un supuesto específico, pero regulen otro semejante entre los que se aprecie identidad de razón [6,7].

En este contexto, se justifica perfectamente la aplicación de la normativa minera y de calidad del aire a las MMS en tanto se regula específicamente para ellas. No obstante, el método debe usarse con cautela y prudencia ya que está sometido a todos los riesgos del procedimiento lógico inductivo, es decir, que para ejercer correctamente la aplicación analógica del derecho no se puede exigir el cumplimiento de las normas sin una previa adaptación a la situación real, en este caso, de las MMS.

Debido a las características específicas que presentan, la prudencia aconseja que las MMS cuenten con un responsable de seguridad que atienda los problemas que se presenten, especialmente los de índole minera o asimilables a ésta [8,9].

El hecho de que las MMS estén irrumpiendo discretamente, sin estridencias, en el mercado de las iniciativas lúdicas y culturales españolas sin que hasta

ahora haya habido accidentes en ellas, en forma alguna justifica que la Administración del Estado no se decida a afrontar una problemática latente: su seguridad.

3. MMS españolas y minerales explotados en ellas

El catálogo de MMS españolas no es bien conocido debido a que su puesta en marcha se debe a iniciativas aisladas, inconexas, sin que ninguna institución las regule ni cense. El último inventario conocido se realizó en 2011 [10]. La relación de la Tabla 1 identifica cada MMS por la localidad en la que está ubicada, así como los minerales explotados en su día en estas labores. La característica común de estas MMS es que en ellas se han rehabilitado labores mineras auténticas. Existen otras instalaciones y museos mineros en los que se han construido nuevas galerías o se simulan las labores con gran realismo pero estas instalaciones, que no son mineras en origen, se excluyen de la lista de MMS.

Tabla 1. Minerales explotados en las MMS españolas

LOCALIDAD MMS	MINERAL
Escucha	Carbón
Valdáliga	Plomo
Barruelo de Santullán	Carbón
Almadén	Mercurio
Cercs	Carbón
Bellmunt de Ciurana	Plomo, cinc
Cardona	Sal gema, potasa
Bossosts	Plomo, cinc
Riutort	Petróleo
Fuente del Arco	Hierro
Aliseda	Hierro
La Unión	Hierro
Zerain	Hierro
Gavá	Variscita
La Torre d'en Besora	Hierro
Culla	Hierro
Puras de Villafranca	Manganeso
Motril	Cinc
Cuenca	Hierro
Navasfrías	Wolframio
Oyarzun	Plata, hierro, plomo
Mieres	Carbón
Samuño	Carbón

Clasificando estas MMS en función de las sustancias explotadas en ellas, se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2. Sustancias explotadas en las MMS españolas

SUSTANCIA	NÚMERO
Hierro	7
Carbón	5
Plomo/Cinc	2
Plomo/Cinc/Plata	1
Plomo	1
Cinc	1
Wolframio	1
Mercurio	1
Sales	1
Petróleo	1
Variscita	1
Manganeso	1

A la vista de ella y de la Tabla 1, se constata que las MMS de carbón, petróleo y sales, en principio, son las que, potencialmente, pueden presentar una mayor acumulación de gases.

Existen dos casos particulares que son las MMS de mercurio y de petróleo que presentan unas características especiales por la posible emisión de vapor de dicho metal y de hidrocarburos gaseosos.

Las minas metálicas, muchas de las cuales arman en rocas ígneas y metamórficas, son favorables para la acumulación de radiaciones ionizantes.

4. El aire en las minas subterráneas activas

Las minas subterráneas de las que posteriormente derivan las MMS son excavaciones artificiales que han cortado yacimientos minerales que, por su propia naturaleza son, anomalías geológicas. Eso quiere decir que sus galerías atraviesan rocas cuyo contenido mineral supera ampliamente el valor del fondo geoquímico. De la naturaleza y disposición de estos minerales y de las rocas asociadas depende en buena medida la calidad del aire en el interior de la mina. De ellos se desprenden productos de diverso tipo como metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, hidrocarburos, radiaciones ionizantes, etc., que son liberados de forma natural a los huecos de las labores. La calidad de este aire aún puede verse mermada cuando a ellos se añaden los contaminantes propios de la explotación (gases combustibles, gases y humos de las voladuras, polvo, etc.) o que se producen accidentalmente en ella (incendios, derrames).

La temperatura natural del subsuelo se acrecienta con la profundidad a razón de 3°C cada 100 m (gradiente geotérmico) cuyo efecto adquiere tanta más importancia cuanto mayor es la profundidad de la mina.

La oxidación de ciertos minerales, como la pirita, es una reacción exotérmica que añade calor al ambiente subterráneo. Lo mismo puede decirse del irradiado por las personas y, en mucha mayor medida, por la maquinaria minera.

Si las labores subterráneas atraviesan acuíferos saturados, drenan los mantos de agua contenidos en ellos, lo que contribuye a aumentar la humedad ambiental de la mina.

Todos estos factores locales (gases, vapores, radiaciones, calor, humedad) crean una atmósfera con unas características propias en cada mina o en cada zona de la mina. Para que esta atmósfera permita el desarrollo del trabajo minero es preciso mantener un estándar de calidad que se consigue vigilando y controlando que los elementos que la integran no alcancen los valores máximos impuestos por la legislación vigente, lo que se produce mediante la renovación del aire que se introduce desde el exterior.

5. El aire en las MMS

Cuando una mina se cierra, ciertamente se suprimen los procesos productivos que vierten ciertas sustancias indeseables al aire pero también se paraliza la renovación forzada de éste. Sin embargo, los minerales y las rocas expuestas en las galerías siguen emitiendo gases y la temperatura se mantiene en los niveles que corresponden al gradiente geotérmico local. El agua subterránea, que en el período de actividad de la mina se evacuaba al exterior para mantener secas las labores, se deja de bombear y rellena la mina hasta su nivel piezométrico natural, inundando una parte de las galerías y cavidades.



Fotografía 2. Museo minero de Escucha (España)

Aún en esta situación, es posible que el aire siga penetrando en la explotación a través de bocaminas, pocillos, fisuras, hundimientos y otras aberturas que la mina presente al exterior, de manera que con frecuencia

se instaura la circulación natural de aire. Esta circulación suele ser un tanto irregular y cambiante por diversas razones, como son las diferentes cotas en las que pueden estar situadas las aberturas, la forma y tamaño de los espacios vacíos subterráneos que las unen, los obstáculos existentes en ellos (hundimientos, inundación de plantas, etc.), la temperatura y humedad en las galerías y la climatología estacional, que puede incluso invertir el sentido de circulación del aire en el interior de la mina.

Por las razones indicadas, el aire en el interior de una mina abandonada suele tener una composición compleja y un comportamiento a veces tan difícil de establecer que sólo un adecuado estudio de ventilación es capaz de desentrañar. Normalmente, las MMS sólo recuperan una pequeña parte de las labores que es en donde se debe garantizar la calidad del aire. El resto de la mina puede quedar aislada mediante tabiques o mantenerse en comunicación atmosférica con la parte musealizada. En consecuencia, la casuística es grande y, dada la importancia del tema, uno de los aspectos importantes que se debe abordar durante la valorización y puesta en marcha de la MMS es el de la ventilación.

El control de la ventilación en estas instalaciones museísticas tan especiales es fundamental, no sólo para garantizar el suministro del caudal de aire respirable necesario sino también para limpiar la atmósfera interior de los eventuales gases contaminantes y del polvo que pueda haber en ella y controlar su temperatura y humedad.

6. Tipos de componentes del aire en las MMS

La composición media del aire en un lugar situado a nivel del mar se indica en la Tabla 3. Sin embargo, cuando este aire penetra en una mina subterránea, disminuye la proporción de oxígeno, aumenta la de anhídrido carbónico y se carga de otras sustancias menores que dependen de la naturaleza de las paredes de las galerías y cavidades y del ambiente en ellas. En su recorrido por el interior de la mina, la composición del aire puede experimentar notables variaciones, especialmente si la mina está en actividad.

Con carácter general puede decirse que el aire que existe en el interior de una MMS es una mezcla compuesta por el aire que entra del exterior (de forma natural o forzada) al que se suman las sustancias que, de forma espontánea, desprenden los criaderos, las aguas estancadas o circulantes y los restos mineros que se pudren. Estas sustancias pueden ser gases, vapores, radiaciones ionizantes y polvo.

Tabla 3. Composición media del aire a nivel del mar

GAS	PORCENTAJE EN VOLUMEN (%)
N ₂	78,08
O ₂	20,95
CO ₂	0,03
Argón	0,93
Otros	0,01

Teniendo en cuenta que los equipos montados en las galerías son como maquetas sin movimiento, no habrá presencia de los gases y vapores debidos a su propio funcionamiento, como son los producidos por la combustión de los motores de explosión, la carga de las baterías o las voladuras.

Tabla 4. Radiación natural de las rocas

TIPO DE ROCA	U (ppm)		Th (ppm)	
	Media	Rango	Media	Rango
Ígneas				
Básicas	1,0	0,2-4,0	4,0	0,5-10,0
Basalto	0,8			
Intermedias	2,6		10,0	
Graníticas	3,0	1,0-7,0	12,0	1,0-25,0
Granito	3,0		2,0	
Sedimentarias				
Calizas	2,2	0,1-9,0	1,7	0,1-7,0
Areniscas	0,5	0,2-0,6	1,7	0,7-2,0
Arcillas	3,7	1,5-5,5	12,0	8,0-18,0
Yesos	1,1		1,8	
Metamórficas				
Pizarras	5,0		12,0	
Otras				
Asfaltitas	2880,0			
Petróleo		50-100		

Además de los gases, en la atmósfera de las MMS se pueden encontrar distintos productos que dependen de las rocas y minerales presentes en las galerías. Entre ellos cabe señalar la presencia de radiaciones ionizantes como consecuencia de la radiactividad natural, típicamente producida por el K-40, las familias del U-238 y Th-232 y el Rn-222.

Esta radiación siempre está presente en mayor o menor medida pues las rocas contienen estos elementos de forma natural, como muestra la Tabla 4 en lo que respecta al uranio y torio [11,12]. A partir de estos contenidos radiactivos se producen emisiones que se pueden acumular en el aire de las galerías si no se evacúan adecuadamente.

El polvo es otro elemento a considerar aunque su importancia es muy reducida en comparación con la que puede tener en una mina activa. En las MMS no cabe esperar presencia de polvo de carbón, de roca (sílice) ni de minerales (cinabrio) debido a la ausencia de labores mineras. Tan sólo se puede presentar el polvo que se introduzca por el aire de la ventilación o que sea levantado del suelo por la circulación de los visitantes, sin que su peligrosidad parezca relevante. No obstante, nunca sobrarán los controles que garanticen su inocuidad.

Tabla 5. Componentes esperables en el aire de las MMS

COMPONENTE	ORIGEN
O ₂	Aire exterior
N ₂	Aire, carbón, potasa
H ₂	Minas de sal
CO ₂	Oxidación de minerales, Putrefacción de la madera, carbón
CO	Oxidación del carbón
CH ₄	Carbón
SH ₂	Aguas estancadas, descomposición de sustancias orgánicas, minas de sal
Vapor de Hg	Cinabrio, mercurio líquido
Hidrocarburos	Petróleo
Vapor de agua	Aire, agua del subsuelo
Radiac. ionizantes U-Th-K Rn	Rocas del subsuelo
Polvo	Aire exterior e interior

Otros dos elementos fundamentales a considerar en la calidad del aire son su temperatura y humedad. En las MMS, dichos parámetros dependen de las características del aire de ventilación, de la presencia de focos de calor y de la abundancia de aguas subterráneas que desaguan en las galerías. La presencia de esta agua y la sequedad y la velocidad del aire de la ventilación influyen en el grado de humedad ambiental [13]. En general el gradiente geotérmico no suele ser determinante pues las MMS no son hondas ni presentan fuertes contrastes de profundidad.



Fotografía 3. Museo minero de Arnao (España)

En función de la composición del aire y de las sustancias explotadas en los yacimientos base de las MMS, los componentes esperables en ellas son muy diversos y se indican en la Tabla 5. Se han definido para las MMS españolas pero pueden ser extrapolables a multitud de otras.

Tabla 6. Efectos de los gases y vapores en el aire en las MMS

GAS/VAPOR	EFEECTO
O ₂	No tóxico
N ₂	Asfixiante
H ₂	Explosivo
CO ₂	Tóxico
CO	Tóxico
CH ₄	Asfixiante, explosivo
SH ₂	Tóxico
Rn	Tóxico
Hg	Tóxico
HC ¹	Tóxicos

(1) Hidrocarburos

A la vista de la citada tabla se deduce que las minas de carbón y petróleo son las que pueden tener mayor variedad de gases y vapores, seguidas por aquellas que explotan los minerales salinos.

Al efecto de los gases y vapores que son potenciales componentes potenciales del aire en el interior de las MMS se muestra en la Tabla 6. A ellos habría que sumar las radiaciones ionizantes por U-TH-K y el polvo, que producen diversos grados de daños en tejidos y enfermedades pulmonares.

Mantener las concentraciones de estas sustancias bajo control es estrictamente necesario para garantizar que la atmósfera sea saludable. En las MMS, el caudal y la velocidad del aire de refresco son aspectos importantes a considerar ya que los lugares de las visitas pueden

concentrar un elevado número de personas que ocasionen un intenso consumo puntual de oxígeno, lo que hay que prever a fin de que no escasee.

7. Principales componentes del aire de las MMS

Seguidamente se describen los principales componentes del aire que previsiblemente se pueden encontrar en las galerías de las MMS.

7.1. Oxígeno (O₂)

Es un gas necesario para la respiración. En su estado normal es incoloro, inodoro e insípido. Tiene una densidad de 1,429 kg/m³N.

Tabla 7. Síntomas de la disminución del oxígeno respirado en personas

(Fuente: Luque, 1988)

PROPORCIÓN DE O ₂ (en volumen)	SÍNTOMAS
21 - 18	No afecta a la respiración
18 - 14	Aumento del volumen de respiración, elevación del pulso, afectación del juego de los músculos
14 - 10	Marcada elevación del pulso, respiración acelerada, vómitos, desmayos, cianosis
10 - 5	Conmoción por cianosis intensiva, pérdida de conocimiento hasta el coma, respiración rápida superficial que conduce a la convulsión, muerte rápida

El oxígeno se combina con casi todos los materiales mediante el proceso de oxidación. Es imprescindible para la vida y el trabajo humano. No obstante, las condiciones de la MMS pueden condicionar que se reduzca su concentración en el aire debido a varias causas como:

- Una reacción lenta (oxidación silenciosa), que ocurre durante la pudrición de la madera y la oxidación del hierro, del carbón o la pirita. Con ello, aumenta la concentración de anhídrido carbónico. Esta oxidación se presenta cuando las galerías no han sido ventiladas durante un tiempo.

- La respiración de las personas. Una persona precisa consumir 0,2/0,3 litros de oxígeno por minuto para poder mantener el metabolismo de su vida.

- Enriquecimiento del aire en otros gases por aparición de metano, acumulación de anhídrido carbónico, etc.

El organismo humano realiza mejor sus funciones cuando el contenido del oxígeno se mantiene aproximadamente en el 21%. Cuando baja, se producen

los síntomas que indica la Tabla 7 [13]. Un descenso de la proporción de oxígeno por debajo de las necesidades mínimas y, con ello, el peligro de desmayo, no es percibido por los sentidos humanos. La pérdida del conocimiento ocurre cuando el contenido de oxígeno baja del 12%. Por contraste, la llama de una vela se apaga cuando el contenido de oxígeno baja del 16%.

7.2. Nitrógeno (N₂)

Es un gas inerte, incoloro, inodoro e insípido. Tiene una densidad de 1,251 kg/m³N. No es venenoso ni irritante. Se combina con dificultad con otros elementos y, por tanto, se comporta como neutro en el proceso de respiración. En consecuencia, no sostiene la vida ni la combustión; una persona se ahogaría en una atmósfera con más del 88% de nitrógeno [13].

7.3. Hidrógeno (H₂)

Es un gas incoloro, inodoro e insípido. Su densidad es 0,089 kg/m³N.

El hidrógeno es violentamente explosivo mezclado con el aire cuando su concentración varía entre 4 y 75,6% en volumen.

No posee ningún efecto venenoso sobre el organismo humano.

Puede presentarse en los gases de combustión del carbón, en las minas de sal y en las salas de carga de baterías de acumuladores que se puedan emplear durante las visitas [13].

7.4. Anhídrido carbónico (CO₂)

Es un gas incoloro, soluble en agua con la que forma el ácido carbónico, de donde toma un sabor y olor ligeramente ácido que es perceptible a altas concentraciones (>10% en volumen). Su densidad es de 1,976 kg/m³N.

El anhídrido carbónico es el producto final de la combustión completa del carbono y, por ello, es incombustible. Se produce, entre otros, por la respiración del hombre, incendios y la descomposición de materias orgánicas. Es un gas más pesado que el aire, por lo que siempre se le encuentra en las partes más bajas y en las zonas abandonadas de la mina.

El anhídrido carbónico ejerce un efecto directo sobre la respiración, como muestra la Tabla 8 [13], que es tanto más agitada y rápida cuanto mayor es la concentración del gas, llegando incluso a producir la muerte por asfixia.

Tabla 8. Síntomas del aumento del CO₂ sobre la respiración (Fuente: Luque, 1988)

PROPORCIÓN DE CO ₂ (en volumen)	SÍNTOMAS
1	Aumento de la cantidad de aire aspirado sin quebranto de salud
2 - 4	Más del doble de la cantidad de aire de respiración y rápida fatiga
4 - 8	La respiración se triplica y se hace difícil. Fuerte necesidad de respirar y fenómenos de agotamiento
8 - 10	Pérdida de conocimiento y paralización de la respiración. Parálisis del centro de respiración, grave peligro de muerte. Con 20 a 25%, muerte en algunos segundos

La presencia de CO₂ en el aire aumenta la toxicidad del CO [13].

7.5. Monóxido de carbono (CO)

Es un gas extremadamente venenoso, incoloro, inodoro e insípido, muy ligero (densidad: 1,250 kg/m³N), poco soluble en agua, inflamable y con gran capacidad de dispersión. Se genera por la combustión incompleta de sustancias que contienen carbono, como la madera o el carbón.

Como el CO puede continuar la combustión hasta convertirse en anhídrido carbónico, pertenece a los gases combustibles y, como tal, forma con el aire mezclas explosivas cuando está a concentraciones que varían del 12,5 al 74% en volumen.

El efecto pernicioso del CO en el ser humano se basa en que se combina con la hemoglobina de la sangre, reduciendo el contenido de oxígeno en el torrente sanguíneo, que no puede efectuar su cometido distribuidor de este gas por el organismo. El grado de envenenamiento depende del grado de saturación de CO en la sangre y se manifiesta, de menor a mayor gravedad, por dolores de cabeza, náuseas, vómitos, sopor, atonía, desmayo y muerte.

El CO es uno de los gases más peligrosos que existen y es la causa del 90% de los accidentes fatales por intoxicación de gases en minería [13].

7.6. Metano (CH₄)

El metano es un gas incoloro e inodoro que tiene una densidad de 0,7168 kg/m³N.

No es combustible pero, sin embargo, en forma gaseosa se inflama en el aire, formando mezclas explosivas con él cuando alcanza unas concentraciones comprendidas entre el 5 y el 15%. Reacciona igualmente de forma

violenta con otros agentes oxidantes. Los orígenes principales de metano en las MMS son las emisiones a partir de los combustibles sólidos existentes en los huecos y galerías, la descomposición de los residuos orgánicos por bacterias y el agua estancada.

El metano no es tóxico. Su principal peligro para la salud son las quemaduras que puede provocar si entra en ignición. El metano es también un asfixiante ya que puede desplazar al oxígeno en un espacio cerrado. La asfixia puede sobrevenir si la concentración de oxígeno se reduce por debajo del 19,5% [13].

7.7. Sulfuro de hidrógeno (SH₂)

Es un ácido inorgánico que se presenta a temperatura ambiente en forma gaseosa. Es inflamable, más pesado que el aire (densidad: 1,54 kg/m³N), incoloro, tóxico y su olor es el de materia orgánica en descomposición, típicamente huevos podridos, lo que permite que sea detectado a concentraciones muy bajas. Debido a ello su mortandad no es muy elevada.

Se encuentra de forma natural en diversas sustancias como el petróleo y el gas natural, los gases volcánicos y los manantiales de aguas termales. También se puede encontrar en aguas estancadas como resultado de la degradación bacteriana de materia orgánica en condiciones anaerobias.

El sulfuro de hidrógeno es extremadamente tóxico pues bastan 20-50 ppm en el aire para causar un malestar agudo que conduce a la sofocación y a la muerte. La exposición a bajas concentraciones puede irritar los ojos, la nariz y la garganta, y provocar dificultades respiratorias en personas asmáticas. Por su densidad, se suele acumular en lugares bajos que deben ser limpiados mediante una buena ventilación [14].

7.8. Vapor de mercurio (Hg)

El mercurio es el elemento químico de número atómico 80 y peso atómico 200,59. A temperatura ambiente es un líquido plateado. Su punto de fusión es -38,4°C, entrando en ebullición a 357°C, a presión atmosférica. Es un metal soluble únicamente en medios oxidantes. Además, forma soluciones sólidas con algunos metales denominadas amalgamas.

Se le encuentra de forma natural en el medio ambiente, bien como metal, bien como sales de mercurio (sulfuro, cloruro) o como mercurio orgánico en forma de metil mercurio, cuando ha sido transformado por microorganismos.

El mercurio metálico puede evaporarse y ser introducido en el cuerpo humano por la respiración; el

metil mercurio es una sustancia que se absorbe rápidamente por la mayoría de los organismos y daña al sistema nervioso.

El mercurio tiene un número de efectos perniciosos sobre los seres humanos, entre los cuales se pueden citar daños en el sistema nervioso y los riñones, irritación de los pulmones, piel y ojos, reacciones alérgicas, cansancio, vómitos, diarreas y dolor de cabeza [15].

7.9. Hidrocarburos

Bajo este término se agrupa a aquellas sustancias químicas orgánicas compuestas principalmente por hidrógeno y carbono. Tienen su origen en el petróleo crudo y su interés en las MMS se debe a la existencia de minas de petróleo o de asfalto.

Algunos hidrocarburos tienen una conocida toxicidad para el ser humano pero se desconoce el grado de peligrosidad de la mayoría.

Cuando se produce la ingestión de hidrocarburos puede afectar a tres sistemas fundamentales del cuerpo humano: pulmón (tos, ahogo, ronquera y distress respiratorio), aparato gastrointestinal (irritaciones en la boca, faringe e intestino, vómitos, náuseas, malestar intestinal, distensión abdominal, eructos y flatulencia) y sistema nervioso central (depresión del SNC, mareos, pérdida de reflejos y descoordinación).



Fotografía 4. Complejo minero de Puras de Villafranca (España)

Cuando se produce contacto físico con hidrocarburos, las reacciones suelen ser dermatitis de contacto (irritación de la piel y picores) e irritación de los ojos [16].

7.10. Vapor de agua

En el caso de las MMS, el vapor de agua resulta de la evaporación de agua líquida existente en las galerías y del que acompaña al aire que normalmente entra del

exterior cuando se renueva la atmósfera de los espacios subterráneos.

El vapor de agua es inodoro e incoloro y directamente responsable de la humedad ambiental. Cuando ésta supera la cantidad que el aire puede contener, se condensa en pequeñas gotas.

Está comprobada la relación existente entre las enfermedades pulmonares, respiratorias y reumáticas y la presencia de abundante humedad ambiental. La exposición permanente a un ambiente muy húmedo aumenta la posibilidad de contraer enfermedades respiratorias, como el asma y la sinusitis, e infecciones pulmonares como la bronquitis. Si se le une el frío, entre ambos contribuyen a aumentar el dolor en algunas personas con enfermedades reumáticas.

La humedad en las paredes es el hábitat perfecto de ácaros, hongos y bacterias que pueden provocar enfermedades y alergias. Además, la humedad favorece el desarrollo de moho, el cual puede originar asma.



Fotografía 5. Lota (Chile)

Debido a la humedad contenida en el aire se puede tener sensación de malestar, escalofríos, cansancio, dificultad al respirar, pies fríos, dolor de cabeza, malos olores, etc. [17].

Por las razones médicas aducidas y por mantener unas condiciones ambientales de trabajo confortables es importante que se establezca y mantenga el grado de humedad dentro de límites salubres.

7.11. Radiaciones ionizantes

Es la transferencia de energía en forma de partículas u ondas electromagnéticas de una longitud de onda igual o inferior a 100 nanómetros o una frecuencia igual o

superior a $3 \cdot 10^{15}$ hertzios, capaces de producir iones directa o indirectamente [18].

Las fuentes naturales de radiación constituyen la principal exposición a las radiaciones ionizantes para el público en general (87% aproximadamente de la exposición anual total) y presentan una gran variabilidad territorial, pudiendo variar hasta un orden de magnitud entre habitantes de una misma región geográfica [19].

Las causas de las radiaciones ionizantes que se encuentran en el interior de las MMS se pueden dividir en dos grandes grupos: la radiación gamma terrestre producida por uranio, torio y potasio y la generada por el radón.

Las radiaciones ionizantes se pueden acumular en el ambiente si no se evacúan por ventilación de manera que las personas expuestas a ellas (trabajadores de las MMS y visitantes) podrían estar sometidas a dosis inadvertidamente elevadas.

7.1.1. Radiaciones de los radionucleidos uranio-torio-potasio (U-Th-K)

Están producidas por las fuentes naturales terrestres, es decir, las rocas, que contienen uno o más radionucleidos como el K-40 y las familias del U-238 y Th-232.

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos puede decirse que son bien conocidos, en particular para las dosis moderadas y altas (sobre 100 mSv). Sin embargo, para los efectos a bajas dosis (inferiores a 100 mSv) existen opiniones contradictorias entre los expertos, y en esta área está centrada gran parte de la investigación debido a la irradiación asociada a la medicina.

La radiación ionizante puede producir daños en el organismo humano como resultado de la transferencia de energía de las radiaciones a las moléculas de los órganos en donde forman pares de iones y radicales libres.

Según la intensidad de la radiación, los daños causados pueden producir retrasos y alteraciones en la reproducción o la muerte celular.

La respuesta celular a la radiación no es igual para todas las células ya que su sensibilidad es muy diferente. Depende de los tejidos que componen los órganos así como de las características físicas de la radiación. Los órganos más afectados por la radiación y que sufren lesiones más graves son la médula ósea, el intestino delgado y las gónadas.

Si las células no se reparan, los daños causados por la radiación pueden ser permanentes y provocar cambios en tejidos y en órganos que conducen al cáncer [20,21].

7.1.2. Radiaciones del radón (Rn)

El radón es el elemento químico perteneciente al grupo de los gases nobles, de número atómico 86 y peso atómico 222. Su punto de fusión es -71°C , y el de ebullición, -62°C . En su forma gaseosa es incoloro, inodoro e insípido, mientras que en estado sólido es de color rojizo.

El radón es un gas radiactivo inerte que se produce por la desintegración natural del U-238 presente en las rocas y el suelo, del que constituye su único descendiente gaseoso. Tiene un período de semidesintegración de 3,8 días.

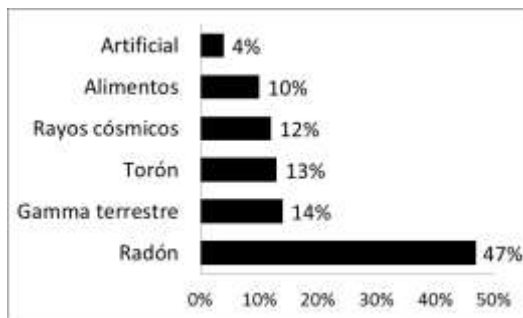


Figura 1. Dosis medias de radiación recibidas por una persona

El radón se libera fácilmente del suelo al aire, donde se desintegra formando varios productos de breve duración, los cuales también se desintegran emitiendo partículas alfa radiactivas que se adhieren a los corpúsculos suspendidos en el aire. Cuando este aire se respira, las partículas alfa entran a los pulmones pero tienen tan escaso poder de penetración que no son capaces de atravesar la piel, por lo que, una vez introducidas en ellos, no consiguen escapar del organismo y depositan toda su energía en él, pudiendo ocasionar lesiones o patologías de muy diversa gravedad según sea la cantidad de radón inhalado.

En el peor de los casos el gas puede causar cáncer de pulmón, calculándose que es responsable del 3 al 14% de este tipo de dolencia siendo en algunos países la segunda causa de esta enfermedad.

El radón y sus descendientes de vida corta (principalmente su isótopo torón) son los causantes de un 60% de las dosis recibidas por radiación natural, es decir, son los principales contribuyentes de las mismas (Figura 1).

Tabla 9. Concentraciones de radón
(Fuente: ISTAS-CCOO, 2019)

Bq/m ³	EFEECTO
10 ⁶	Nivel máximo en cuevas
10 ⁴	Nivel máximo edificios Reino Unido
10 ²	Nivel de acción en edificios
10	Nivel medio en edificios
1	Aire libre

En general, las concentraciones de radón en el aire son muy bajas. Sin embargo, en los espacios interiores son más altas por acumulación y alcanzan el punto más elevado en lugares como minas y cavernas, tal como muestra la Tabla 9. Por ello, estos lugares deben ser especialmente vigilados [19, 22, 23,24].

7.12. Polvo

Se define el polvo como la suspensión de materia sólida, particulada y dispersa en la atmósfera, producida por procesos mecánicos y/o por el movimiento del aire. Una parte de este polvo se introduce en el cuerpo por respiración: es la denominada fracción respirable del polvo que penetra en las vías respiratorias no ciliadas.

El daño producido por el polvo se evita controlando que el contenido de partículas en el aire de las galerías de las MMS se mantenga siempre por debajo del valor límite establecido con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana.

El aparato respiratorio humano dispone de filtros (mucosas de la nariz) que retienen las partículas más grandes; las más pequeñas, sin embargo, tienen una capacidad de penetración mucho mayor, y su adherencia en bronquios y pulmones puede causar problemas respiratorios como asma y bronquitis; dependiendo de su composición e interacción con otros factores, pueden ocasionar a medio y largo plazo cáncer de pulmón.

Los efectos nocivos del aire se pueden establecer a partir de la composición y concentración de las partículas que lleva en suspensión, típicamente de sílice o de carbón, que se estudian para las fracciones denominadas PM10 (diámetro inferior a 10 micras) y PM 2,5 (diámetro inferior a 2.5 micras).

En el caso de la atmósfera en las galerías de las MMS se considera que el polvo presente en ella debe provenir fundamentalmente del exterior, ya que las actividades generadoras de polvo dentro de ellas se limitan a la circulación de los visitantes. El polvo existente en estos lugares subterráneos se puede fijar por diversos procedimientos sencillos e inocuos [25,26].

8. El control de la ventilación

La calidad del aire exterior y la ventilación de los espacios subterráneos son factores que influyen en la composición del aire de las MMS. Sobre el primero poco se puede influir. Sobre la segunda, sí.



Fotografía 6. Centro de Interpretación la Minería y el Hombre en Sierra de San Juan (Aliseda)

Por ello, un aspecto muy importante a considerar en el diseño de las MMS es el estudio de la ventilación. Este tema es objeto de atención prioritaria durante el período de actividad de la mina. Sin embargo, tras el abandono de las labores, se eliminan los ventiladores y se sellan las bocaminas. En muchas ocasiones esto no es óbice para que el aire siga penetrando en la explotación a través de pocillos, fisuras, hundimientos y otras aberturas que la mina presente al exterior, de manera que, con frecuencia se instaura la circulación natural del aire cuyas características dependen de las diferentes cotas en las que pueden estar situadas estas aberturas, a los obstáculos existentes en galerías y pozos interiores (hundimientos, inundación de plantas, etc.) y a la climatología estacional. Si en una galería se ha instalado una colonia de murciélagos es señal de que la circulación de aire bien establecida.

Sin embargo, estas corrientes de aire no suelen ser ni bien conocidas ni controlables. Los cambios de la temperatura del ambiente exterior provocan inversiones del sentido de circulación del aire del verano al invierno. Las diferencias de caudal de aire y de temperatura de una época a otra pueden ser importantes. La presencia ocasional de tormentas de viento puede forzar el tiro de la ventilación acelerando la velocidad de circulación. En definitiva, esta ventilación natural, cuando existe, salvo que se demuestre lo contrario, no puede garantizar un suministro de aire estable y de calidad homogénea al interior de las labores abandonadas. Por ello, uno de los aspectos importantes que debe abordar el estudio de implantación de una MMS es el de la ventilación.

La ventilación de las MMS se debe plantear desde dos puntos de vista:

- Como garantía para mantener la calidad del aire de las galerías visitables.
- Para mantener un ambiente de cierto confort en los espacios subterráneos.

El caudal y velocidad de aire deben asegurar que los componentes de la atmósfera en las galerías no superen los valores límites aconsejables que aseguran su buena calidad. Además, deben contribuir a controlar la temperatura y la humedad ambiental para que no ocasionen molestias a los guías y visitantes. Por otra parte deben garantizar el suministro de suficiente aire sano para la respiración de las personas que estén en el interior de las galerías.

El volumen de aire que debe introducirse en la MMS está en relación con la extensión de las labores mineras visitables, el número de personas presentes en ellas y las condiciones naturales de los huecos y galerías, teniendo en cuenta la temperatura, humedad, emisión de polvo y otras sustancias peligrosas. Por tanto, como no hay dos minas iguales, en cada caso será preciso realizar un estudio de ventilación que garantice las adecuadas condiciones del aire en el interior.

En la etapa en que la mina es una MMS, los requerimientos de aire serán mucho menores que cuando la mina estaba activa debido a numerosos factores, como son la mucha menor longitud de los huecos a ventilar, la falta de funcionamiento de la maquinaria, la ausencia de voladuras y de polvo y metano en condiciones peligrosas pues, de otra forma, no se autorizaría la apertura de la MMS al público, la menor cantidad de aire que necesitan los visitantes al no realizar esfuerzos físicos, el reducido tiempo de permanencia de las personas dentro de la MMS y, finalmente, la menor duración de las jornadas diarias de trabajo de los guías.

Por el contrario, en una MMS pueden concentrarse en el lugar de la visita un elevado número de personas que rápidamente son sustituidas por otras. Con ello, el consumo de oxígeno crece en los puntos de concentración de visitantes, lo que hay que prever a fin de que no escasee. Se desconoce si en las MMS abiertas al público se han realizado estudios de ventilación que garanticen el caudal y calidad del aire. Sin embargo, es de temer que, en algunos casos, una vez constatada la presencia de corrientes de aire por tiro natural en las galerías que se ha previsto recuperar como MMS, se dé

por buena dicha ventilación natural sin mayor comprobación.

9. Propuesta de valores límite

9.1. Introducción

Es evidente que el sector económico que incluye las MMS, las minas a cielo abierto musealizadas y otros espacios subterráneos, como son las cuevas turísticas, necesita una regulación que no ha sido aún acometida por la Administración del Estado, al menos en España y muchos otros países. En tanto se resuelve el problema, la única manera de solucionar el vacío legal existente es que las distintas administraciones con competencia sobre estos espacios recurran a la aplicación analógica del derecho minero y de calidad del aire, procedimiento previsto para estos casos como ya se ha comentado.



Fotografía 7. El Oro, Zaruma (Ecuador)

Sin embargo, es preciso recordar que, para ejercer correctamente la aplicación analógica del derecho, no se puede exigir el cumplimiento de las normas sin una previa adaptación a la situación real de las MMS, y es ahí donde se justifica el presente trabajo, en la adecuación del grado de exigencia aplicable a estas instalaciones.

9.2. Legislación de referencia

A la vista de la compleja problemática de la calidad del aire existente en las MMS, la normativa española que se ha tomado como referencia ha sido variada y de distintos orígenes. La minera ha sido la legislación básica, fundamentalmente el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC), que se ha complementado con otra en los aspectos no regulados por ella. Tal es el caso de los Documentos y Normas Técnicas de Prevención (NTP) del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo

(INSHT) que, aunque no son vinculantes, proporcionan pautas de actuación o de comparación muy válidas.

También se ha consultado legislación y normativa ambiental, como la Ley de calidad del aire y protección de la atmósfera, el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, ambos con sus actualizaciones y complementos, y diversas normas del INSHT.

Además se ha tenido en cuenta diversa documentación emitida por la Organización Mundial de la salud, la Unión Europea, el Consejo de Seguridad Nuclear de España y la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos, así como una serie de publicaciones técnicas redactadas por investigadores.

9.3. Criterios de asignación y valores límite de referencia

En este apartado se van a comentar distintos índices de referencia basados en la documentación anteriormente citada considerando los siguientes grupos de elementos:

- Gases y vapores típicos mineros como son O_2 , H_2 , CO_2 , CO , SO_2 , CH_4 , SH_2 , NO y NO_2 .
- Vapores y gases producidos por emanaciones minerales, como Hg e hidrocarburos.
- Radiaciones ionizantes (excepto radón).
- Radón.
- Polvo.
- Temperatura y humedad ambiental.

A partir de estos índices y considerando la casuística de las MMS, se establecerá posteriormente la propuesta de valores límites.

9.3.1. Gases y vapores mineros

La referencia fundamental es el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera [27] y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC). De ellas la 04.7.06 [28] afecta al control de gases tóxicos en explotaciones subterráneas y la 05.0.02 [29] es la que trata específicamente del metano, y del clima en la mina.

En ellas se establecen los contenidos máximos admisibles para los gases a lo largo de una jornada de ocho horas. Establecen, igualmente, contenidos límites para condiciones más peligrosas durante períodos cortos de tiempo que, si se sobrepasan, obligan a desalojar las labores.

A los efectos de la calidad del aire en las MMS se considera aplicable exclusiva-mente el primer grupo de

valores ya que nunca se deben alcanzar en ellas concentraciones gaseosas peligrosas, como sería el segundo caso. Los valores seleccionados se indican en la Tabla 10.

Tabla 10. Propuesta de valores límite para gases en las MMS (expresadas respecto el volumen de aire)

GAS	LÍMITE	OBSERVACIONES
O ₂	≥ 19%	
H ₂	0,4%	
CO ₂	5.000 ppm	
CO	25 ppm	
SO ₂	0,5 ppm	
CH ₄	0,8% 1,5%	En retornos principales En las restantes labores
SH ₂	5 ppm	
NO	25 ppm	
NO ₂	3 ppm	

9.3.2. Vapores producidos por emanaciones minerales

Este capítulo es el más complicado pues la normativa es muy extensa y está en constante actualización. Además, el legislador ha abierto dos frentes distintos que son, por un lado, la calidad del aire atmosférico y, por otro, la de la atmósfera en los lugares de trabajo.



Fotografía 8. Museo minero de Escucha (España)

Las sustancias que se consideran en este apartado, a la vista de las características de las MMS españolas, son el mercurio y los vapores derivados del petróleo.

En lo que respecta al mercurio, la referencia más reciente es el informe Límites de exposición profesional para agentes químicos en España [30], que anualmente elabora el INSHT, actualizándolo a partir de los estudios más recientes de diversos organismos internacionales. En la versión consultada, que corresponde al año 2019, se incluye la información

requerida, que es la referencia considerada en este trabajo.

El segundo grupo de sustancias son los hidrocarburos que puede emitir el petróleo que mana en las galerías.

Al respecto, el citado informe Límites de exposición profesional para agentes químicos en España incide en las concentraciones máximas recomendables del benceno y de los aerosoles provenientes del asfalto solubles en él. Por otra parte, las normas ambientales relativas a la calidad del aire [25, 31,32] alertan sobre el control de determinados hidrocarburos contaminantes como son el propio benceno, el benzo(a) pireno y los denominados hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). El citado informe sobre límites de exposición indica que tanto el benzo(a) pireno como los HAP tienen carácter cancerígeno y mutante y que su producción está controlada (no se citan fuentes naturales). Por ello no indica concentraciones limitantes. Debido a estas razones, no parece razonable incluirlos en la propuesta que se presenta.

Tabla 11. Propuesta de valores límite para vapores en las MMS españolas (expresadas respecto el volumen de aire)

VAPOR	LÍMITE	OBSERVACIONES
Hg	0,02 ppm 0,01 ppm 0,1 ppm	VLA-ED Elemental e inorgánico Orgánico (alquil) Orgánico (aril)
C ₆ H ₆	1 ppm 3,25 ppm	VLA-ED
HC	0,5 ppm	VLA-ED

VLA-ED: Valor límite ambiental, exposición diaria (8 h).

HC: Hidrocarburos. Aerosoles de asfalto solubles en benceno.

En conclusión, los únicos hidrocarburos considerados son el benceno y los aerosoles de asfalto solubles en benceno.

Las concentraciones de las tres sustancias de este capítulo se indican en la Tabla 11.

9.3.3. Radiaciones ionizantes (excepto radón)

El Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes [18] y su posterior modificación [33], no comprenden en su ámbito de aplicación la exposición al radón, los radio nucleídos contenidos en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo ni la exposición por encima del nivel del suelo debida a los radio nucleídos presentes en la corteza terrestre no alterada. El contenido de esta norma transpone la Directiva 96/29/EURATOM.



Fotografía 9. Parque Minero de Río Tinto (España)

Los límites máximos de dosis efectiva están claramente definidos en ella; para trabajadores expuestos es de 100 mSv durante un periodo de cinco años consecutivos (20 mSv/año), sujeto a una dosis efectiva máxima de 50 mSv en cualquier año. Además, se establecen límites adicionales más elevados para el cristalino del ojo, piel, manos, antebrazos, pies y tobillos.

De acuerdo con el Consejo de Seguridad Nuclear [23], en condiciones de trabajo normales, los umbrales de referencia para los controles radiológicos personales son:

- <1mSv/año: no es necesario control regulador
- 1-6 mSv/año: se debe aplicar un nivel bajo de control regulador
- 6-20 mSv/año: se debe aplicar un nivel alto de control regulador
- >20 mSv/año: el proceso no debe estar permitido sin una estimación completa individual.

La legislación prevé trabajos en situaciones de mayor riesgo pero no se consideran ya que una MMS nunca debe ser autorizada en ambientes riesgosos.

Para el público en general, el límite es de 1 mSv por año, con excepciones más elevadas para el cristalino y la piel.

Teniendo en cuenta la normativa comentada que contempla la distinta duración de la exposición al riesgo de los trabajadores (guías de las MMS) y del público en general, se adopta como referencia el valor de dosis máxima de 1 mSv/año.

9.3.4. Radón

La legislación española sobre radiaciones ionizantes [18,33] excluye el radón por lo que los criterios para establecer la protección radiológica frente a dicho gas se deben tomar de las recomendaciones realizadas en otros foros como es la directiva europea

2013/59/EURATOM. Dicha directiva debía haber sido ya transpuesta en la legislación española y entrada en vigor antes del 6 de febrero de 2018 pero diversas circunstancias lo han retrasado. De acuerdo con ella, que se toma como referencia, el límite máximo tanto para viviendas como para lugares de trabajo es de 300 Bq/m³ [34].

Esta recomendación coincide con la de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) [35], que está auspiciada por la Unión Europea. Sin embargo, se da la paradoja siguiente. El organismo europeo estableció en 1mSv/año el límite de la dosis de exposición anual para el público en general y en 5 mSv/año el límite de dosis ocupacional. Pero, teniendo en cuenta que la IAEA estableció un factor de conversión entre la media temporal de la concentración de actividad de gas Rn-222 y el equivalente de dosis efectiva anual de que 30 Bq/m³ equivalen a 1 mSv/año, una población sometida a concentraciones medias de 300 Bq/m³, soporta dosis típicas de 10 mSv/año, el doble de la indicada para los trabajadores y diez veces la recomendada para el público en general.

Los valores anteriores pueden considerarse un tanto elevados respecto a los impuestos por otras organizaciones como la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), que ha fijado un único nivel de referencia de 4 pCi/l equivalente a 148 Bq/m³ como la concentración máxima de radón permisible en edificios, tanto de nueva como de vieja construcción [36].

Por su parte, Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda no superar 100 Bq/m³ de concentración de actividad debida al radón [37]. La OMS propone este valor basándose en que, cuando se supera, se incrementa rápidamente la incidencia del cáncer. Si, debido a las condiciones específicas del lugar, ese nivel no puede alcanzarse se recomienda no superar los 300 Bq/m³.

No se conocen medidas de radón en minas españolas, salvo de uranio, aunque sí en cuevas kársticas calcáreas. En la de Nerja (Málaga), que tiene un volumen de 300.000 m³ y recibe 450.000 visitantes al año, las medidas de radón mostraron valores diarios comprendidos entre 26 y 546 Bq/m³, alcanzándose concentraciones inferiores a 100 Bq/m³ durante los meses de octubre a junio y superiores a 400 Bq/m³ durante los meses de julio a septiembre. Estos valores demuestran una correlación entre la temperatura exterior y la concentración de radón en el aire de la cueva [38].



Fotografía 10. Ecomuseo de Samuño (España)

Por otro lado, en el estudio de siete cuevas turísticas de Cantabria, se obtuvieron concentraciones medias de radón comprendidas entre 179 Bq/m³ y 775 Bq/m³, con valores máximos y mínimos de 20 y 5.300 Bq/m³. Estas cuevas disponen de muy escasa ventilación debido a la necesidad de conservar las pinturas rupestres existentes en ellas [39].

A la vista de las propuestas de los distintos organismos, y teniendo en cuenta el probado efecto cancerígeno del radón, se propone una concentración máxima de 200 Bq/m³, superior a la recomendada por la EPA de Estados Unidos y la OMS pero inferior a la dosis límite de 300 Bq/m³ que no debe sobrepasarse.

9.3.5. Polvo

La ITC 04.8.01 [26] es la que regula en detalle la peligrosidad de las labores mineras en función del polvo presente en ellas. Para ello las divide en tres clases y nueve grupos establecidos según el peso de polvo respirable en mg/m³ de aire y del porcentaje de sílice libre contenido en él.

En dicha ITC se consideran seguras las labores cuyo aire tiene el contenido en polvo que se indica en la Tabla 12 o inferior.

Tabla 12. Límite de polvo para un aire seguro según ITC 04.8.01

	CONTENIDO SÍLICE LIBRE		
	<10%	10-30%	>30%
Peso polvo	<6 mg/m ³	<3 mg/m ³	<2 mg/m ³

Por otra parte, el RD 102/2011 [25] señala las concentraciones límite de partículas en el aire atmosférico para la protección de la salud. En este caso, los valores límite se han establecido en función del tamaño de la partícula (PM10 y PM 2,5), estando comprendidos entre 25 y 50 µg/m³ de aire. Estos valores son 100 veces menores que los considerados salubres por la legislación minera. A los efectos de esta propuesta se considera que, como el polvo presente en las MMS debe provenir fundamentalmente del exterior, ya que las actividades generadoras de polvo dentro de ellas se limitan a la circulación de los visitantes, y que el polvo existente se puede fijar por diversos procedimientos sencillos e inocuos, procede aplicar la legislación general para el aire exterior, es decir, la contenida en el RD 102/2011.

9.3.6. Temperatura y humedad

La temperatura en las labores mineras se calcula considerando la humedad del aire (temperatura equivalente); en España está establecida por la ITC 04.7.02 [40] mediante la fórmula:

$$t_e = 0,1 \cdot t_s + 0,9 \cdot t_h$$

Siendo:

t_s = Temperatura seca, en °C (medida con el termómetro de bulbo seco).

t_h = Temperatura húmeda, en °C (medida con el termómetro de bulbo húmedo).

La ITC señala que no se deben superar los 33°C de temperatura equivalente.

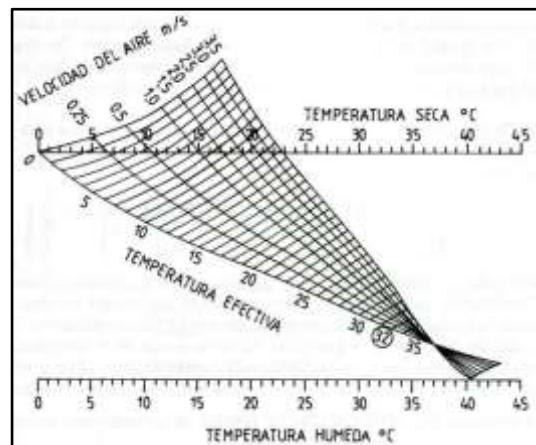


Figura 2. Ábaco para el cálculo de la temperatura equivalente

Posteriormente, la ITC 04.7.05 [41], que no deroga la anterior, proporciona otra forma más completa de medir la temperatura equivalente. El cálculo incluye, además de las temperaturas seca y húmeda, la

velocidad de la corriente de aire de ventilación. La temperatura equivalente resulta de utilizar el ábaco de la Figura 2 cuyas curvas, aproximadamente, tienen la siguiente ecuación [13]:

$$t_e = 0,3 \cdot t_s + 0,7 \cdot t_h - V$$

En donde:

V = Velocidad del aire, en m/s.

Al igual que en caso anterior, la ITC prohíbe trabajar por encima de 33°C de temperatura equivalente.

El clima más favorable en la mina se corresponde con una temperatura equivalente de hasta 27°; 32° son muy molestos e impiden trabajar y 35°, insoportables [13].

Por otro lado, el RD 486/1997 [42] regula las condiciones ambientales de los lugares de trabajo. Para los ambientes cerrados donde se realicen trabajos sedentarios propios de oficinas establece temperaturas comprendidas entre 17 y 27°C; si en los locales se realizan trabajos ligeros, las temperaturas deben estar entre 14 y 25°C.

Otras indicaciones sobre la temperatura del aire en locales y edificios cerrados pueden encontrarse en las NTP 243 [43] y 431 [44] del INSHT, tomadas de las recomendaciones efectuadas por distintas instituciones.

En cuanto a la humedad ambiental, el citado RD 486/1997 señala que debe estar comprendida entre el 30 y el 70%, excepto en los locales donde existan riesgos por electricidad estática en los que el límite inferior será el 50%. Por su parte las citadas normas técnicas prevención NTP 243 y NTP 431 del INSHT también proporcionan información sobre la humedad relativa ambiental en estos mismos espacios; los datos agrupados de ambos parámetros físicos se resumen en la Tabla 13.

Tabla 13. Temperaturas y humedad relativa en ambientes cerrados

NORMA	TEMP. (°C)	H.RELATIVA (%)
RD 486/1997	15-26	30-70
NTP 243	14-27	20-60
NTP 431	20-26	30-60

Teniendo en cuenta las recomendaciones expuestas, se proponen una temperatura y humedad relativa en el interior de las MMS de 17-26°C y 30-60% respectivamente.

9.3.7. Ventilación de las galerías

La ventilación de los espacios subterráneos que componen las MMS es una tarea fundamental que no puede dejarse al albur de una ventilación natural establecida espontáneamente desde aberturas que no se controlan.

De acuerdo con la ITC 04.7.01 [45], el volumen de aire introducido estará en relación con la extensión de las labores mineras, el número de personas presentes en ellas y las condiciones naturales de las galerías, teniendo en cuenta la temperatura, humedad, emisión de polvo y otras sustancias peligrosas. No obstante, la ITC obliga a que el caudal mínimo de aire sea de 40 l/s·persona, lo que equivale a 144 m³/h·persona.

La norma que regula la ventilación en otros espacios no mineros es el RD 486/1997 [42]. Dicha disposición indica que la renovación mínima del aire de los locales de trabajo debe ser de 30 m³ de aire limpio por hora y trabajador en el caso de trabajos sedentarios en ambientes no calurosos ni contaminados por humo de tabaco, y de 50 m³ en los casos restantes, a fin de evitar el ambiente viciado y los olores desagradables. El sistema de ventilación empleado y, en particular, la distribución de las entradas de aire limpio y salidas de aire viciado, deberá asegurar una efectiva renovación del aire del local de trabajo.

Tabla 14. Caudales de aire exterior de ventilación

FUENTE	CAUDAL (m ³ /h·persona)
RD 486/1997	30-50 (locales cerrados)
ASHRAE	34 (oficina)
OGSHT	30-50 (oficina)
NTP 431	20-50 (edificios)
ITC 04.7.01	144 (mina)

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

OGSHT: Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo

Existen otras pautas de caudales de aire de ventilación por persona para oficinas y lugares cerrados [43,44]; junto con las comentadas se indican en la Tabla 14.

En lo que respecta a la velocidad del aire circulante, debe ser la suficiente para cumplir la misión reservada al sistema de ventilación. Esta velocidad está definida en las ITC 04.7.01 [45] y 05.0.01 [46], según las cuales el aire en una mina debe moverse a velocidades comprendidas entre un máximo de 8 m/s y un mínimo de 0,2 m/s.

Al respecto hay que comentar que velocidades del aire superiores a 2 m/s provocan la sensación de corriente y, por lo tanto, molestias en las personas [47].

Según el RD 486/1997, que también regula esta cuestión, los trabajadores no deberán estar expuestos de forma frecuente o continuada a corrientes de aire cuya velocidad exceda los siguientes límites:

- Trabajos en ambientes no calurosos: 0,25 m/s.
- Trabajos sedentarios en ambientes calurosos: 0,5 m/s.
- Trabajos no sedentarios en ambientes calurosos: 0,75 m/s.

Estos límites no se aplicarán a las corrientes de aire expresamente utilizadas para evitar el estrés en exposiciones intensas al calor, ni a las corrientes de aire acondicionado, para las que el límite será de 0,25 m/s en el caso de trabajos sedentarios y 0,35 m/s en los demás casos.



Fotografía 11. Parque Minero de Almadén (España)

Estos mismos valores son aportados por la OGSHT que indica, además, que el aire se debe renovar de seis a diez veces por hora [43].

En conclusión, a la vista de la legislación minera y de la correspondiente a los locales cerrados, y teniendo en cuenta que las MMS participan de las características de ambos, se proponen los límites siguientes:

- Caudal de ventilación: 50 m³/h-persona.
- Velocidad de ventilación: 0,25-1,75 m/s.

De todas formas, el correspondiente proyecto de ventilación será el que establezca en cada caso los caudales y velocidades adecuados a las características de las respectivas MMS.

9.3.8. Resumen de propuesta de valores límite en MMS

Como conclusión de lo anteriormente indicado y considerando las características propias de las MMS españolas, en los capítulos anteriores se han establecido los valores límite propuestos para 19

parámetros ambientales que pueden estar presentes en ellas, los cuales se presentan agrupados en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15. Propuesta de valores límite para gases, vapores y radiaciones ionizantes en las MMS españolas (Todas salvo R.I. expresadas respecto el volumen de aire)

ITEM	LÍMITE	OBSERVACIONES
O ₂	≥ 19%	
H ₂	0,4%	
CO ₂	5.000 ppm	
CO	25 ppm	
SO ₂	0,5 ppm	
CH ₄	0,8% 1,5%	En retornos principales En las restantes labores
SH ₂	5 ppm	
NO	25 ppm	
NO ₂	3 ppm	
Hg	0,02 ppm 0,01 ppm 0,1 ppm	VLA-ED Elemental e inorgánico Orgánico (alquil) Orgánico (aril)
C ₆ H ₆	1 ppm 3,25 ppm	VLA-ED
HC	0,5 ppm	VLA-ED
R.I.	1 mSv/año	Sobre el valor del fondo geoquímico
Rn	200 Bq/m ³	

VLA-ED: Valor límite ambiental, exposición diaria (8 h).
HC: Hidrocarburos. Aerosoles de asfalto solubles en benceno.

R.I.: Radiaciones ionizantes (excepto radón).

Para las sustancias que lo requieren los valores límite corresponden a los VLA-ED, es decir, Valor Límite Ambiental-Exposición Diaria, que es el valor de referencia para la exposición diaria del trabajador (ocho horas de trabajo al día y 40 horas semanales) [30]. Representan las condiciones en las que se cree que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos día tras día, durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para su salud. Los VLA-ED sirven exclusivamente para la evaluación y el control de los riesgos por inhalación de los agentes químicos incluidos en la presente evaluación, pero no constituyen una barrera definida de separación entre situaciones seguras y peligrosas. Por tanto, no deben utilizarse para la evaluación de la contaminación medioambiental, ni para la estimación de los índices relativos de toxicidad de los agentes químicos o como prueba del origen, laboral o no, de una enfermedad o estado físico existente.

Tabla 16. Propuesta de valores límite para parámetros físicos en las MMS españolas

PARÁMETRO	LÍMITE
Polvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ de aire)	
PM10 límite diario	50
PM10 límite anual	40
PM2,5 límite anual	25
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	17-26
Humedad relativa (%)	30-60
Caudal aire ($\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{pers}$).	50
Velocidad del aire (m/s)	0,25-1,75

Dichas tablas constituyen un primer paso y una invitación a las autoridades para el establecimiento de los parámetros de calidad del aire en las galerías y huecos mineros que forman las MMS.

10. Conclusiones

Las MMS españolas y de muchos otros países carecen de una legislación específica a pesar de que son visitadas por 500.000 personas al año. Uno de los aspectos fundamentales que está pendiente es la regulación de la calidad del aire en su interior a fin de garantizar la seguridad de guías y visitantes. Al respecto cabe señalar que las MMS son instalaciones intermedias entre las galerías mineras y los locales cerrados, siendo las condiciones ambientales menos rigurosas que en las primeras y más que en las segundas. Por ello, en el presente trabajo se ha estudiado la posibilidad de diseñar una normativa propia para la calidad del aire en estas instalaciones a partir de la existente en España para minería, la industria en general y el medio ambiente, ayudándose del principio de la aplicación analógica del Derecho. Los resultados obtenidos demuestran que dicha iniciativa es perfectamente posible y viable, sin que sea necesario emitir nuevas normas sino adaptar las existentes, pues abarcan todos los factores que influyen en la calidad del aire de las MMS. En consecuencia, se han establecido límites máximos de seguridad para los distintos componentes de la atmósfera en estos lugares como son gases, vapores, radiaciones ionizantes, polvo, temperatura, humedad relativa y caudal y velocidad del aire de ventilación. En total se han definido dieciséis valores límite que sin dificultad se podrían aplicar a dichas instalaciones subterráneas.

11. Referencias

[1] Orche, E. Puesta en valor del patrimonio geológico-minero: el proceso de adaptación de explotaciones mineras a parques temáticos. En Villas-Boas, R.C.; González, A.; Sá, G. (Eds.) Patrimonio geológico y

minero en el contexto del cierre de minas. CETEM-CYTED-IMAAC-CNPq. Río de Janeiro: 2003, 51-65.

[2] Orche, E. La función multidisciplinar de los parques geo mineros. En Guillén, F.; Del Ramo, A. (Eds.) El Patrimonio Geológico: Cultura, Turismo y Medio Ambiente. Murcia: 2004, 93-99.

[3] Armesto, J.L.; Orche, E. Metodología para la transformación de labores mineras en parques temáticos. Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.I. Minas. Universidad de Vigo. Vigo: 2002.

[4] Orche, E. Problemática de la calidad del aire en las minas subterráneas rehabilitadas como museos. Propuesta de soluciones. En Navarro, V. (Ed.) Desarrollo industrial sustentable: llave para la responsabilidad social. Lisboa: 2011, 47-64.

[5] Orche, E. Componentes potenciales del aire en las minas museo subterráneas españolas. En Mata, J.M. (Ed.) Valorización de elementos geo mineros en contexto de los geo parques. 2011: 485-506.

[6] Ministerio de Justicia. Decreto 1836/1.974, de 31 de mayo, por el que se sanciona con fuerza de Ley el texto articulado del Título Preliminar del Código Civil.

[7] Anónimo. Analogía jurídica. Buenas Tareas. 2011. <https://www.buenastareas.com/ensayos/Analogia-Juridica/1984635.html>. Consultada el 4 de noviembre de 2020.

[8] Orche, E.; Orche, M.P. Un problema no resuelto: la seguridad de los parques mineros españoles. De Re Metallica, 10-11. Madrid: 2008, 11-20.

[9] Orche, E. Problemática de la seguridad en los parques mineros españoles. De Re Metallica, 3. Madrid: 2004, 55-65.

[10] Amaré, M.P.; Orche, E. Espacios expositivos mineros y minas musealizadas españolas. Mata, J.M. (Ed.) Valorización de elementos geo mineros en contexto de los geo parques. 2011: 539-562.

[11] Suárez, E.; Fernández, J.A. El mapa de la radiactividad natural de España. Extrados, 41. Madrid: 1996, 10-15.

[12] Idaho State University. Radiation information networks. Radioactivity in Nature. http://www.acamedia.info/sciences/J_G/envrad/Natural_Radioactivity.html. Consultada el 5 de noviembre de 2020.

[13] Luque, V. Manual de ventilación de minas. AITEMIN. Madrid: 2011.

- [14] Wang, R. La función dual del sulfuro de hidrógeno. *Investigación y Ciencia*. 404. 2010, 56-61.
- [15] Anónimo. Efectos en la salud por la exposición al mercurio. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). 2018. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-en-la-salud-por-la-exposicion-al-mercurio>. Consultada el 1 de noviembre de 2020.
- [16] Borrás, G. Efectos de los hidrocarburos en la salud humana. <http://econatural-sva.blogspot.com/2011/05/efectos-de-los-hidrocarburos-en-la.html>. Consultada el 1 de noviembre de 2020.
- [17] García, C. Los efectos de la humedad excesiva en la salud. AIRALIA.ES. <https://www.airalia.es/blog/los-efectos-de-la-humedad-excesiva-en-la-salud/>. Consultada el 2 de noviembre de 2020.
- [18] Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes.
- [19] Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS-CCOO). Exposición laboral al radón. Guía para la prevención. Ministerio de Trabajo, Migraciones y Seguridad Social-Fundación Estatal para la prevención de Riesgos Laborales-ISTAS-CCOO. 2019.
- [20] Anónimo. Efectos de la radiación sobre la salud. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). 2018. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-de-la-radiacion-sobre-la-salud>. Consultada el 2 de noviembre de 2020.
- [21] Consejo de Seguridad Nuclear. Curso de Supervisores de instalaciones radiactivas (IR) Módulo básico. TEMA 7: Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico. 2013. http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1581136598_1572009112950.pdf. Consultada el 2 de noviembre de 2020.
- [22] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Madrid: 1999.
- [23] Consejo de Seguridad Nuclear. Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, del Consejo de Seguridad Nuclear, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
- [24] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). NTP 440: El radón en ambientes interiores. Madrid.
- [25] Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.
- [26] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 04.8.01. Labores subterráneas. Ventilación y desagüe. Condiciones ambientales: Lucha contra el polvo. 1985.
- [27] Ministerio de Industria y Energía. Real Decreto 863/1985, de 2 de abril, por el que se aprueba el Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera.
- [28] Ministerio de Transición Ecológica. ITC 04.7.06. Control de gases tóxicos en explotaciones subterráneas. 2018.
- [29] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 05.0.02. Minas subterráneas de carbón y labores con riesgo de explosión. Ventilación y desagüe. Contenidos límites de metano en la corriente de aire. 1985.
- [30] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Límites de exposición profesional para agentes químicos en España, 2019. Madrid: 2019.
- [31] Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Real Decreto 100/2011, de 28 de enero, por el que se actualiza el catálogo de actividades potencialmente contaminadoras de la atmósfera y se establecen las disposiciones básicas para su aplicación.
- [32] Presidencia del Gobierno. Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera.
- [33] Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio.
- [34] Unión Europea. Directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013 por la que se establecen normas de seguridad básica para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes.
- [35] Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA) Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. General Safety Requirements Part 3. Viena: 2014.

- [36] Anónimo. A citizen's guide to radon. The Guide to protecting yourself and your family from radon. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). 2012.
- [37] Organización Mundial de la Salud (OMS). Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública. Ginebra: 2015.
- [38] Rosal, Y.; Garrido, A.; Montesino, A.; Liñán, C. Estudios del radón en la Cueva de Nerja (Málaga). En Durán, J.J.; Carrasco, F. (Eds.) Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo. ACTE. Madrid: 2010,183-192.
- [39] Sainz, C.; Fuente, I.; Quindós, L.; García, M.; Gutiérrez, J.L.; Arteché, J.L.; Quindós, L.S. Dosis ocupacional debida al radón en cavidades subterráneas: cuevas turísticas. En Durán, J.J.; Carrasco, F. (Eds.) Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo. ACTE. Madrid: 2010, 229-238.
- [40] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 04.7.02. Labores subterráneas. Ventilación y desagüe. Concentraciones límites de gases. Temperatura, humedad, clima. 1985.
- [41] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 04.8.01. Labores subterráneas. Ventilación y desagüe. Temperatura y humedad. 1990.
- [42] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- [43] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (INSHT) NTP 243: Ambientes cerrados: calidad del aire. Madrid: 1989.
- [44] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (INSHT) NTP 431: Caracterización de la calidad del aire en ambientes interiores. Madrid: 1996.
- [45] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 04.7.01. Labores subterráneas. Ventilación y desagüe. Circulación de la corriente de aire. 1985.
- [46] Ministerio de Industria y Energía. ITC MIE SM 05.0.01. Minas subterráneas de carbón y labores con riesgo de explosión. Ventilación y desagüe. Circulación de la corriente de aire. 1985.
- [47] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. (INSHT) NTP 741: Ventilación general por dilución. Madrid: 2006.

Artículo recibido en: 07.11.2020

Artículo aceptado: 24.11.2020