

Normas de seguridad del OIEA

para la protección de las personas y el medio ambiente

Protección del público contra la exposición en espacios interiores debida al radón y a otras fuentes naturales de radiación

Copatrocinada por el OIEA y la OMS



IAEA



WHO

Guía de seguridad específica

Nº SSG-32



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA Y PUBLICACIONES CONEXAS

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Con arreglo a lo dispuesto en el artículo III de su Estatuto, el OIEA está autorizado a establecer o adoptar normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y a disponer lo necesario para aplicar esas normas.

Las publicaciones mediante las cuales el OIEA establece las normas pertenecen a la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*. Esta colección abarca la seguridad nuclear, radiológica, del transporte y de los desechos. La colección comprende las siguientes categorías: **Nociones Fundamentales de Seguridad, Requisitos de Seguridad y Guías de Seguridad.**

Para obtener información sobre el programa de normas de seguridad del OIEA puede consultarse el sitio del OIEA:

<http://www-ns.iaea.org/standards/>

En este sitio se encuentran los textos en inglés de las normas de seguridad publicadas y de los proyectos de normas. También figuran los textos de las normas de seguridad publicados en árabe, chino, español, francés y ruso, el *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA* y un informe de situación sobre las normas de seguridad que están en proceso de elaboración. Para más información se ruega ponerse en contacto con el OIEA en la dirección: Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria.

Se invita a los usuarios de las normas de seguridad del OIEA a informar al Organismo sobre su experiencia en la utilización de las normas (por ejemplo, si se han utilizado como base de los reglamentos nacionales, para realizar exámenes de la seguridad o para impartir cursos de capacitación), con el fin de asegurar que sigan satisfaciendo las necesidades de los usuarios. Se puede hacer llegar la información a través del sitio del OIEA o por correo postal a la dirección anteriormente señalada, o por correo electrónico a la dirección: Official.Mail@iaea.org.

PUBLICACIONES CONEXAS

El OIEA facilita la aplicación de las normas y, con arreglo a las disposiciones de los artículos III y VIII.C de su Estatuto, pone a disposición información relacionada con las actividades nucleares pacíficas, fomenta su intercambio y sirve de intermediario para ello entre sus Estados Miembros.

Los informes sobre seguridad en las actividades nucleares se publican como **Informes de Seguridad**, en los que se ofrecen ejemplos prácticos y métodos detallados que se pueden utilizar en apoyo de las normas de seguridad.

Existen asimismo otras publicaciones del OIEA relacionadas con la seguridad, como las relativas a la **preparación y respuesta para casos de emergencia**, los **informes sobre evaluación radiológica**, los **informes del INSAG** (Grupo Internacional Asesor en Seguridad Nuclear), los **informes técnicos** y los **documentos TECDOC**. El OIEA publica asimismo informes sobre accidentes radiológicos, manuales de capacitación y manuales prácticos, así como otras obras especiales relacionadas con la seguridad.

Las publicaciones relacionadas con la seguridad física aparecen en la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*.

La *Colección de Energía Nuclear del OIEA* comprende publicaciones de carácter informativo destinadas a fomentar y facilitar la investigación, el desarrollo y la aplicación práctica de la energía nuclear con fines pacíficos. Incluye informes y guías sobre la situación y los adelantos de las tecnologías, así como experiencias, buenas prácticas y ejemplos prácticos en relación con la energía nucleoelectrónica, el ciclo del combustible nuclear, la gestión de desechos radiactivos y la clausura.

PROTECCIÓN DEL PÚBLICO CONTRA LA EXPOSICIÓN
EN ESPACIOS INTERIORES DEBIDA AL RADÓN Y
A OTRAS FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

COLECCIÓN DE
NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA N° SSG-32

PROTECCIÓN DEL PÚBLICO
CONTRA LA EXPOSICIÓN
EN ESPACIOS INTERIORES DEBIDA
AL RADÓN Y A OTRAS FUENTES
NATURALES DE RADIACIÓN

GUÍA DE SEGURIDAD ESPECÍFICA

COPATROCINADA POR EL ORGANISMO INTERNACIONAL DE
ENERGÍA ATÓMICA Y LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA, 2018

DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor, que ahora incluyen la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Para la utilización de textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, impresas o en formato electrónico, deberá obtenerse la correspondiente autorización y, por lo general, dicha utilización estará sujeta a un acuerdo de pago de regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta
Sección Editorial
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Viena, Austria
fax: +43 1 2600 29302
tel.: +43 1 2600 22417
correo electrónico: sales.publications@iaea.org
<http://www.iaea.org/books>

© OIEA, 2018

Impreso por el OIEA en Austria
Septiembre de 2018
STI/PUB/1651

PROTECCIÓN DEL PÚBLICO CONTRA LA EXPOSICIÓN
EN ESPACIOS INTERIORES DEBIDA AL RADÓN Y
A OTRAS FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN
OIEA, VIENA, 2018
STI/PUB/1651
ISBN 978-92-0-302117-3
ISSN 1020-5837

PRÓLOGO

de Yukiya Amano
Director General

El OIEA está autorizado por su Estatuto a “establecer o adoptar [...] normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad” —normas que el OIEA debe utilizar en sus propias operaciones y que los Estados pueden aplicar mediante sus disposiciones de reglamentación de la seguridad nuclear y radiológica—. A esos efectos, el OIEA consulta con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados pertinentes. Un amplio conjunto de normas de alta calidad revisadas periódicamente es un elemento clave de un régimen de seguridad mundial estable y sostenible, como también lo es la asistencia del OIEA en la aplicación de esas normas.

El OIEA inició su programa de normas de seguridad en 1958. El énfasis puesto en su calidad, idoneidad y mejora continua ha redundado en el uso generalizado de las normas del OIEA en todo el mundo. La *Colección de Normas de Seguridad* incluye ahora principios fundamentales de seguridad unificados, que representan un consenso internacional acerca de lo que debe constituir un alto grado de protección y seguridad. Con el firme apoyo de la Comisión sobre Normas de Seguridad, el OIEA se esfuerza por promover la aceptación y el uso a escala mundial de sus normas.

Las normas solo son eficaces si se aplican adecuadamente en la práctica. Los servicios de seguridad del OIEA abarcan el diseño, la selección de emplazamientos y la seguridad técnica, la seguridad operacional, la seguridad radiológica, la seguridad en el transporte de materiales radiactivos y la seguridad en la gestión de los desechos radiactivos, así como la organización a nivel gubernamental, las cuestiones relacionadas con reglamentación y la cultura de la seguridad en las organizaciones. Estos servicios de seguridad prestan asistencia a los Estados Miembros en la aplicación de las normas y posibilitan el intercambio de experiencias y conocimientos valiosos.

La reglamentación de la seguridad es una responsabilidad nacional y muchos Estados han decidido adoptar las normas del OIEA para incorporarlas en sus reglamentos nacionales. Para las partes en las diversas convenciones internacionales sobre seguridad, las normas del OIEA son un medio coherente y fiable de asegurar el cumplimiento eficaz de las obligaciones emanadas de esas convenciones. Los órganos reguladores y los explotadores de todo el mundo también aplican las normas para mejorar la seguridad en la generación de energía nucleoelectrónica y en las aplicaciones de la energía nuclear en la medicina, la industria, la agricultura y la investigación.

La seguridad no es un fin en sí misma, sino un requisito indispensable para la protección de las personas de todos los Estados y del medio ambiente, ahora y en el futuro. Los riesgos relacionados con la radiación ionizante deben evaluarse y controlarse sin restringir indebidamente la contribución de la energía nuclear al desarrollo equitativo y sostenible. Los Gobiernos, los órganos reguladores y los explotadores de todo el mundo deben velar por que los materiales nucleares y las fuentes de radiación se utilicen con fines beneficiosos y de manera segura y ética. Las normas de seguridad del OIEA están concebidas para facilitar esa tarea, y aliento a todos los Estados Miembros a hacer uso de ellas.

PREFACIO

Los requisitos para la protección de las personas contra las consecuencias nocivas de la exposición a la radiación ionizante, la seguridad de las fuentes de radiación y la protección del medio ambiente se establecen en la publicación de la categoría Requisitos de Seguridad del OIEA titulada *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad (Colección de Normas de Seguridad del OIEA, N° GSR Part 3)*. El volumen N° GSR Part 3 de la *Colección de Normas de Seguridad* está copatrocinado por la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE (AEN de la OCDE), la Comisión Europea, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

En la presente Guía de Seguridad se ofrecen recomendaciones y orientaciones sobre el cumplimiento de los requisitos establecidos en la publicación N° GSR Part 3 para la protección del público contra la exposición debida a fuentes naturales de radiación ionizante en espacios interiores. Se formulan recomendaciones y orientaciones para que las autoridades nacionales apliquen los requisitos de justificación y optimización de la protección al abordar el control de las fuentes naturales de radiación en espacios interiores, como el gas radón y los radionucleidos de origen natural presentes en los materiales de construcción, y para que los Estados establezcan ‘planes de acción sobre el radón’ a nivel nacional con el fin de controlar la exposición del público causada por la presencia de este gas en los espacios interiores.

Esta Guía de Seguridad está patrocinada conjuntamente por el OIEA y la OMS. El OIEA desea expresar su sincero agradecimiento a los expertos de diversos Estados y de la OMS que contribuyeron a la redacción y el examen del texto.

NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

ANTECEDENTES

La radiactividad es un fenómeno natural y las fuentes naturales de radiación son una característica del medio ambiente. Las radiaciones y las sustancias radiactivas tienen muchas aplicaciones beneficiosas, que van desde la generación de electricidad hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Los riesgos radiológicos que estas aplicaciones pueden entrañar para los trabajadores y el público y para el medio ambiente deben evaluarse y, de ser necesario, controlarse.

Para ello es preciso que actividades tales como los usos de la radiación con fines médicos, la explotación de instalaciones nucleares, la producción, el transporte y la utilización de material radiactivo y la gestión de los desechos radiactivos estén sujetas a normas de seguridad.

La reglamentación relativa a la seguridad es una responsabilidad nacional. Sin embargo, los riesgos radiológicos pueden trascender las fronteras nacionales, y la cooperación internacional ayuda a promover y aumentar la seguridad en todo el mundo mediante el intercambio de experiencias y el mejoramiento de la capacidad para controlar los peligros, prevenir los accidentes, responder a las emergencias y mitigar las consecuencias nocivas.

Los Estados tienen una obligación de diligencia, y deben cumplir sus compromisos y obligaciones nacionales e internacionales.

Las normas internacionales de seguridad ayudan a los Estados a cumplir sus obligaciones dimanantes de los principios generales del derecho internacional, como las que se relacionan con la protección del medio ambiente. Las normas internacionales de seguridad también promueven y afirman la confianza en la seguridad, y facilitan el comercio y los intercambios internacionales.

Existe un régimen mundial de seguridad nuclear que es objeto de mejora continua. Las normas de seguridad del OIEA, que apoyan la aplicación de instrumentos internacionales vinculantes y la creación de infraestructuras nacionales de seguridad, son una piedra angular de este régimen mundial. Las normas de seguridad del OIEA constituyen un instrumento útil para las partes contratantes en la evaluación de su desempeño en virtud de esas convenciones internacionales.

LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Las normas de seguridad del OIEA se basan en el Estatuto de este, que autoriza al OIEA a establecer o adoptar, en consulta y, cuando proceda, en

colaboración con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados interesados, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y proveer a la aplicación de estas normas.

Con miras a garantizar la protección de las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante, las normas de seguridad del OIEA establecen principios fundamentales de seguridad, requisitos y medidas para controlar la exposición de las personas a las radiaciones y la emisión de materiales radiactivos al medio ambiente, reducir la probabilidad de sucesos que puedan dar lugar a una pérdida de control sobre el núcleo de un reactor nuclear, una reacción nuclear en cadena, una fuente radiactiva o cualquier otra fuente de radiación, y mitigar las consecuencias de esos sucesos si se producen. Las normas se aplican a instalaciones y actividades que dan lugar a riesgos radiológicos, comprendidas las instalaciones nucleares, el uso de la radiación y de las fuentes radiactivas, el transporte de materiales radiactivos y la gestión de los desechos radiactivos.

Las medidas de seguridad tecnológica y las medidas de seguridad física¹ tienen en común la finalidad de proteger la vida y la salud humanas y el medio ambiente. Las medidas de seguridad tecnológica y de seguridad física deben diseñarse y aplicarse en forma integrada, de modo que las medidas de seguridad física no comprometan la seguridad tecnológica y las medidas de seguridad tecnológica no comprometan la seguridad física.

Las normas de seguridad del OIEA reflejan un consenso internacional con respecto a lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Las normas se publican en la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, que comprende tres categorías (véase la Fig. 1).

Nociones Fundamentales de Seguridad

Las Nociones Fundamentales de Seguridad presentan los objetivos y principios fundamentales de protección y seguridad, y constituyen la base de los requisitos de seguridad.

Requisitos de Seguridad

Un conjunto integrado y coherente de requisitos de seguridad establece los requisitos que se han de cumplir para garantizar la protección de las personas y el medio ambiente, tanto en el presente como en el futuro. Los requisitos se rigen por los objetivos y principios de las Nociones Fundamentales de Seguridad. Si los

¹ Véanse también las publicaciones de la *Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*.

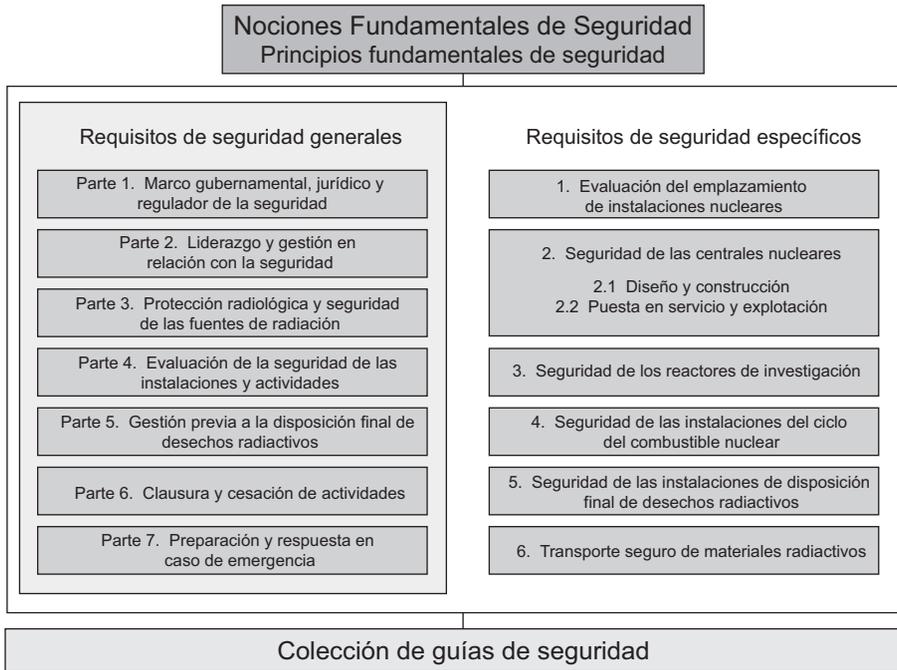


Fig. 1. Estructura a largo plazo de la Colección de Normas de Seguridad del OIEA.

requisitos no se cumplen, deben adoptarse medidas para alcanzar o restablecer el grado de seguridad requerido. El formato y el estilo de los requisitos facilitan su uso para establecer, de forma armonizada, un marco nacional de reglamentación. En los requisitos de seguridad se emplean formas verbales imperativas, junto con las condiciones conexas que deben cumplirse. Muchos de los requisitos no se dirigen a una parte en particular, lo que significa que incumbe cumplirlos a las partes que corresponda.

Guías de Seguridad

Las guías de seguridad ofrecen recomendaciones y orientación sobre cómo cumplir los requisitos de seguridad, lo que indica un consenso internacional en el sentido de que es necesario adoptar las medidas recomendadas (u otras medidas equivalentes). Las guías de seguridad contienen ejemplos de buenas prácticas internacionales y dan cuenta cada vez más de las mejores prácticas que existen para ayudar a los usuarios que tratan de alcanzar altos grados de seguridad. En la formulación de las recomendaciones de las guías de seguridad se emplean formas verbales condicionales.

APLICACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

Los principales usuarios de las normas de seguridad en los Estados Miembros del OIEA son órganos reguladores y otras autoridades nacionales competentes. También hacen uso de las normas de seguridad del OIEA organizaciones copatrocinadoras y muchas organizaciones que diseñan, construyen y explotan instalaciones nucleares, así como organizaciones en las que se usan radiaciones o fuentes radiactivas.

Las normas de seguridad del OIEA se aplican, según el caso, a lo largo de toda la vida de todas las instalaciones y actividades —existentes y nuevas— que tienen fines pacíficos, y a las medidas protectoras destinadas a reducir los riesgos existentes en relación con las radiaciones. Los Estados también pueden usarlas como referencia para sus reglamentos nacionales relativos a instalaciones y actividades.

De conformidad con el Estatuto del OIEA, las normas de seguridad tienen carácter vinculante para el OIEA en relación con sus propias operaciones, así como para los Estados en relación con las operaciones realizadas con la asistencia del OIEA.

Las normas de seguridad del OIEA también constituyen la base de los servicios de examen de la seguridad que este brinda; el OIEA recurre a esos servicios en apoyo de la creación de capacidad, incluida la elaboración de planes de enseñanza y la creación de cursos de capacitación.

Los convenios internacionales contienen requisitos similares a los que figuran en las normas de seguridad del OIEA y tienen carácter vinculante para las partes contratantes. Las normas de seguridad del OIEA, complementadas por convenios internacionales, normas de la industria y requisitos nacionales detallados, forman una base coherente para la protección de las personas y el medio ambiente. Existen también algunos aspectos de la seguridad especiales que se deben evaluar a nivel nacional. Por ejemplo, muchas de las normas de seguridad del OIEA, en particular las que tratan aspectos relativos a la seguridad en la planificación o el diseño, se conciben con el fin de aplicarlas principalmente a nuevas instalaciones y actividades. Es posible que algunas instalaciones existentes construidas conforme a normas anteriores no cumplan plenamente los requisitos especificados en las normas de seguridad del OIEA. Corresponde a cada Estado decidir el modo en que deberán aplicarse las normas de seguridad del OIEA a esas instalaciones.

Las consideraciones científicas en las que descansan las normas de seguridad del OIEA proporcionan una base objetiva para la adopción de decisiones acerca de la seguridad; sin embargo, las instancias decisorias deben también formarse opiniones fundamentadas y determinar la mejor manera de equilibrar los beneficios de una medida o actividad con los riesgos radiológicos

conexos y cualquier otro efecto perjudicial a que pueda dar lugar esa medida o actividad.

PROCESO DE ELABORACIÓN DE LAS NORMAS DE SEGURIDAD DEL OIEA

En la elaboración y el examen de las normas de seguridad participan la Secretaría del OIEA y cinco comités de normas de seguridad, que se ocupan de la preparación y respuesta para casos de emergencia (EPRéSC) (a partir de 2016), la seguridad nuclear (NUSSC), la seguridad radiológica (RASSC), la seguridad de los desechos radiactivos (WASSC) y el transporte seguro de materiales radiactivos (TRANSSC), así como la Comisión sobre Normas de Seguridad (CSS), que supervisa el programa de normas de seguridad del OIEA (véase la Fig. 2).

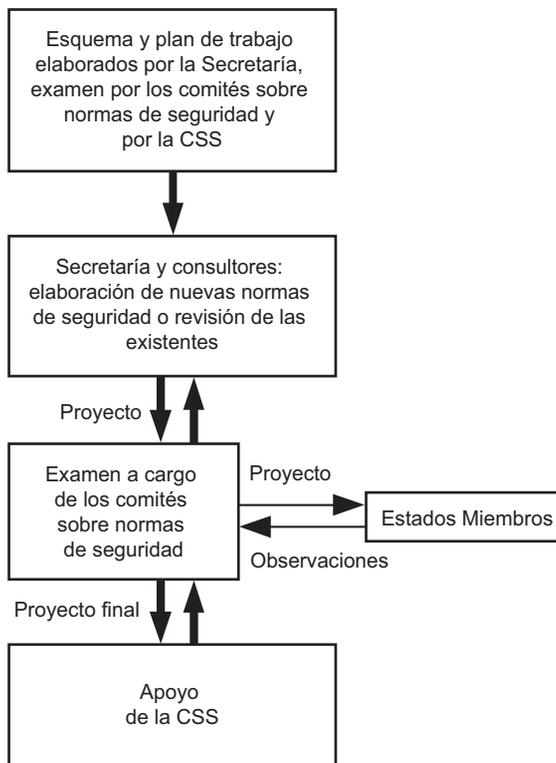


Fig. 2. Proceso de elaboración de una nueva norma de seguridad o de revisión de una norma existente.

Todos los Estados Miembros del OIEA pueden designar expertos para que participen en los comités de normas de seguridad y formular observaciones sobre los proyectos de normas. Los miembros de la Comisión sobre Normas de Seguridad son designados por el Director General y figuran entre ellos altos funcionarios gubernamentales encargados del establecimiento de normas nacionales.

Se ha creado un sistema de gestión para los procesos de planificación, desarrollo, examen, revisión y establecimiento de normas de seguridad del OIEA. Ese sistema articula el mandato del OIEA, la visión relativa a la futura aplicación de las normas de seguridad, las políticas y las estrategias, y las correspondientes funciones y responsabilidades.

INTERACCIÓN CON OTRAS ORGANIZACIONES INTERNACIONALES

En la elaboración de las normas de seguridad del OIEA se tienen en cuenta las conclusiones del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y las recomendaciones de órganos internacionales de expertos, en particular la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). Algunas normas de seguridad se elaboran en cooperación con otros órganos del sistema de las Naciones Unidas u otros organismos especializados, entre ellos la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Organización Internacional del Trabajo, la Agencia para la Energía Nuclear de la OCDE, la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Mundial de la Salud.

INTERPRETACIÓN DEL TEXTO

Los términos relacionados con la seguridad se interpretarán como se definen en el *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA* (véase la dirección <http://www-ns.iaea.org/downloads/standards/glossary/safety-glossary-spanish.pdf>). En el caso de las Guías de Seguridad, el texto en inglés es la versión autorizada.

En la Introducción que figura en la sección 1 de cada publicación se presentan los antecedentes y el contexto de cada norma de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, así como sus objetivos, alcance y estructura.

Todo el material para el cual no existe un lugar adecuado en el cuerpo del texto (por ejemplo, información de carácter complementario o independiente del texto principal, que se incluye en apoyo de declaraciones que figuran en el

texto principal, o que describe métodos de cálculo, procedimientos o límites y condiciones) puede presentarse en apéndices o anexos.

Cuando figuran en la publicación, los apéndices se consideran parte integrante de la norma de seguridad. El material que figura en un apéndice tiene el mismo valor que el texto principal y el OIEA asume su autoría. Los anexos y notas de pie de página del texto principal, en su caso, se utilizan para proporcionar ejemplos prácticos o información o explicaciones adicionales. Los anexos y notas de pie de página no son parte integrante del texto principal. La información publicada por el OIEA en forma de anexos no es necesariamente de su autoría; la información que corresponda a otros autores podrá presentarse en forma de anexos. La información procedente de otras fuentes que se presenta en los anexos ha sido extraída y adaptada para que sea de utilidad general.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
	Antecedentes (1.1–1.8)	1
	Objetivo (1.9)	3
	Ámbito de aplicación (1.10–1.11)	3
	Estructura (1.12–1.13)	5
2.	POLÍTICA NACIONAL Y PAPEL DE LA AUTORIDAD NACIONAL (2.1–2.9)	6
3.	CONTROL DE LA EXPOSICIÓN DEBIDA AL RADÓN EN LOS ESPACIOS INTERIORES	9
	Consideraciones generales (3.1–3.2)	9
	Exposición debida al ^{222}Rn	9
	Origen y concentraciones del ^{222}Rn en espacios interiores (3.3–3.12)	9
	Suministro de información sobre el radón (3.13–3.17)	13
	Estudios del radón en espacios interiores (3.18–3.22)	14
	Plan de acción sobre el radón (3.23–3.59)	16
	Exposición debida al ^{220}Rn	28
	Origen y concentraciones del ^{220}Rn en espacios interiores (3.60–3.61)	28
	Estudios del ^{220}Rn en espacios interiores (3.62–3.64)	29
	Control y reducción de la exposición debida al ^{220}Rn (3.65–3.67)	29
4.	CONTROL DE LA EXPOSICIÓN DEBIDA A LA RADIACIÓN GAMMA EN LOS ESPACIOS INTERIORES	30
	Fuentes naturales de radiación gamma (4.1–4.9)	30
	Métodos para la medición de la radiación gamma (4.10–4.12)	32
	Estudios de la radiación gamma (4.13–4.14)	33
	Control y reducción de la exposición a la radiación gamma	33
	Radiación gamma emitida por los suelos (4.15–4.16)	33
	Radiación gamma emitida por los materiales de construcción (4.17–4.27)	34
	Radiación gamma emitida por los materiales de construcción en edificios ya existentes (4.28–4.30)	37

REFERENCIAS	39
ANEXO I: ESTUDIOS DEL RADÓN Y MAPEO DE LAS ZONAS PROPENSAS AL ^{222}Rn	43
ANEXO II: TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL ^{222}Rn Y EL ^{220}Rn	52
ANEXO III: MEDIDAS PREVENTIVAS PARA REDUCIR LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn EN VIVIENDAS Y OTROS EDIFICIOS NUEVOS	65
ANEXO IV: MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn EN VIVIENDAS Y OTROS EDIFICIOS YA EXISTENTES	71
ANEXO V: PROGRAMAS DE INFORMACIÓN PÚBLICA SOBRE LOS RIESGOS DEBIDOS AL RADÓN	78
ANEXO VI: APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO PARA LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	83
COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN	97

1. INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

1.1. En la publicación titulada *Principios Fundamentales de Seguridad* [1] de la categoría Nociones Fundamentales de Seguridad se establecen el objetivo y los principios de seguridad para la protección de las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. En virtud del principio 10, “[l]as medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse.” Una de las situaciones a las que se refiere este principio es la exposición debida a las fuentes naturales de radiación, como la exposición causada por la presencia de radón¹ en las viviendas y los lugares de trabajo y la exposición externa a la radiación gamma emitida por los radionucleidos de origen natural presentes en los materiales de construcción.

1.2. En la publicación de la categoría Requisitos de Seguridad del OIEA titulada *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad* (GSR Part 3) [2] se enuncian los requisitos para la protección de las personas contra la exposición a la radiación ionizante (denominada en adelante ‘la radiación’) y para la seguridad de las fuentes de radiación. El volumen N° GSR Part 3 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, que contiene los requisitos elaborados a partir de la información sobre los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación proporcionada por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) [3] y de las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) [4], sienta las bases para la reglamentación de la protección radiológica.

1.3. La protección del público, tal como se define en la publicación GSR Part 3, ha formado siempre parte de los requisitos de protección radiológica. Sin embargo, las orientaciones específicas que se han elaborado para proteger al público contra la exposición a las fuentes naturales de radiación han sido relativamente pocas. La presente Guía de Seguridad tiene por objeto colmar esta laguna examinando la determinación y aplicación de medidas apropiadas para proteger a las personas contra la exposición en espacios interiores causada por las fuentes naturales de

¹ En la presente Guía de Seguridad, al igual que en la publicación GSR Part 3, el término ‘radón’ se refiere a cualquier combinación de los dos isótopos principales del elemento radón (el ²²²Rn y el ²²⁰Rn).

radiación. La exposición en los espacios interiores es por lo general más alta que la exposición en el exterior, pero es más fácil de controlar.

1.4. En su Publicación 103 [4], la ICRP se refiere específicamente a la exposición del público debida al radón presente en los espacios interiores como una esfera en que se precisan recomendaciones para la aplicación de los requisitos relativos a la protección radiológica. En su Publicación 65 [5], la ICRP presenta sus recomendaciones sobre los niveles de acción en las viviendas ya existentes, las viviendas nuevas y los lugares de trabajo sobre y bajo el suelo, así como sus recomendaciones para determinar las zonas propensas al radón y para aplicar medidas preventivas y correctivas. En su Declaración sobre el Radón de 2009 [6], la ICRP señala que una dosis efectiva anual de aproximadamente 10 mSv causada por el ^{222}Rn sería un nivel al que casi seguramente se justificaría adoptar medidas para reducir la exposición. Teniendo en cuenta los nuevos resultados, la ICRP ha revisado el valor superior del nivel de referencia para el gas radón en las viviendas, reduciéndolo de 600 Bq/m³ —el valor propuesto en sus recomendaciones de 2007— a 300 Bq/m³.

1.5. La Organización Mundial de la Salud (OMS) trató los aspectos de salud pública de la exposición debida al ^{222}Rn en los espacios interiores [7] dando a conocer las pruebas epidemiológicas de que esa exposición es responsable de un número considerable de casos de cáncer de pulmón en la población general. Su publicación titulada *Manual de la OMS sobre el radón en interiores* ofrece recomendaciones detalladas sobre la reducción de los riesgos para la salud causados por el ^{222}Rn , junto con las opciones de política para prevenir y reducir la exposición a ese radionucleido. La OMS propone un nivel de referencia de 100 Bq/m³ para reducir al mínimo los peligros sanitarios de la exposición debida al ^{222}Rn en espacios interiores, añadiendo que “[s]i dicho nivel no pudiera alcanzarse en las actuales circunstancias concretas del país, el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los 300 Bq/m³”.

1.6. En su Publicación 82 [8], la ICRP trata de los radionucleidos de origen natural emisores de radiación gamma que están presentes en los materiales de construcción y en el suelo. La ICRP recomienda un nivel de dosis de referencia de alrededor de 1 mSv para los tipos predominantes de productos que pueden controlarse mediante una intervención —como algunos materiales de construcción— y que en algunas circunstancias pueden ser una causa importante de exposición prolongada. La ICRP recomienda que las organizaciones nacionales interesadas y, cuando sea el caso, las organizaciones internacionales pertinentes calculen niveles de referencia para los productos, en particular para determinados materiales de construcción.

1.7. La exposición de los miembros de la población debida a los radionucleidos de origen natural presentes en los alimentos es en general baja, y normalmente no es posible controlarla. El aumento de la concentración de los radionucleidos de origen natural en los productos alimenticios, por ejemplo debido a las descargas dimanantes de una instalación o una actividad, está sujeto a los requisitos aplicables a las situaciones de exposición planificadas. Los niveles de orientación para los radionucleidos presentes en los alimentos objeto de comercio internacional y destinados al consumo humano han sido publicados por la Comisión Conjunta FAO/OMS del Codex Alimentarius [9], para los alimentos que puedan quedar contaminados tras una emergencia nuclear o radiológica.

1.8. De la presencia de radionucleidos de origen natural en el agua potable se ha ocupado la OMS en la revisión más reciente de sus guías para la calidad del agua potable [10]. La OMS ha descrito a grandes rasgos un enfoque para controlar la ingesta de radionucleidos de origen natural y artificial presentes en el agua potable utilizando niveles de cribado. También ha expuesto un método para controlar la inhalación de radón liberado por el agua potable al aire de los espacios interiores.

OBJETIVO

1.9. En la presente Guía de Seguridad se ofrecen recomendaciones para cumplir los requisitos establecidos en la referencia [2] con respecto a la exposición del público en los espacios interiores causada por las fuentes naturales de radiación, junto con orientaciones para que las autoridades nacionales apliquen los requisitos de justificación y optimización de la protección al abordar el control de esas fuentes naturales de radiación, como el radón en los espacios interiores y los radionucleidos de origen natural presentes en los materiales de construcción.

ÁMBITO DE APLICACIÓN

1.10. El ámbito de aplicación de la presente Guía de Seguridad es la exposición del público en los espacios interiores debida a las fuentes naturales de radiación. La Guía contiene las recomendaciones y orientaciones que deben aplicar los órganos reguladores y todas las demás autoridades y organizaciones que tengan responsabilidades relacionadas con la exposición a radiaciones emitidas por fuentes naturales (denominadas en adelante ‘la autoridad nacional’ y definidas en el párrafo 2.3) para cumplir los requisitos enunciados en la referencia [2]. Concretamente, las recomendaciones y orientaciones comprenden lo siguiente:

- a) La exposición de la población debida al ^{222}Rn presente en las viviendas y en otros edificios con altos factores de ocupación por el público. Esto incluye edificios tales como los jardines de infancia, las escuelas y los hospitales. Deben tomarse en consideración tanto la elevada ocupación total por personas (ref. [1], párr. 3.23) como los altos factores de ocupación. Las vías de exposición consideradas son: la entrada de ^{222}Rn desde el suelo; el ^{222}Rn emitido por los materiales de construcción de las viviendas; y el ^{222}Rn que penetra en las viviendas a través del suministro de agua.
- b) La exposición de la población debida al ^{220}Rn presente en las viviendas. Las vías de exposición consideradas son el ^{220}Rn emitido por el suelo y el ^{220}Rn emitido por los materiales de construcción de las viviendas. El ^{220}Rn que penetra en las viviendas a través del suministro de agua no suele causar una exposición importante a la radiación.
- c) La exposición de la población a la radiación gamma exterior emitida por los radionucleidos de origen natural presentes en el suelo y en los materiales de construcción. Por ‘materiales de construcción’ se entienden los materiales utilizados para construir edificios tales como viviendas, oficinas, locales industriales y otros lugares de trabajo.

1.11. La presente Guía de Seguridad no incluye lo siguiente:

- a) La exposición debida al ^{40}K presente en el cuerpo humano y la exposición debida a la radiación cósmica en la superficie de la Tierra, que no se consideran controlables y, por lo tanto, no están incluidas en el ámbito de aplicación de la referencia [2] (véase la ref. [2], párr. 1.42, nota a pie de página 7).
- b) La exposición ocupacional de los trabajadores debida a fuentes naturales de radiación (véase la ref. [2], párr. 3.4 a)). El ^{222}Rn y el ^{220}Rn pueden generar exposición ocupacional en lugares de trabajo tales como oficinas y fábricas. La gestión de esta exposición ocupacional se menciona en la presente Guía de Seguridad, pero las recomendaciones y orientaciones correspondientes se proporcionarán en una guía de seguridad sobre la protección radiológica ocupacional que está en fase de elaboración [11].
- c) La exposición de la población debida a las descargas y a la gestión de los desechos radiactivos producidos por fuentes naturales (véase la ref. [2], párr. 3.4 b)). Estas formas de exposición del público se tratarán en las guías de seguridad sobre el control reglamentario de las descargas radiactivas al medio ambiente [12] y sobre la gestión de los residuos radiactivos de la minería, el procesamiento de minerales y otras actividades relacionadas con materiales radiactivos naturales (NORM) [13].

- d) La exposición de las personas a la radiación cósmica durante los viajes aéreos. Esta exposición no se considera controlable y, por lo tanto, queda excluida del ámbito de aplicación de la referencia [2] y de la presente Guía de Seguridad.
- e) La exposición de la población debida a los radionucleidos de origen natural presentes en los alimentos y en el agua potable.
- f) La exposición de la población debida al radón en lugares de trabajo con bajo factor de ocupación por el público, como las oficinas y las fábricas. Los visitantes de las cuevas que ofrecen visitas guiadas al público en general se expondrán probablemente al radón solo por un breve período de tiempo, por lo que estas situaciones no suelen requerir control.
- g) La exposición de la población debida a los radionucleidos de origen natural presentes en los materiales utilizados en los elementos infraestructurales de los entornos construidos, como los caminos, los puentes, las presas y las obras de defensa contra el mar. Estos radionucleidos no dan lugar a una exposición importante del público porque los tiempos de exposición son breves.

ESTRUCTURA

1.12. En la sección 2 se ofrecen recomendaciones y orientaciones sobre el marco gubernamental, jurídico y regulador para la elaboración de políticas en esta esfera y sobre el papel de la autoridad nacional. En la sección 3 se presenta una visión general de la exposición causada por el ^{222}Rn y el ^{220}Rn y se formulan recomendaciones y orientaciones sobre los enfoques para su gestión. La sección 4 contiene recomendaciones y orientaciones sobre el enfoque regulador para controlar la exposición a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción.

1.13. Seis anexos proporcionan orientaciones adicionales, en particular sobre el radón como principal contribuyente a la exposición debida a las fuentes naturales de radiación. El anexo I ofrece orientación sobre los estudios del radón en espacios interiores. El anexo II contiene un examen de las técnicas de medición del radón. El anexo III proporciona orientación sobre las técnicas de construcción para prevenir la acumulación de radón en las viviendas y otros edificios nuevos. En el anexo IV se examinan las medidas correctivas para reducir las concentraciones altas de radón en las viviendas y otros edificios ya existentes. El anexo V ofrece un panorama general de los programas de información pública para crear conciencia sobre los riesgos relacionados con el radón. El anexo VI contiene ejemplos de la aplicación de algoritmos para controlar la exposición en

los espacios interiores a la radiación gamma emitida por los radionucleidos de origen natural presentes en los materiales de construcción.

2. POLÍTICA NACIONAL Y PAPEL DE LA AUTORIDAD NACIONAL

2.1. En la referencia [14] se dispone que “[e]l gobierno deberá establecer un sistema eficaz de medidas protectoras para reducir los riesgos radiológicos indebidos asociados con fuentes no reglamentadas (de origen natural y artificial) y la contaminación derivada de actividades o sucesos pasados, de conformidad con los principios de justificación y optimización” (ref. [14], requisito 9). Entre esas fuentes no reglamentadas de origen natural figuran el ^{222}Rn y el ^{220}Rn presentes en las viviendas y otros edificios con factores de ocupación elevados, y los radionucleidos de origen natural que forman parte de los materiales de construcción.

2.2. En virtud de lo dispuesto en la referencia [2], “[e]l gobierno asegurará que se evalúen las situaciones de exposición existentes que se hayan identificado para determinar qué exposiciones ocupacionales y exposiciones del público son motivo de preocupación desde el punto de vista de la protección radiológica” (ref. [2], requisito 47). Para esas situaciones, el gobierno deberá velar por que se asignen las responsabilidades relativas a la protección y la seguridad y por que se establezcan niveles de referencia apropiados (ref. [2], párr. 5.2).

2.3. La ejecución de un programa eficaz para proteger al público contra la exposición en espacios interiores debida a fuentes naturales de radiación podría entrañar la participación de varias organizaciones diferentes. En la presente Guía de Seguridad se emplea el término ‘autoridad nacional’ para referirse colectivamente al órgano regulador y a todas las demás autoridades y organizaciones con responsabilidades relacionadas con la exposición a la radiación emitida por fuentes naturales. Esas organizaciones pueden ser, entre otras, las que intervienen en las políticas de salud pública y de protección radiológica, los órganos públicos y privados especializados en las mediciones de la radiación, y los órganos que establecen y aplican las normas de construcción. Normalmente, la organización principal debería ser aquella que tenga la responsabilidad de la protección radiológica.

2.4. La autoridad nacional debería iniciar una evaluación para determinar si la exposición en espacios interiores debida a las fuentes naturales de radiación como el ^{222}Rn , el ^{220}Rn y los rayos gamma presentes en las viviendas justifica la elaboración de estrategias de protección radiológica para reducirla.

2.5. Una vez realizada esa evaluación, y si se determina que es necesaria una acción ulterior, se debería elaborar una política integral para garantizar la protección óptima del público contra la exposición en espacios interiores debida a las fuentes naturales de radiación.

2.6. La autoridad nacional debe velar por que la estrategia de protección que adopte el programa destinado a proteger al público contra la exposición en espacios interiores causada por las fuentes naturales de radiación sea proporcionada a los riesgos que entrañen esas fuentes. La autoridad nacional debe también velar por que las medidas de protección que se impongan tengan unos beneficios previstos que compensen el detrimento causado por su aplicación, incluyendo los perjuicios en forma de riesgos radiológicos; es decir, debe garantizarse la justificación de las medidas de protección (ref. [2], párr. 5.7). La autoridad nacional tiene además la obligación de velar por que se optimicen la forma, la escala y la duración de esas medidas (ref. [2], párr. 5.8).

2.7. En la exposición de la población causada por las fuentes naturales de radiación en espacios interiores, el ^{222}Rn es, por lo general, el elemento predominante. La autoridad nacional debería determinar el alcance de la exposición de la población al ^{222}Rn realizando estudios nacionales y regionales basados en las normas nacionales e internacionales que describen los métodos de ensayo aplicables al ^{222}Rn [15]. Esos estudios son útiles también para detectar las zonas con concentraciones de ^{222}Rn superiores a la media, a menudo denominadas 'zonas propensas al ^{222}Rn ' (véanse los párrs. 3.42 a 3.45). Los estudios de la exposición al ^{220}Rn (véanse los párrs. 3.62 a 3.64) y de la exposición a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción (véase la sección 4) pueden ser útiles en algunas circunstancias.

2.8. Si los resultados obtenidos en los estudios señalados en el párrafo 2.7 indican la necesidad de ello, la autoridad nacional debería:

- a) Establecer niveles de referencia para el ^{222}Rn y, si se considera necesario, para el ^{220}Rn en las viviendas² (véanse los párrs. 3.35 a 3.40 y 3.65);
- b) Establecer normas nacionales para las concentraciones de radionucleidos de origen natural en los materiales de construcción sobre la base de los niveles de concentración de la actividad especificados en la publicación GSR Part 3 [2] (véase la sección 4);
- c) Establecer programas de medición para identificar las viviendas y los otros edificios con altos factores de ocupación por el público en que se superen los niveles de referencia del radón;
- d) Establecer un programa para determinar los materiales de construcción que puedan dar lugar a una exposición del público que exceda del nivel de referencia para esos materiales;
- e) Elaborar y aplicar un marco para reducir la exposición debida al ^{222}Rn y el ^{220}Rn en las viviendas ya existentes y nuevas y en los otros edificios con altos factores de ocupación por el público (véanse los párrs. 3.23 a 3.59 y 3.65 a 3.67), y para controlar los radionucleidos presentes en los materiales de construcción (véanse los párrs. 4.17 a 4.27). Este marco debería incluir criterios para evaluar el éxito de los programas de reducción de las concentraciones de ^{222}Rn y ^{220}Rn en los espacios interiores, así como evaluaciones económicas que tengan en cuenta la totalidad de los costos relacionados con esos programas.

2.9. Hay situaciones en que la autoridad nacional debe considerar si la reglamentación puede ser un medio apropiado para controlar o reducir la exposición debida a las fuentes naturales de radiación en los espacios interiores. En las secciones 3 y 4 se presentan recomendaciones y orientaciones para esas situaciones. Al decidir si es necesaria una reglamentación, la autoridad nacional debería tener en cuenta las consecuencias económicas y sociales que quepa prever, así como las dificultades que pueda entrañar su aplicación. Además, se aplicarán los requisitos de optimización.

² El nivel de referencia para las viviendas se aplica también a otros edificios con altos factores de ocupación por el público.

3. CONTROL DE LA EXPOSICIÓN DEBIDA AL RADÓN EN LOS ESPACIOS INTERIORES

CONSIDERACIONES GENERALES

3.1. Tres isótopos radiactivos del radón están presentes en la naturaleza en cantidades importantes: el ^{222}Rn , el ^{220}Rn y el ^{219}Rn . El radón 222 tiene un período de semidesintegración de 3,82 días y se produce en la cadena de decaimiento radiactivo natural que parte del ^{238}U . El radón 220, con un período de semidesintegración de 55,6 segundos, se genera en la cadena de decaimiento radiactivo natural del ^{232}Th . El radón 219 tiene un período de semidesintegración de 3,96 segundos y se engendra en la cadena de decaimiento radiactivo natural del ^{235}U . Debido al breve período de semidesintegración de este último isótopo y a las concentraciones por lo general bajas de ^{235}U en los suelos, la dosis por exposición al ^{219}Rn es insignificante y no suscita preocupación desde el punto de vista radiológico.

3.2. Los radionucleidos que generan ^{222}Rn y ^{220}Rn pueden estar presentes en el medio ambiente ya sea en forma natural o como resultado de prácticas del pasado, o por una combinación de ambos factores. En lo que respecta a la protección que se debe ofrecer, no se hace ninguna distinción entre estas diferentes causas de exposición. Sin embargo, cuando haya que adoptar medidas para reducir la exposición, deberán examinarse diferentes enfoques, según la vía de exposición de que se trate.

EXPOSICIÓN DEBIDA AL ^{222}Rn

Origen y concentraciones del ^{222}Rn en espacios interiores

3.3. El radón 222 puede ser la fuente más importante de exposición a la radiación en espacios interiores, porque su período de semidesintegración es suficientemente largo como para que se acumule en esos espacios y porque el ^{238}U puede estar presente en el suelo en concentraciones relativamente altas. El suelo emite constantemente radón 222 como resultado del decaimiento radiactivo del ^{226}Ra . Cuando es emitido al aire libre, el ^{222}Rn se diluye rápidamente hasta alcanzar concentraciones inocuas. La concentración típica del ^{222}Rn en el exterior es de 10 Bq/m^3 [16], aunque se han notificado concentraciones medias a largo plazo que van de 1 Bq/m^3 a más de 100 Bq/m^3 [17].

3.4. En la gran mayoría de los casos, el origen principal del ^{222}Rn en los espacios interiores es el suelo sobre el que se ha construido. Los materiales de construcción también pueden producir ^{222}Rn , pero por lo general son una fuente mucho menos importante que el suelo. En algunos casos, el ^{222}Rn entra en los espacios interiores con el suministro de agua y se libera cuando esta se consume³.

3.5. En la mayoría de las construcciones, la presión del aire a nivel del suelo es ligeramente inferior a la del exterior, porque el aire del interior suele estar más caliente. Esto genera una succión del aire del suelo hacia el interior de la construcción, y junto con ese aire entra el ^{222}Rn . Las principales rutas de acceso son los huecos entre los pisos y las paredes, las grietas en los pisos y los espacios vacíos alrededor de las cañerías y los cables (véase la figura 1). Hay variaciones estacionales en los niveles de ^{222}Rn en los espacios interiores, que se corresponden con las variaciones de la temperatura media en el exterior (es decir, los niveles de ^{222}Rn del invierno son en general más altos que los del verano).

3.6. La distribución de las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores de las viviendas es muy amplia y suele abarcar varios órdenes de magnitud. Con frecuencia, dentro de un Estado o de una región de un Estado la distribución de las concentraciones de ^{222}Rn resulta ser lognormal, o muy próxima a la lognormal. En algunos casos, las viviendas pueden tener concentraciones de ^{222}Rn tan altas, que las dosis de radiación recibidas por las personas que residen en ellas exceden con mucho de los límites de dosis anuales fijados para la exposición ocupacional.

3.7. La media aritmética mundial ponderada según la población de la concentración de ^{222}Rn de todos los orígenes en las viviendas se estima en 39 Bq/m^3 [16].

3.8. La emanación de ^{222}Rn procedente del radio presente en los materiales de construcción también contribuye a la concentración de ^{222}Rn en los espacios interiores. En general, la contribución relativa de los materiales de construcción es más importante cuando la concentración total de ^{222}Rn en los espacios interiores es baja. El radón 222 emitido por los materiales de construcción rara vez es el factor predominante cuando las concentraciones de este radionucleido en los espacios interiores son altas.

³ En la sección 9 de las actuales Guías para la calidad del agua potable, de la OMS [10], se exponen los criterios para el control de la exposición debida al radón presente en el agua potable.

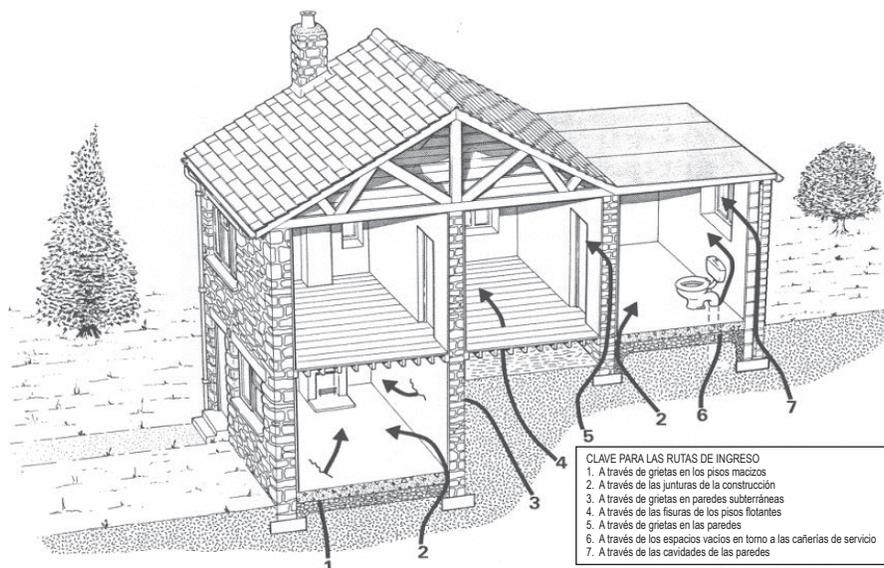


Fig. 1. Rutas de acceso del radón (imagen cortesía de Building Research Establishment (BRE), Reino Unido; reproducida con su autorización).

3.9. Los cálculos para una casa modelo de mampostería indican que, por término medio, la emanación de ^{222}Rn de los materiales de construcción aporta alrededor de 10 Bq/m^3 a la concentración de ^{222}Rn en los espacios interiores [17]. Esto representa aproximadamente el 25 % de la concentración media mundial de ^{222}Rn en los espacios interiores. En la Unión Europea se estima que la contribución típica de los materiales de construcción a las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores se sitúa entre 10 Bq/m^3 y 20 Bq/m^3 [18], lo que corresponde a una dosis efectiva individual anual de entre $0,3 \text{ mSv}$ y $0,6 \text{ mSv}$. En los Estados Unidos de América, la contribución de los materiales de construcción a las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores se estima en el rango de 4 Bq/m^3 a 7 Bq/m^3 [19].

3.10. En algunos casos excepcionales, la aportación del ^{222}Rn emitido por los materiales de construcción a la concentración de ^{222}Rn en los espacios interiores puede llegar a 1000 Bq/m^3 o más [18]. En tales casos, es muy probable que la tasa de dosis efectiva correspondiente causada por la radiación gamma en los espacios interiores supere el valor máximo del nivel de referencia para los materiales de construcción, de alrededor de 1 mSv/a , especificado en el párrafo 5.22 de la referencia [2]. Este aspecto se examina con más detalle en el párrafo 3.55 y en

la sección 4. El radón ^{222}Rn que emana de los materiales de construcción también puede controlarse.

3.11. Las aguas superficiales suelen contener ^{222}Rn en concentraciones muy bajas. Pueden encontrarse concentraciones elevadas de ^{222}Rn en el agua procedente de reservas subterráneas o de suministros privados. El ^{222}Rn aportado por el agua potable a la concentración total de ^{222}Rn en los espacios interiores no es constante, ya que solo hay emanación cuando sale agua de los grifos o las duchas. Por esta razón, el ^{222}Rn emitido por el agua rara vez es la causa principal de las concentraciones altas de ^{222}Rn en los espacios interiores, aunque pueden registrarse concentraciones elevadas por breves períodos de tiempo. La ingesta de agua que contenga ^{222}Rn es otra posible vía de exposición. En las Guías para la calidad del agua potable, de la OMS [10], figura información sobre cómo reducir las concentraciones altas de ^{222}Rn en el suministro de agua potable.

3.12. El UNSCEAR [3] ha comunicado que la inhalación del ^{222}Rn emitido por el agua potable aporta, por término medio, el 90 % de la dosis estimada debida al ^{222}Rn presente en el agua potable. Además, la dosis efectiva media derivada de la inhalación del ^{222}Rn que el agua potable emite al aire de los espacios interiores es de aproximadamente 0,025 mSv/a, frente a una dosis efectiva total media por inhalación de 1,1 mSv/a debida al ^{222}Rn de todos los orígenes y a los productos de su desintegración [3, 17]⁴. Por consiguiente, aunque la inhalación es la principal vía por la que puede producirse exposición debida al ^{222}Rn del agua potable, las dosis promedio recibidas representan, por lo general, solo una pequeña fracción de las dosis que aporta el ^{222}Rn de otros orígenes en los espacios interiores. Sin embargo, en los hogares con un abastecimiento de agua procedente de pozos profundos perforados en un lecho rocoso rico en uranio, el suministro de agua de la vivienda puede ser el contribuyente más importante a las concentraciones elevadas de radón en el aire de los espacios interiores, dando lugar a dosis individuales de varios milisieverts [20, 21].

⁴ En la referencia [17] se describe el cálculo de la dosis de inhalación total causada por el ^{222}Rn . El cálculo presupone un factor de equilibrio del ^{222}Rn de 0,4 en espacios interiores y de 0,6 al aire libre, una concentración media de la actividad del ^{222}Rn de 40 Bq/m³ en espacios interiores y de 10 Bq/m³ al aire libre, un factor de ocupación anual de 7000 horas en espacios interiores y de 1760 horas al aire libre, y un factor de conversión de dosis de 9 nSv/(Bq·h·m⁻³) para la concentración equivalente de equilibrio.

Suministro de información sobre el radón

3.13. En virtud del requisito 50 de la referencia [2], “[e]l gobierno suministrará información sobre los niveles del radón en el interior de edificios y los riesgos conexos para la salud y, si procede, establecerá y aplicará un plan de acción para controlar la exposición del público debida al radón en el interior de edificios”.

3.14. El requisito de informar a la población se aplica independientemente de que se estén o no realizando mediciones del radón, o de que esté o no previsto hacerlas. El tipo de material que se debe suministrar puede comprender, por ejemplo, información genérica sobre la distribución del radón en el mundo y su variabilidad; las pruebas científicas sobre los riesgos para la salud dimanantes de la exposición a largo plazo debida al radón en espacios interiores, incluida la relación sinérgica entre la exposición causada por el radón y la inhalación de humo de tabaco; los fundamentos de la prevención de la acumulación de radón en los edificios nuevos y de la aplicación de medidas correctivas para reducir las concentraciones altas de este elemento en los edificios ya existentes; la relación entre la política relativa al radón y la política sobre la calidad del aire en espacios interiores; y el posible conflicto entre las disposiciones para el ahorro de energía y las medidas de protección contra el radón. Los Estados que dispongan de datos fidedignos sobre las concentraciones de radón en los espacios interiores deberían poner esa información a disposición del público. Lo ideal es que la información se facilite en línea, para que las partes interesadas puedan acceder a ella y descargarla.

3.15. Existe una sinergia demostrada entre el cáncer de pulmón debido al tabaquismo y la exposición al radón. Los fumadores y quienes han dejado de fumar hace menos tiempo tienen un riesgo de base mucho mayor de contraer un cáncer de pulmón que quienes nunca fumaron. La exposición al radón aumenta aún más ese riesgo. Por lo tanto, conviene que la autoridad nacional tenga en cuenta estos riesgos combinados cuando suministre información y asesoramiento sobre el radón, y que se coordine con los programas nacionales de lucha contra el tabaco [7].

3.16. Antes de realizar estudios de medición del radón, la autoridad nacional debería preparar y distribuir información de interés para los ocupantes de las viviendas, especialmente para aquellos que puedan ser invitados a participar en los estudios. Ello debería incluir información general sobre los riesgos derivados del radón, junto con información sobre cómo se efectuarán las mediciones del radón y cómo se comunicarán los resultados a los interesados. También debería informarse sobre la confidencialidad de las mediciones del radón en cada hogar.

Si ya se ha establecido un nivel de referencia, debería explicarse esta situación. En particular, debería explicarse cómo reducir las concentraciones de radón que superen el nivel de referencia.

3.17. Cuando sea necesario elaborar una política nacional para controlar la exposición del público debida al radón, la autoridad nacional debería preparar información y ponerla a disposición de todas las partes interesadas. Estas comprenden a los responsables de la adopción de decisiones, los profesionales médicos, los profesionales de la construcción (como los arquitectos, los ingenieros, los aparejadores y los constructores) y la población. Puesto que la autoridad nacional puede consistir en varios organismos y departamentos gubernamentales distintos, cada uno de ellos a cargo de aspectos diferentes de la política nacional, debería establecerse una estrecha coordinación para velar por que toda la información que se proporcione sea clara y coherente. Los responsables de la adopción de decisiones a nivel nacional y local deberían estar plenamente informados en todo momento.

Estudios del radón en espacios interiores

3.18. El gobierno debe velar por que “se recopile información sobre las concentraciones de la actividad del radón en viviendas y en otros edificios para miembros del público con elevados factores de ocupación, utilizando medios apropiados como los estudios representativos del radón” (ref. [2], párr. 5.19 a)). Como primer paso para evaluar el alcance de las medidas que pueden ser necesarias para controlar la exposición del público causada por el radón en los espacios interiores, la autoridad nacional debería examinar todos los datos existentes sobre las concentraciones de radón en esos espacios, en particular las mediciones efectuadas en aquellas zonas del Estado en que quepa prever altas concentraciones de radón en los espacios interiores. Esto incluirá las regiones en que la geología local indique que pueda haber concentraciones elevadas de uranio en el suelo, así como las regiones de roca caliza kárstica en que las aguas subterráneas puedan contener concentraciones elevadas de radón derivado de depósitos minerales. Además, cabrá esperar altas concentraciones de radón en los espacios interiores en las zonas en que la permeabilidad del suelo sea excepcionalmente alta (como los eskers o crestas compuestos por grava permeable), aun cuando la concentración de uranio del suelo no sea elevada.

3.19. Si no se dispone de tales datos, la autoridad nacional debería estudiar la posibilidad de organizar estudios localizados. Al decidir en cuáles zonas iniciar esos estudios, la autoridad nacional debería evaluar no solo los criterios geológicos indicados en el párrafo 3.18, sino también la información disponible

sobre las concentraciones de radón en espacios interiores en los Estados vecinos. La realización de estos estudios localizados puede ayudar a adoptar decisiones sobre la densidad de muestreo necesaria para un estudio nacional. Por ejemplo, si se han detectado altas concentraciones de radón en los espacios interiores y se sabe que hay muchas otras zonas con características geológicas similares en el Estado, se justificará una alta densidad de mediciones en el estudio nacional. Por otra parte, si solo se han medido concentraciones bajas de radón en los espacios interiores en zonas en que habría cabido esperar concentraciones elevadas, podrá bastar una menor densidad de mediciones en el estudio nacional.

3.20. Incluso si el examen de los datos existentes y los resultados de los estudios localizados iniciados por la autoridad nacional no revelan concentraciones elevadas de radón en los espacios interiores, la autoridad nacional debería evaluar cuál es el grado de exposición de la población. Esas evaluaciones se denominan estudios nacionales del radón y tienen dos aspectos principales:

- a) La determinación de las zonas en que quepa esperar una proporción más alta de hogares con concentraciones elevadas de radón en los espacios interiores, lo que puede lograrse realizando un estudio basado en la geografía. Los resultados pueden utilizarse para elaborar mapas de los riesgos debidos al radón y detectar las zonas propensas al radón (véase el anexo II).
- b) La estimación de la exposición media de la población debida al radón, y del rango de valores de exposición que se registran, para poder compararlos con las exposiciones debidas a otras fuentes de radiación. La base más adecuada para ello es un estudio nacional de las concentraciones de radón en los espacios interiores de viviendas seleccionadas aleatoriamente, teniendo en cuenta la densidad de población [5].

3.21. Con un examen cuidadoso puede diseñarse un único estudio que abarque simultáneamente los dos aspectos descritos en el párrafo 3.20 a) y b). Las mediciones de esos estudios deberían repetirse durante un período de varios meses, y en lo posible a lo largo de todo un año, en cada vivienda estudiada, para reducir al mínimo las incertidumbres [22]. Los resultados indicarán los niveles de exposición al radón y servirán de base para las decisiones futuras sobre la elaboración y aplicación de una política nacional para controlar la exposición del público debida al radón. Colectivamente, los diversos componentes de una política de ese tipo constituyen un plan de acción (véanse los párrs. 3.23 a 3.59).

3.22. Los estudios arriba descritos mostrarán la variación de las concentraciones de radón en las viviendas, independientemente del origen del radón. En la

gran mayoría de los casos, el radón tendrá su origen en el terreno en que estén construidas las viviendas, pero a veces puede proceder de los materiales de construcción o el suministro de agua. La autoridad nacional debería realizar estudios separados para determinar e investigar las situaciones en que el radón de los materiales de construcción o el suministro de agua puede hacer una contribución importante a la concentración de radón en el aire de los espacios interiores.

Plan de acción sobre el radón

Consideraciones generales

3.23. “Cuando se determinen concentraciones de la actividad del radón que sean motivo de preocupación para la salud pública ..., el gobierno asegurará que se establezca un plan de acción que comprenda medidas coordinadas para reducir las concentraciones de la actividad del radón en los edificios existentes y futuros” (ref. [2], párr. 5.20). Este plan de acción debería ser ejecutado por la autoridad nacional, que con ese fin debería:

- a) Establecer un nivel de referencia apropiado para el ^{222}Rn en las viviendas y otros edificios con elevados factores de ocupación por el público (ref. [2], párr. 5.20 a)).
- b) Decidir cuáles otros tipos de edificios con altos factores de ocupación por el público, como los jardines de infancia, las escuelas y los hospitales, estarán incluidos en el ámbito del plan de acción sobre el radón.
- c) Establecer un nivel de referencia apropiado para el ^{222}Rn en lugares de trabajo como las oficinas y las fábricas.
- d) Facilitar la medición del ^{222}Rn en las viviendas y otros edificios con altos factores de ocupación por el público.
- e) Determinar las zonas propensas al ^{222}Rn .
- f) Otorgar prioridad a la reducción de las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn en las situaciones en que esa medida tenga probabilidades de ser más eficaz (véase la ref. [2], párr. 5.20 c)). Esto debería incluir medidas para reducir las concentraciones de ^{222}Rn en los suministros de agua potable y controlar el contenido de radio de los materiales de construcción, cuando proceda.
- g) Incluir en los códigos de construcción medidas preventivas y correctivas apropiadas para impedir la entrada del ^{222}Rn y facilitar la adopción de otras medidas siempre que sea necesario (véase la ref. [2], párr. 5.20 d)).

- h) Aplicar medidas para controlar y reducir la exposición debida al ^{222}Rn , y determinar en qué circunstancias esas medidas han de ser obligatorias y cuándo pueden ser voluntarias.
- i) Evaluar el éxito del plan de acción.

En el *Manual de la OMS sobre el radón en interiores* [7] figura más orientación para la preparación de un plan de acción sobre el radón. Las referencias [23 a 26] contienen ejemplos de planes de acción nacionales sobre el radón.

3.24. La autoridad nacional debería velar por que el plan de acción sobre el radón esté estrechamente coordinado con los otros programas nacionales sobre la calidad del aire en espacios interiores y la eficiencia energética. Por ejemplo, la construcción de viviendas eficientes desde el punto de vista energético puede dar lugar a un menor intercambio de aire que el que existe en las viviendas actuales. Esto podría conducir ya sea a un aumento o a una disminución del flujo de gas del suelo (que contiene ^{222}Rn) hacia el interior del edificio, según cuáles sean los requisitos de los códigos de construcción nacionales. Con la mejora de la eficiencia térmica de un edificio, la mayor temperatura del aire en los espacios interiores puede dar lugar a una disminución de la presión dentro del edificio y, de ese modo, a un aumento del flujo de ^{222}Rn desde el suelo hacia el interior de la construcción. Los cambios en las prácticas de construcción, como los relacionados con la calidad del aire en los espacios interiores o con la eficiencia energética, deberían ser objeto de una investigación para determinar cómo repercutirán en las concentraciones de radón en los espacios interiores y cómo afectarán a los resultados de las medidas correctivas y preventivas referentes al radón. Cuando esos cambios en las prácticas de construcción puedan dar lugar a un aumento de las concentraciones de radón en los espacios interiores, debería considerarse la posibilidad de modificar nuevamente las prácticas en los códigos de construcción nacionales.

Justificación y optimización de las estrategias para establecer medidas de protección radiológica

3.25. El gobierno y el órgano regulador u otra autoridad competente garantizarán que las medidas correctivas y protectoras estén justificadas y que la protección y la seguridad estén optimizadas (ref. [2], requisito 48).

3.26. La estrategia de protección del programa para reducir las concentraciones de radón en los espacios interiores debería reportar suficientes beneficios a las personas o a la sociedad como para compensar el detrimento que cause. La

responsabilidad de decidir si se justifica la aplicación de medidas de protección radiológica compete a los gobiernos o a las autoridades nacionales.

3.27. Los argumentos que justifican las medidas de protección radiológica son, entre otros, que el radón es una fuente significativa de exposición a la radiación y la segunda causa más importante de cáncer de pulmón en la población general, después del tabaquismo; que existen técnicas viables para reducir las altas concentraciones de radón en los espacios interiores; y que la política sobre el radón respalda otras políticas de salud pública, como las relativas a la calidad del aire en los espacios interiores, cuando están presentes también otros contaminantes, o al tabaquismo [7, 27].

3.28. La optimización de la protección hasta lograr valores inferiores al nivel de referencia debería realizarse mediante un proceso cíclico continuo que comprenda lo siguiente: una evaluación de la situación para determinar si es necesario adoptar medidas (la estructuración del proceso); la determinación de las posibles medidas protectoras sobre la base de los conocimientos técnicos más recientes para mantener la exposición en el nivel más bajo que se pueda razonablemente alcanzar; la selección de la mejor opción en las circunstancias existentes; la aplicación de la opción seleccionada; y un examen periódico para evaluar si las circunstancias reinantes exigen alguna medida correctiva [28].

3.29. El proceso de optimización se ejecuta mediante el plan de acción nacional sobre el radón. El proceso debería aplicarse con vistas a lograr las concentraciones de radón más bajas que sea razonablemente posible alcanzar por debajo del nivel de referencia.

3.30. La optimización de la protección contra la exposición debida al radón en espacios interiores puede efectuarse utilizando las técnicas estándar de análisis costo-beneficio. Pueden hacerse comparaciones entre los costos financieros que entrañará el número estimado de casos de cáncer de pulmón que es probable que cause el radón a diferentes niveles de exposición, la selección de medidas protectoras, y los costos de las medidas preventivas y correctivas para reducir la exposición debida al radón en los espacios interiores. Estos análisis pueden ayudar a adoptar decisiones fundamentadas sobre la relación costo-eficacia de las medidas destinadas a reducir las concentraciones de radón en los edificios ya existentes y en los nuevos [7].

Medición de las concentraciones de ^{222}Rn

3.31. Las mediciones del radón en las viviendas son necesarias para los estudios nacionales y regionales y para determinar si una vivienda en particular tiene niveles inaceptablemente altos de este elemento [15]. Las concentraciones de radón pueden variar enormemente de una vivienda a otra, por lo que una concentración alta o baja de radón en una construcción no permite deducir las concentraciones en las viviendas cercanas. Las mediciones de las concentraciones de radón pueden tener también por objeto confirmar que las medidas adoptadas para reducir los niveles altos de radón han sido eficaces [15]. Estas mediciones pueden ser realizadas por la autoridad nacional o por otras organizaciones, como organismos de apoyo técnico, instituciones académicas o empresas privadas, o por varias de estas entidades juntas.

3.32. Cuando se realicen mediciones del radón en viviendas o en otros edificios con altos factores de ocupación por el público, la autoridad nacional debería especificar:

- a) el período de medición mínimo;
- b) las normas de calidad para los detectores de radón;
- c) los protocolos de medición que se aplicarán;
- d) si las mediciones se limitarán a determinadas estaciones del año;
- e) si se aplicarán factores de corrección estacionales a los resultados;
- f) las normas de calidad para comunicar los resultados a los propietarios de las viviendas y de otros edificios con altos factores de ocupación por el público;
- g) el asesoramiento que debería ofrecerse a los propietarios de viviendas y de otros edificios con altos factores de ocupación por el público que tengan concentraciones de radón superiores al nivel de referencia.

Estos criterios podrán variar en función del propósito para el que se hagan las mediciones del radón. Las técnicas de medición del radón se examinan en el anexo II.

3.33. La autoridad nacional debería velar por que exista un sistema de gestión de la calidad que ofrezca un alto grado de confianza en los resultados de las mediciones del radón. Todas las organizaciones que hagan estas mediciones deberían tener que demostrar su competencia en la medición exacta de los niveles de radón, y participar regularmente en ejercicios de intercomparación [29].

3.34. Si una empresa privada hace mediciones del radón, debería disponerse, cuando sea posible, que los resultados se pongan a disposición de la autoridad nacional. Esta tiene la responsabilidad general de formular la política sobre el radón, y podría utilizar los datos de esas mediciones para determinar las zonas propensas al radón. Deberían estudiarse asimismo los aspectos relativos a la confidencialidad de las mediciones del radón en los hogares.

Establecimiento de un nivel de referencia para el ^{222}Rn

3.35. Una vez evaluada la exposición del público debida al ^{222}Rn mediante los estudios apropiados, debería determinarse si las concentraciones de la actividad del radón plantean un problema de salud pública. Si es así, la autoridad nacional deberá seleccionar y adoptar oficialmente un nivel de referencia para el ^{222}Rn en las viviendas y otros edificios con altos factores de ocupación por el público. Con arreglo a lo dispuesto en la publicación GSR Part 3 [2] (párr. 5.20 a)), debe establecerse un nivel de referencia apropiado, teniendo en cuenta las circunstancias sociales y económicas imperantes, que en general no exceda de un promedio anual de concentración de la actividad debida al ^{222}Rn de 300 Bq/m^3 .⁵ El nivel de referencia debería aplicarse a las viviendas y a los otros edificios que tengan altos factores de ocupación por el público.

3.36. En su *Manual sobre el radón en interiores* [7], la OMS propone un nivel de referencia de 100 Bq/m^3 a fin de reducir al mínimo los peligros para la salud derivados de la exposición al ^{222}Rn en interiores, y señala que “[s]i dicho nivel no pudiera alcanzarse en las actuales circunstancias concretas del país, el nivel de referencia elegido no deberá superar en ningún caso los 300 Bq/m^3 ”.

3.37. Al establecer un nivel de referencia, la autoridad nacional debería consultar con las partes interesadas. Los niveles de referencia deberían seleccionarse de modo tal que las actividades resultantes sean viables y manejables. Por ejemplo, sería poco práctico fijar un nivel de referencia tal que exigiera la adopción de medidas correctivas en la mayoría de las viviendas existentes. Al escoger un nivel de referencia apropiado, deberían tomarse en consideración los porcentajes de las viviendas que requerirán medidas correctivas a los diferentes niveles.

3.38. Los niveles de referencia no deberían considerarse una línea divisoria entre la seguridad y el daño. Más bien, deberían ser valores orientativos que, cuando

⁵ Suponiendo un factor de equilibrio para el ^{222}Rn de 0,4 y una tasa de ocupación anual de 7000 horas, el valor de la concentración de la actividad de 300 Bq/m^3 corresponde a una dosis efectiva anual del orden de 10 mSv.

se superen, induzcan a examinar la posibilidad de adoptar medidas para reducir la exposición debida al ^{222}Rn . La autoridad nacional podría decidir comparar los riesgos relacionados con el ^{222}Rn con otros riesgos de la vida diaria.

3.39. Por motivos de simplicidad y coherencia, la mayoría de las autoridades nacionales establecen un único nivel de referencia aplicable tanto a las viviendas y los otros edificios con altos factores de ocupación por el público que ya existen como a los nuevos. En algunos casos, las autoridades nacionales han establecido un nivel de referencia más bajo para las nuevas construcciones de viviendas y otros edificios con altos factores de ocupación por el público que el que rige para las construcciones ya existentes. En general, es más económico reducir las concentraciones de ^{222}Rn a niveles bajos, y más fácil adoptar las medidas necesarias, en las viviendas nuevas que en las ya existentes.

3.40. En la publicación GSR Part 3 [2] se exige que el nivel de referencia para las viviendas y otros edificios con altos factores de ocupación por el público no exceda en general de una concentración anual media de la actividad debida al ^{222}Rn de 300 Bq/m^3 . Si los datos nacionales indican que en un determinado Estado el factor de equilibrio o el factor de ocupación son considerablemente diferentes de los valores supuestos, podría ser apropiado adoptar un nivel de referencia mayor que 300 Bq/m^3 , siempre que no se supere una dosis efectiva anual del orden de 10 mSv . Sin embargo, esta decisión debería basarse en la situación del Estado en su conjunto, y solo debería adoptarse en circunstancias excepcionales. No conviene establecer niveles de referencia diferentes para las distintas regiones de un mismo Estado, porque ello puede generar dificultades prácticas.

3.41. En los edificios con bajos factores de ocupación por el público, como las oficinas, las tiendas y las bibliotecas públicas, la exposición de los trabajadores y del público se gestiona controlando la exposición ocupacional. En el recuadro de la página 24 se proporciona información sobre la gestión de la exposición al radón en esos lugares de trabajos.

Zonas propensas al radón

3.42. En los casos en que se han elaborado mapas del radón (véase el anexo I), es posible determinar las zonas en que es probable que las concentraciones de ^{222}Rn sean superiores a la media. Estos lugares se denominan comúnmente 'zonas

propensas al radón'⁶. Los valores más altos de ²²²Rn se encontrarán normalmente en las zonas con las concentraciones medias máximas de ²²²Rn. También habrá viviendas con concentraciones de ²²²Rn superiores al nivel de referencia fuera de las zonas calificadas como 'propensas al radón'.

3.43. La autoridad nacional debería definir las zonas propensas al radón dentro de su territorio y estudiar la posibilidad de aplicar medidas específicas en esas zonas. Se han propuesto diversas definiciones de las zonas propensas al radón. En la referencia ICRP [5] se sugiere que las zonas propensas al radón se definan como aquellas en que más de un determinado porcentaje de viviendas tiene una concentración de ²²²Rn que excede en 10 veces el valor medio nacional. Algunos Estados definen las zonas propensas al radón como aquellas en que se estima que más de un determinado porcentaje de viviendas tienen concentraciones de ²²²Rn superiores al nivel de referencia. Una vez acordada, la definición de una zona propensa al radón no debería modificarse sin una atenta consideración; sin embargo, las zonas así designadas deberían irse ajustando a medida que se disponga de más información.

3.44. Otro enfoque de la protección contra la exposición al radón en los espacios interiores de edificios nuevos consiste en hacer mediciones directas *in situ* del ²²²Rn presente en el gas del suelo y de la permeabilidad del suelo en cada lugar en que se va a construir, y en elaborar luego medidas preventivas en función de las propiedades medidas y del diseño del edificio. Para este fin se dispone de métodos de muestreo y medición sencillos y de bajo costo. Este enfoque se utiliza en la República Checa desde 1991 [30, 31].

3.45. El concepto de las zonas propensas al radón es una herramienta para la autoridad nacional, que puede utilizarla de diferentes maneras. Por ejemplo, la autoridad nacional debería estudiar cómo utilizar la determinación de las zonas propensas al radón para dar a conocer los riesgos derivados de la exposición debida al ²²²Rn y alentar a los ocupantes de las viviendas a que pidan la realización de mediciones. Además, en las zonas propensas al radón la autoridad nacional debería exigir el uso de técnicas de construcción que reduzcan al mínimo la entrada de ²²²Rn y faciliten su eliminación después de la construcción, si fuera necesario. En algunas circunstancias, puede salir a cuenta introducir técnicas de construcción que reduzcan al mínimo la entrada de ²²²Rn en todas las

⁶ En algunos Estados, estos lugares se denominan 'zonas de riesgo alto de radón' o 'zonas afectadas por el radón'.

zonas, especialmente si se consideran también otros aspectos de la calidad del aire. En los anexos III y IV se proporciona información detallada a este respecto.

Control y reducción de la exposición debida al ^{222}Rn

3.46. La autoridad nacional debe velar por que se elabore una estrategia de protección que defina los objetivos que se pretende alcanzar (ref. [2], párr. 5.4 a)). Uno de esos objetivos debería ser identificar las viviendas que tengan concentraciones de ^{222}Rn superiores al nivel de referencia y reducir esas concentraciones. El segundo objetivo debería ser reducir las concentraciones medias de ^{222}Rn en las viviendas. Las concentraciones medias de ^{222}Rn solo pueden reducirse considerablemente si se establecen códigos de construcción y, al edificar nuevas viviendas, se adoptan prácticas que limiten la entrada en ellas del ^{222}Rn . Estos cambios conducirán, con el tiempo, a una disminución de las concentraciones medias de ^{222}Rn y de la consiguiente exposición, aminorando así los efectos del radón en la salud pública.

3.47. La autoridad nacional debe adoptar disposiciones para la “evaluación de las medidas reparadoras y protectoras disponibles para lograr los objetivos” (ref. [2], párr. 5.5 a)). La disponibilidad de medidas de control efectivas, fiables, eficaces en relación con el costo y relativamente fáciles de aplicar es un componente esencial de todo plan de acción sobre el radón. La autoridad nacional debería establecer requisitos que garanticen que las empresas que presten servicios de reducción de las concentraciones de la actividad del radón en espacios interiores sean expertas en su campo y realicen un trabajo que satisfaga las necesidades de sus clientes. La eficacia de todas las técnicas debería ponerse a prueba y demostrarse en condiciones de trabajo realistas, evaluando también la eficacia a largo plazo. La autoridad nacional debería estudiar la posibilidad de establecer un proceso de autorización o certificación de las empresas que ofrezcan servicios de reducción de la exposición debida al radón. Las medidas correctivas para reducir las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn en las viviendas ya existentes se examinan en el anexo IV.

3.48. El gobierno debe determinar “las circunstancias en las que las medidas deben ser obligatorias o voluntarias, teniendo en cuenta los requisitos legales y las circunstancias sociales y económicas existentes” (ref. [2], párr. 5.21 b)).

3.49. En consonancia con la aplicación de un enfoque graduado, el plan de acción sobre el radón debería incluir disposiciones que den prioridad a la adopción de medidas correctivas en las viviendas con concentraciones de la actividad del ^{222}Rn considerablemente superiores al nivel de referencia, frente a aquellas en que

GESTIÓN DEL RADÓN EN LOS LUGARES DE TRABAJO CON BAJOS FACTORES DE OCUPACIÓN POR EL PÚBLICO

En los lugares de trabajo como las oficinas y las fábricas, en que la exposición al radón no se gestiona como una situación de exposición planificada, la autoridad nacional debe establecer un nivel de referencia para el ^{222}Rn que no supere un promedio anual de concentración de su actividad de 1000 Bq/m^3 (ref. [2], párr. 5.27). Los criterios para elegir el valor del nivel de referencia son los mismos que se aplican a las viviendas, y el valor escogido debería basarse en una evaluación de la distribución de las concentraciones de ^{222}Rn en esos lugares de trabajo. La autoridad nacional debería también definir los criterios de medición para los lugares de trabajo, del mismo modo que para las viviendas (véase el párrafo 3.32).

Otro enfoque del control de la exposición al ^{222}Rn en los lugares de trabajo consiste en establecer el mismo nivel de referencia para todos los entornos interiores, lo que significa que el mismo nivel de referencia se aplicará a todas las viviendas y todos los otros edificios con altos factores de ocupación por el público y los lugares de trabajo [27]. Este enfoque solo es adecuado si la distribución del ^{222}Rn en los espacios interiores de los lugares de trabajo es parecida a la de las viviendas, lo que puede o no ser el caso. La autoridad nacional podría examinar si este enfoque es apropiado y si se puede aplicar.

En las situaciones en que se supere el nivel de referencia para los lugares del trabajo, el empleador deberá adoptar todas las medidas razonables para reducir la concentración de ^{222}Rn a valores inferiores al nivel de referencia (ref. [2], párr. 5.28). Un modo de hacerlo es limitando el número de horas que los trabajadores permanecen en determinadas áreas, pero esto puede ser difícil de lograr y de vigilar. En algunos lugares de trabajo específicos, como las cuevas subterráneas, los cambios en la tasa de ventilación pueden reducir la concentración de ^{222}Rn , pero también pueden tener consecuencias inaceptables (por ejemplo, el deterioro de los murales antiguos dibujados en las cuevas o la destrucción de sitios de interés turístico, como las grutas abiertas al público). Si, por el motivo que sea, no es posible reducir las concentraciones de ^{222}Rn por debajo del nivel de referencia, la autoridad nacional deberá velar por que los trabajadores estén protegidos aplicando los requisitos establecidos para la exposición ocupacional (ref. [2], párr. 5.27) en las situaciones de exposición planificada de forma graduada.

En la referencia [11] se ofrece orientación sobre la protección de los trabajadores.

esas concentraciones sean solo ligeramente más altas que dicho nivel, y debería establecer un calendario para ese trabajo. En la referencia ICRP [8] se indica que una dosis anual en aumento que se aproxime a los 100 mSv justificará casi siempre una intervención. La autoridad nacional debería estudiar la posibilidad de exigir que las medidas correctivas relacionadas con el ^{222}Rn sean obligatorias

en las viviendas y los otros edificios con altos factores de ocupación en que sea probable que las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn generen una dosis anual superior a 100 mSv.

3.50. La decisión de reducir o no las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn que superen el nivel de referencia se dejan por lo general en manos de los propietarios de las viviendas, que, en la mayoría de los Estados, tendrán también que correr con los costos de las medidas correctivas. Esos costos podrían disuadir a los propietarios de las viviendas de tomar medidas correctivas para reducir la exposición debida al ^{222}Rn . El gobierno podría considerar la posibilidad de reembolsar a los propietarios de las viviendas una parte o la totalidad de los costos de las medidas correctivas, en particular cuando se trate de viviendas con niveles muy altos de concentración de la actividad del ^{222}Rn . Si se presta ese apoyo financiero, los acuerdos correspondientes deberían incluir medidas de seguimiento para evaluar la eficacia de las medidas correctivas.

3.51. En el caso de los alojamientos de alquiler, la autoridad nacional debería estudiar la posibilidad de establecer el requisito obligatorio de que los propietarios de las viviendas se aseguren de que las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn sean inferiores al nivel de referencia. Deberá velarse por que todo requisito a este respecto esté en conformidad con la legislación vigente sobre los alojamientos de alquiler. Además, la autoridad nacional debería cerciorarse de que la legislación relativa al ^{222}Rn pueda aplicarse en la práctica.

3.52. La autoridad nacional debería examinar la posibilidad de exigir que en el momento de la venta de una vivienda se midan las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn y, si es necesario, se adopten medidas correctivas. El requisito de medir las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn en el momento de la venta de una vivienda ya construida podría ser beneficioso, no solo porque aumentaría el número de viviendas en que se hubiera medido el ^{222}Rn , sino también porque garantizaría la aplicación de medidas correctivas en los casos en que las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn superaran el nivel de referencia. Deberían elaborarse protocolos y procedimientos apropiados, de conformidad con el marco jurídico nacional. Se han publicado orientaciones para establecer esos protocolos y procedimientos con respecto a los métodos de ensayo [22] y a los métodos de investigación en los edificios [15]. Además, cuando la legislación y las condiciones sociales reinantes lo permitan, la autoridad nacional debería velar por que los sectores de la banca y los seguros participen plenamente en el proceso.

3.53. La autoridad nacional debería adoptar disposiciones para introducir códigos y prácticas de construcción que impidan la acumulación de ^{222}Rn en las viviendas nuevas. Tales códigos deberían incluir el requisito de medir el ^{222}Rn en las viviendas nuevas dentro de los primeros 6 a 12 meses contados a partir del inicio de la ocupación. El cumplimiento de estos códigos debería ser obligatorio. Al decidir si esos códigos de construcción se aplicarán en todas las zonas o solo en aquellas designadas como zonas propensas al radón, la autoridad nacional debería tomar en consideración la relación costo-eficacia de las medidas preventivas para reducir el ^{222}Rn en las viviendas nuevas, en comparación con otras medidas de salud pública. Los métodos utilizados para prevenir la acumulación de ^{222}Rn en las viviendas nuevas se examinan en el anexo III.

3.54. Al incorporar medidas preventivas para reducir el ^{222}Rn en los códigos de construcción nacionales, la autoridad nacional debería cooperar con las autoridades encargadas de regular la planificación y construcción de edificios. Esto incluirá a las autoridades responsables de otros aspectos de la calidad del aire en los espacios interiores y de la eficiencia energética. La inspección del sitio es una parte importante de la reglamentación de la construcción. Esta reglamentación debería comprender la formación de los inspectores de obras y los profesionales del sector de la construcción, y la comunicación con ellos.

3.55. Los materiales de construcción que con mayor frecuencia han resultado ser fuentes importantes de emanación de ^{222}Rn son los hormigones de lutita aluminosa, las tobas volcánicas, los granitos y el fosfoyeso. Aunque es posible medir la emanación de ^{222}Rn a partir de muestras de materiales de construcción, no siempre es sencillo relacionar los resultados de esas mediciones con las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn en los espacios interiores después de la construcción. Por consiguiente, cuando los estudios indiquen la necesidad de hacerlo, la autoridad nacional debería controlar la cantidad de ^{222}Rn emitida por los materiales de construcción imponiendo una limitación al contenido de ^{226}Ra de esos materiales⁷.

3.56. Cuando los programas de medición del radón indiquen la necesidad de reducir la concentración de la actividad del ^{222}Rn en algunos suministros de

⁷ Algunos estudios [18] han indicado que cuando las dosis debidas a la radiación gamma se limitan a niveles inferiores a 1 mSv/a, las concentraciones de la actividad del ^{226}Ra en los materiales de construcción deben limitarse, en la práctica, a niveles que difícilmente puedan causar concentraciones de la actividad del ^{222}Rn en espacios interiores que superen los 200 Bq/m³.

agua potable, ello deberá efectuarse teniendo en cuenta las recomendaciones y el enfoque formulados por la OMS [10].

Vigilancia de la eficacia del plan de acción sobre el radón

3.57. La autoridad nacional debería evaluar la eficacia de su plan de acción sobre el radón. Los programas de reducción del radón no generarán mejoras inmediatas de la salud pública en una población, ya que el principal riesgo sanitario que se evitará será el riesgo de cáncer de pulmón, que tiene un período de inducción de hasta 35 años. Incluso a largo plazo, el número de vidas salvadas no será un valor directamente observable, puesto que la reducción de los riesgos se distribuirá entre un número muy grande de personas. Por este motivo, el éxito de un programa de reducción del radón debería estimarse sobre la base de la reducción de las concentraciones de la actividad del radón en las viviendas y en otros edificios con altos factores de ocupación por el público, que puede redundar también en otros beneficios que mejoren la calidad del aire en los espacios interiores. Pueden utilizarse diversos indicadores, por ejemplo la reducción del número o el porcentaje de viviendas con concentraciones de la actividad del radón superiores al nivel de referencia o la reducción de las concentraciones medias de la actividad del radón en las viviendas.

3.58. Los números de viviendas ya existentes con concentraciones medidas o estimadas de la actividad del radón que superan el nivel de referencia no son una buena indicación del éxito de un plan de acción en lo que respecta a las vidas salvadas, ya que muchos propietarios de viviendas no siguen el consejo de reducir las concentraciones de radón. Sin embargo, esos parámetros pueden utilizarse para establecer las metas intermedias de un programa de reducción del radón. También pueden emplearse otros parámetros para fijar las metas intermedias, por ejemplo el grado de conciencia respecto del radón en la población o entre los profesionales médicos o de la construcción. El grado de conciencia puede evaluarse a partir del número de solicitudes de información o del número de solicitudes de mediciones del radón que se reciban, o mediante estudios de mercado.

3.59. La conciencia pública sobre los riesgos de la exposición debida al ^{222}Rn es baja en muchos Estados. Sin embargo, un programa de reducción del radón necesita la cooperación de la población para poder reducir las altas concentraciones de la actividad del radón en las viviendas. Como parte de un plan de acción sobre el radón, la autoridad nacional debería elaborar estrategias para informar a la población sobre los riesgos causados por el radón y sobre las medidas preventivas y correctivas. Estas estrategias deberían estar dirigidas

también a los órganos y los grupos profesionales que se ocupan de las viviendas y de la salud pública, como los constructores, los arquitectos y las autoridades gubernamentales regionales y locales, y los profesionales médicos. En el anexo V figura información detallada a este respecto.

EXPOSICIÓN DEBIDA AL ^{220}Rn

Origen y concentraciones del ^{220}Rn en espacios interiores

3.60. El radón 220 tiene un período de semidesintegración de 55,6 segundos y solo alcanza a migrar una breve distancia antes de desintegrarse. Por este motivo, las concentraciones de la actividad del ^{220}Rn en espacios interiores dependen principalmente de la emanación de ^{220}Rn de las capas superficiales de los materiales de las paredes y los pisos, y no de otras fuentes más lejanas. En particular, las paredes y los pisos de barro o tierra han resultado ser, en algunos casos, fuentes importantes de ^{220}Rn . La magnitud de las dosis consiguientes dependerá de la cantidad de ^{232}Th presente en el suelo y en los materiales de construcción, de la tasa de emanación de ^{220}Rn y del factor de ocupación del edificio.

3.61. Los datos sobre las concentraciones de la actividad del ^{220}Rn y de los productos de su desintegración en las viviendas son sumamente escasos y a menudo se basan en mediciones a corto plazo. El UNSCEAR ha estimado que una concentración típica de la actividad de los descendientes del ^{220}Rn en las viviendas de todo el mundo es de alrededor de $0,3 \text{ Bq/m}^3$ como concentración equivalente de equilibrio⁸, lo que corresponde a una dosis efectiva anual de $0,1 \text{ mSv}$ [3]. Casi la totalidad de esta dosis puede atribuirse a la emanación de ^{220}Rn de los materiales de construcción. Individualmente se han medido valores de hasta 76 Bq/m^3 para la concentración equivalente de equilibrio. Estos niveles más altos de concentración equivalente de equilibrio del ^{220}Rn en espacios interiores se relacionan, en particular, con casas de madera y de barro construidas en China y el Japón, y con el uso de materiales de construcción fabricados a partir de productos volcánicos naturales en Italia [32 a 35].

⁸ La concentración equivalente de equilibrio es la concentración de la actividad del ^{222}Rn o del ^{220}Rn en equilibrio radiactivo con su progenie de período corto que tendría la misma concentración de energía alfa potencial que la mezcla real (en desequilibrio).

Estudios del ^{220}Rn en espacios interiores

3.62. La autoridad nacional debería en primer lugar realizar estudios de las viviendas en que queda esperar concentraciones altas de la actividad del ^{220}Rn , como las que tengan paredes de barro o pisos de tierra. Al igual que en el caso del ^{222}Rn , los resultados de las mediciones de la emanación de ^{220}Rn de los materiales de construcción pueden ser difíciles de interpretar. Cuando sea necesario, será preferible controlar las concentraciones de la actividad del ^{220}Rn en el aire de los espacios interiores controlando el contenido de ^{232}Th en los materiales de construcción.

3.63. La distribución del ^{220}Rn en una habitación puede ser muy variable. Dado que el ^{220}Rn presente en el aire de los espacios interiores es producto principalmente de la emanación de los materiales de construcción, es probable que las concentraciones más altas de la actividad se encuentren cerca de las paredes que contengan esos materiales. Debido a su breve periodo de semidesintegración, la mayor parte del ^{220}Rn decae antes de poder migrar. Por lo tanto, la concentración de la actividad del ^{220}Rn disminuye fuertemente con la distancia de los materiales de construcción, y puede ser 100 veces menor a una distancia de 1 m [32].

3.64. El radón 220 puede decaer casi completamente en los espacios interiores mientras las concentraciones de la actividad de los productos de su desintegración siguen siendo importantes. Por consiguiente, las concentraciones de la actividad del gas ^{220}Rn no son una indicación fiable de las dosis emitidas por su progenie. Aunque ahora se dispone de técnicas de medición pasiva fiables para medir el gas ^{220}Rn , esas técnicas pueden no proporcionar una estimación fidedigna de las concentraciones de la actividad de su progenie ni, por lo tanto, de las dosis correspondientes⁹.

Control y reducción de la exposición debida al ^{220}Rn

3.65. En la mayoría de los Estados, las autoridades nacionales no necesitarán regular la exposición debida al ^{220}Rn . En los Estados en que se encuentren

⁹ De los productos de desintegración del ^{220}Rn , solo el ^{212}Pb y el ^{212}Bi hacen una aportación importante a la concentración de energía alfa potencial [32]. La contribución por becquerel del nucleido padre ^{220}Rn es inferior en casi tres órdenes de magnitud a la del ^{212}Pb . Puesto que la mayor parte de la concentración de energía alfa potencial procede del ^{212}Pb , la medición de la concentración de la actividad del ^{212}Pb en el aire permite, por lo general, hacer una buena estimación de la concentración de energía alfa potencial.

concentraciones altas de la actividad del ^{220}Rn en algunas viviendas, la autoridad nacional debería estudiar la posibilidad de establecer un nivel de referencia para este radionucleido. El nivel de referencia debería expresarse en términos de la concentración equivalente de equilibrio del ^{220}Rn . La orientación que se proporciona en los párrafos 3.35 a 3.40 respecto del establecimiento de un nivel de referencia para el ^{222}Rn debería seguirse también para el ^{220}Rn .

3.66. Cuando se encuentren materiales de construcción que emitan cantidades importantes de ^{220}Rn , la autoridad nacional debería considerar la posibilidad de prohibir el uso de esos materiales para la construcción de viviendas, de conformidad con los criterios establecidos en la sección 4.

3.67. Cuando se encuentran concentraciones altas de la actividad de los productos de desintegración del ^{220}Rn en las viviendas, esas concentraciones podrán reducirse sustancialmente aplicando pinturas o selladores en las superficies de las paredes o los pisos que emitan ^{220}Rn . El hecho de no ocupar las zonas de la habitación más cercanas a las paredes y de no dormir en camas a ras del suelo reduce eficazmente la inhalación de ^{220}Rn .

4. CONTROL DE LA EXPOSICIÓN DEBIDA A LA RADIACIÓN GAMMA EN LOS ESPACIOS INTERIORES

FUENTES NATURALES DE RADIACIÓN GAMMA

4.1. Los radionucleidos de origen natural, como el ^{238}U y su progenie, el ^{232}Th y su progenie y el ^{40}K , están presentes en los suelos y en los materiales de construcción en cantidades variables. Las dos principales vías de exposición a la radiación gamma en espacios interiores parten de los radionucleidos presentes en el suelo y en los materiales de construcción. En esta sección se ofrecen recomendaciones y orientaciones para controlar la exposición a la radiación gamma por estas dos vías.

4.2. Se han hecho muchos estudios para determinar las concentraciones de fondo de radionucleidos en los suelos [36 a 38]. Los resultados indican que los radionucleidos emisores de radiación gamma de las series del ^{238}U y del ^{232}Th y el ^{40}K contribuyen de manera aproximadamente igual a la dosis debida a la radiación gamma externa que reciben las personas en las situaciones típicas al aire libre y en espacios interiores. Las concentraciones medianas de la actividad

del ^{238}U , el ^{232}Th y el ^{40}K en la corteza terrestre son de 33, 45 y 410 Bq/kg, respectivamente [3]. Las concentraciones típicas de la actividad en los materiales de construcción como el hormigón también son relativamente parecidas a las de la corteza terrestre, con valores de 40, 30 y 400 Bq/kg para el ^{226}Ra , el ^{232}Th y el ^{40}K , respectivamente [18].

4.3. La dosis efectiva anual media a nivel mundial por exposición externa debida a las fuentes terrestres naturales de radiación es de 0,48 mSv; de esta cantidad, 0,41 mSv se relacionan con la exposición en espacios interiores (suponiendo un factor de ocupación del 80 %) y 0,07 mSv se deben a la exposición al aire libre (suponiendo un factor de ocupación del 20 %) [3]. Los valores medios nacionales de la dosis efectiva anual debida a las fuentes terrestres naturales de radiación se sitúan, en su mayor parte, entre 0,3 mSv y 0,6 mSv.

4.4. La naturaleza de la exposición a la radiación que experimentan las personas que viven o trabajan en un edificio difiere de la que se da en el exterior. El blindaje que ofrece el edificio reduce la exposición debida a los radionucleidos presentes en el suelo. Por otra parte, los radionucleidos de origen natural que se encuentran en los materiales de construcción aumentan la tasa de dosis debida a la radiación gamma en los espacios interiores. El edificio protegerá también a los ocupantes contra la radiación cósmica, pero este efecto suele ser pequeño. Según el UNSCEAR, la tasa de dosis media mundial debida a la radiación gamma es 1,4 veces mayor en los espacios interiores que al aire libre, con proporciones regionales que varían entre 0,8 y 2,0 [3].

4.5. El hormigón es uno de los materiales de construcción más usados. La variación de las concentraciones de radionucleidos de origen natural en el hormigón dependerá de los tipos de materiales de balasto y de aditivos químicos que se hayan utilizado en su fabricación. Los materiales de balasto más comunes son la arena, la grava y los guijarros, que normalmente no aumentan el contenido radiactivo del hormigón. Sin embargo, también se utilizan otros materiales de balasto, como la piedra pómez, que tiene una alta concentración de la actividad del ^{226}Ra , y el granito, que a menudo tiene una alta concentración de la actividad tanto del ^{40}K como del ^{238}U . El empleo de estos materiales aumenta el contenido radiactivo del hormigón.

4.6. El hormigón aireado o ligero consta prácticamente de los mismos materiales que el hormigón ordinario, pero además contiene una pequeña cantidad de aluminio en polvo que confiere al producto final la estructura celular. La lutita aluminosa, utilizada en el pasado como material de balasto en el hormigón ordinario y aireado, tiene una concentración particularmente alta de la actividad

del ^{226}Ra . La concentración de la actividad del ^{226}Ra en el hormigón aireado que contiene lutita aluminosa puede llegar a 2600 Bq/kg [18].

4.7. En la fabricación de los materiales de construcción se utilizan a veces subproductos y residuos industriales, tales como cenizas volantes (de la quema de carbón y turba), escorias de alto horno y fosfoyeso. Estos materiales pueden tener concentraciones aumentadas de radionucleidos de origen natural debido a los procesos de concentración que se producen durante la generación de los residuos [3].

4.8. Los materiales de construcción naturales como el granito y el mármol tienen altas concentraciones de ^{226}Ra , y el granito puede tener también una elevada concentración de ^{232}Th y ^{40}K [3].

4.9. En algunas partes del mundo se han encontrado suelos con concentraciones extremadamente altas de radionucleidos de origen natural [3]. Por ejemplo, en algunas regiones de Azerbaiyán, el Brasil, China, Egipto, la India, Indonesia, Italia, la República Checa y Rumania, la presencia de concentraciones elevadas de radionucleidos de origen natural en el suelo da lugar a dosis efectivas anuales debidas a la radiación gamma de varios mSv. Las dosis efectivas anuales pueden superar los 10 mSv en algunas partes de España, la República Checa y la República Islámica del Irán [3]. En estos lugares, el suelo puede ser la principal causa de exposición de la población a la radiación gamma.

MÉTODOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA

4.10. La técnica de medición que se elija dependerá de que se quiera solo medir la exposición total a la radiación gamma en el exterior o en un edificio, o de que se pretenda determinar y cuantificar los radionucleidos de un material de construcción que dan lugar a esa exposición [38].

4.11. Las tasas de dosis gamma en espacios interiores se miden por lo general en forma directa con un contador Geiger-Müller, una cámara de ionización o un contador de centelleo. Otra posibilidad es efectuar mediciones integradas en las viviendas utilizando detectores o dosímetros de vidrio termoluminiscentes. El funcionamiento y las ventajas comparativas de estos tipos de detectores se examinan con más detalle en la referencia [39].

4.12. La presencia de radionucleidos específicos se detecta y cuantifica normalmente mediante análisis de muestras representativas en un laboratorio.

El método de ensayo preferido es la espectrometría gamma, con un detector de yoduro de sodio o de germanio. Los detectores de germanio hiperpuro (HPGe) son ahora de uso común en los laboratorios de ensayo y también se utilizan en las mediciones efectuadas directamente en las viviendas [38, 40, 41].

ESTUDIOS DE LA RADIACIÓN GAMMA

4.13. La autoridad nacional debería emplear los datos generados en los estudios de los niveles de radiación gamma en el exterior para determinar las zonas en que los radionucleidos de origen natural presentes en el suelo pueden contribuir de manera importante a la exposición de los ocupantes de los edificios a la radiación gamma en espacios interiores. Cuando solo se disponga de datos limitados sobre los niveles de radiación gamma en el exterior, la autoridad nacional debería adoptar disposiciones para que se realice un estudio.

4.14. La autoridad nacional debería emplear los datos generados en los estudios de los niveles de radionucleidos de origen natural en los materiales de construcción para determinar los radionucleidos que contribuyen de manera importante a la exposición a la radiación gamma en espacios interiores. Cuando se disponga de pocos datos sobre los niveles de radionucleidos en los materiales de construcción, la autoridad nacional debería adoptar disposiciones para que se realice un estudio y/o exigir a los fabricantes de materiales de construcción y a los proveedores de materiales de construcción importados que le proporcionen esos datos.

CONTROL Y REDUCCIÓN DE LA EXPOSICIÓN A LA RADIACIÓN GAMMA

Radiación gamma emitida por los suelos

4.15. La autoridad nacional debería considerar la posibilidad de establecer controles para restringir la construcción de nuevos edificios en las zonas que tengan niveles particularmente altos de radiación de fondo natural. En la referencia ICRP [8] se señala que una dosis anual existente que se aproxime a los 100 mSv justificará casi siempre una intervención. La expresión ‘dosis anual existente’ comprende las dosis recibidas por la exposición debida a todas las fuentes, incluidas las dosis por la exposición externa relacionada con los materiales de construcción y el suelo, y las dosis por la exposición interna relacionada con el radón y con los radionucleidos presentes en los alimentos.

4.16. En las raras situaciones en que los radionucleidos de origen natural presentes en el suelo generen altas tasas de dosis debidas a la radiación gamma en espacios interiores, la autoridad nacional debería ofrecer orientación a los ocupantes de esas construcciones sobre los medios de reducir la exposición a la radiación. Esta orientación podría incluir la opción de una reubicación, pero en este caso deberían considerarse también los factores económicos y sociales.

Radiación gamma emitida por los materiales de construcción

4.17. Con arreglo a lo dispuesto en la referencia [2], deben establecerse “niveles de referencia específicos relativos a la exposición debida a los radionucleidos en productos básicos, como materiales de construcción, [...] cada uno de los cuales normalmente se expresará como dosis efectiva anual para la persona representativa que en general no sea superior a un valor de aproximadamente 1 mSv, o sobre la base de esa dosis” (ref. [2], párr. 5.22). El nivel de referencia de aproximadamente 1 mSv se aplica a la dosis recibida por exposición a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción solamente (es decir, excluyendo toda dosis adicional que se derive del ^{222}Rn o el ^{220}Rn que esos materiales hayan emitido al aire de los espacios interiores).

4.18. Los principales contribuyentes a la dosis recibida por exposición a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción son el ^{226}Ra y el ^{232}Th y sus progenies, y el ^{40}K . Varios Estados han introducido directrices o reglamentos para controlar la cantidad de radionucleidos de origen natural en los materiales de construcción. Åkerblom [42] señala que los reglamentos o directrices relativos a los materiales de construcción se basan principalmente en un índice de concentración de la actividad que se relaciona con las concentraciones de la actividad del ^{40}K , el ^{226}Ra y el ^{232}Th en los materiales de construcción. El método utilizado para elaborar y aplicar un índice de concentración de la actividad difiere de un Estado a otro. En el caso de los materiales de construcción con coeficientes de emanación elevados, la autoridad nacional debería añadir criterios para el contenido de radio a fin de controlar la tasa de emanación de radón.

4.19. La autoridad nacional debería establecer un proceso para determinar si los materiales de construcción que contienen radionucleidos de origen natural cumplen con el nivel de referencia. En los párrafos siguientes se da un ejemplo de un proceso de ese tipo para un nivel de referencia de 1 mSv por exposición externa a la radiación gamma. Si un Estado utiliza un valor diferente para el nivel de referencia, la determinación de los materiales de construcción restringidos en ese Estado será distinta de la de este ejemplo. El proceso requiere la determinación de las concentraciones de la actividad de los radionucleidos de

origen natural en el material de construcción, seguida de la determinación del índice de concentración de la actividad. Este índice se relaciona con la exposición a la radiación gamma en un edificio construido con el material de construcción de que se trate. El índice es una herramienta de cribado para identificar los materiales de construcción que pudiera ser necesario restringir.

4.20. Un ejemplo de un índice de concentración de la actividad I que debería considerar la autoridad nacional está dado por la siguiente fórmula [18]¹⁰:

$$I = \frac{C_{\text{Ra}}}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{Th}}}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{C_{\text{K}}}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (1)$$

donde:

C_{Ra} es la concentración de la actividad del ^{226}Ra en el material de construcción, en Bq/kg;

C_{Th} es la concentración de la actividad del ^{232}Th en el material de construcción, en Bq/kg;

y C_{K} es la concentración de la actividad del ^{40}K en el material de construcción, en Bq/kg.

4.21. Si el índice de concentración de la actividad I es inferior a 1 en los materiales de obra gruesa, como el hormigón y los ladrillos, e inferior a 6 en los materiales de revestimiento, como los azulejos, la dosis efectiva anual debida a la exposición a la radiación gamma emitida por los radionucleidos de los materiales de construcción será inferior al nivel de referencia de aproximadamente 1 mSv. En este caso, el uso de esos materiales de construcción no debería estar sujeto a restricciones. La experiencia ha demostrado que la mayoría de los materiales de construcción no superan los valores respectivos del índice de concentración de la actividad [18, 43]. Cuando los materiales de construcción tengan índices que superen los valores de $I = 1$ o $I = 6$, respectivamente, se requerirá una evaluación más a fondo antes de su utilización.

4.22. Para los materiales de construcción que deban ser evaluados más a fondo, la autoridad nacional debería pedir que se calculen las dosis por exposición externa a la radiación gamma que se derivarían del uso de esos materiales. Tal

¹⁰ La derivación del índice de concentración de la actividad, y la derivación de los valores superiores de dicho índice (véase el párr. 4.21), figuran en el anexo I de la referencia [18].

evaluación debería basarse en escenarios en que los materiales se empleen de una forma que sea típica para cada uno de ellos. La determinación de la dosis debería tener en cuenta los niveles de fondo de la exposición externa al aire libre debida a los radionucleidos de origen natural presentes en el suelo no alterado y, de preferencia, debería ser efectuada por el fabricante de los materiales de construcción y presentada a la autoridad nacional.

4.23. En el anexo VI [18] figura un ejemplo de un método para calcular las dosis recibidas por exposición externa a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción.

4.24. En el caso de los materiales de construcción que requieran una evaluación, la dosis efectiva calculada E debida a la exposición externa a la radiación gamma emitida por el material de construcción debería compararse con el nivel de referencia. Si la dosis efectiva calculada es inferior al nivel de referencia de 1 mSv, el uso del material no debería restringirse. Si la dosis efectiva calculada excede del nivel de referencia de 1 mSv, la autoridad nacional debería tomar una decisión sobre las medidas apropiadas, que podrían incluir el establecimiento de restricciones específicas aplicables a los usos previstos de los materiales en cuestión.

4.25. Algunos materiales de construcción naturales utilizados tradicionalmente contienen radionucleidos de origen natural en concentraciones de la actividad tales que podría superarse la dosis efectiva anual de 1 mSv por exposición externa a la radiación gamma. Algunos de esos materiales se han utilizado por decenios o siglos. En tales casos, deberían evaluarse los perjuicios y los costos, tanto financieros como sociales, que entrañaría la prohibición de su uso en la construcción de edificios nuevos.

4.26. El diagrama de flujo de la figura 2 describe el sistema recomendado de control de los materiales de construcción en lo que respecta a la exposición externa a la radiación gamma.

4.27. En la fabricación de materiales de construcción de diferentes tipos se emplean residuos industriales NORM, como las cenizas volantes y el fosfoyeso. El método de evaluación de la dosis basado en la determinación del índice de concentración de la actividad o un método alternativo debería aplicarse a los materiales de construcción fabricados, no a los elementos constituyentes del material. Sin embargo, cuando el residuo pueda contener radionucleidos de origen natural que no sean el ^{226}Ra , el ^{232}Th o el ^{40}K , debería evaluarse también la exposición debida a esos radionucleidos. Además, si las concentraciones de

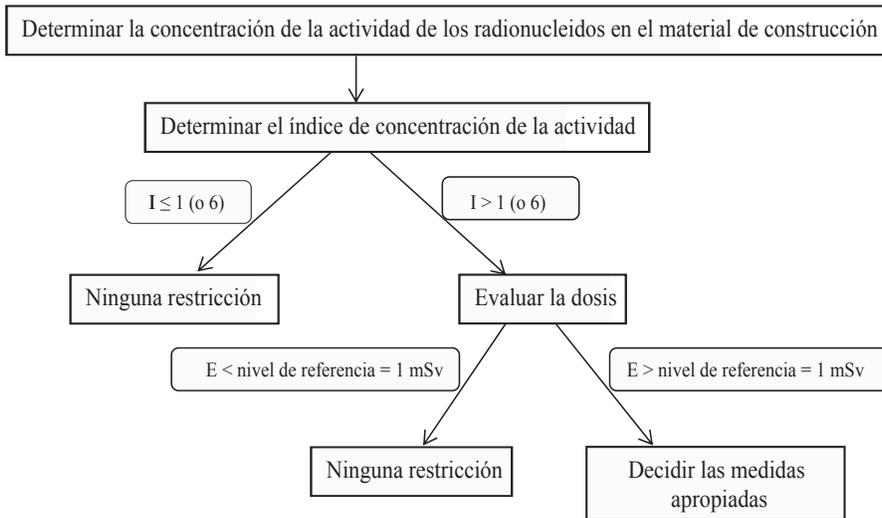


Fig. 2. Diagrama de flujo del sistema recomendado de control de los materiales de construcción con respecto a la exposición externa a la radiación gamma.

la actividad del ^{232}Th y el ^{228}Ra no están en equilibrio en el residuo, debería utilizarse la concentración de la actividad del ^{228}Ra en lugar de la del ^{232}Th en la fórmula que figura en el párrafo 4.20 (Ec. (1)).

Radiación gamma emitida por los materiales de construcción en edificios ya existentes

4.28. En los edificios ya existentes en que se registran dosis efectivas anuales altas por exposición a la radiación gamma emitida por los radionucleidos de los materiales de construcción puede ser preciso adoptar medidas de protección. Si se considera necesario, la autoridad nacional debería establecer niveles de referencia para la exposición a la radiación gamma emitida por los materiales de construcción en los edificios ya existentes. En la referencia [2] se dispone que la autoridad nacional deberá velar por que las medidas de protección estén justificadas y por que la protección y la seguridad estén optimizadas (ref. [2], requisito 48). También se dispone que la autoridad nacional deberá velar por que la estrategia de protección para el manejo de esas situaciones sea proporcionada a los riesgos radiológicos que entrañe la ocupación de los edificios (ref. [2], párr. 5.7).

4.29. Cuando se detecten niveles elevados de radiación gamma en un edificio, esos niveles podrán reducirse aplicando materiales de blindaje en la superficie

de las paredes o los pisos. Los valores de la atenuación de la radiación gamma lograda con diferentes materiales de blindaje se presentan en el cuadro 1 [44].

4.30. En la referencia ICRP [8] se afirma que una dosis anual existente que se aproxime a los 100 mSv justificará casi siempre una intervención. La autoridad nacional debería considerar la posibilidad de imponer la obligación de adoptar medidas protectoras en el caso de las viviendas y otros edificios con factores de ocupación altos en que los niveles de dosis efectiva excedan de 100 mSv. Una intervención posible, pero extrema, es la demolición del edificio y la reubicación de sus ocupantes [8]. Esta medida tiene claramente graves costos sociales y económicos y no debería adoptarse sin una atenta consideración.

CUADRO 1. EFICACIA DE LOS MATERIALES DE BLINDAJE: ESPESOR DEL MATERIAL DE BLINDAJE (MM) NECESARIO PARA OBTENER LA ATENUACIÓN INDICADA [44]

Material de blindaje	Espesor del material de blindaje (mm) necesario para los factores de atenuación dados (de 0,9 a 0,1)								
	Factor de atenuación								
	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Plomo ($\rho = 11\ 300\ \text{kg/m}^3$)	0,9	2,3	4,0	6,3	9,3	13	18	26	38
Hierro ($\rho = 7800\ \text{kg/m}^3$)	6,1	11	17	23	29	37	46	59	81
Barita ($\rho = 3300\ \text{kg/m}^3$)	12	24	37	50	65	83	100	130	180
Barita ($\rho = 2800\ \text{kg/m}^3$)	18	34	50	66	84	100	130	160	220
Hormigón ($\rho = 2300\ \text{kg/m}^3$)	30	50	69	89	110	130	160	200	270
Ladrillo macizo ($\rho = 1800\ \text{kg/m}^3$)	46	72	100	130	160	190	230	280	370

REFERENCIAS

- [1] COMUNIDAD EUROPEA DE LA ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA , ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Principios fundamentales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SF-1, OIEA, Viena (2007).
- [2] COMISIÓN EUROPEA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 3, OIEA, Viena (2016).
- [3] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2010).
- [4] COMISIÓN INTERNACIONAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA, *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) con la autorización de la ICRP, Senda Editorial S.A., Madrid (2008).
- [5] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection Against Radon-222 at Home and at Work, Publication 65, Pergamon Press, Oxford (1993).
- [6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, Publication 115, Elsevier, Oxford (2010).
- [7] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*, OMS, Ginebra (2015).
- [8] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure, Publication 82, Pergamon, Oxford (1999).

- [9] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, PROGRAMA CONJUNTO FAO/OMS SOBRE NORMAS ALIMENTARIAS, COMISIÓN DEL CODEX ALIMENTARIUS, *Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y Piensos, Lista I - Radionucleidos*, CODEX STAN 193-1995, CAC, Roma (2013).
- [10] WORLD HEALTH ORGANIZATION, *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th edn, WHO, Geneva (2011).
- [11] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Protección radiológica ocupacional, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° RS-G-1.1*, OIEA, Viena (2004).
- [12] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Control reglamentario de las descargas radiactivas al medio ambiente, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° WS-G-2.3*, OIEA, Viena (2007).
- [13] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión de desechos radiactivos procedentes de la extracción y el tratamiento de minerales, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° WS-G-1.2*, OIEA, Viena (2010).
- [14] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSR Part 1*, OIEA, Viena (2010).
- [15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, *Measurement of Radioactivity in the Environment — Air: Radon-222 — Part 8: Methodologies for Initial and Additional Investigations in Buildings*, ISO Standard 11665-8:2012, ISO, Geneva (2012).
- [16] UNITED NATIONS, *Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).
- [17] UNITED NATIONS, *Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
- [18] EUROPEAN COMMISSION, *Radiation Protection 112, Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials (1999)*, <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/112.pdf>.
- [19] INGERSOLL, J.G., *A survey of radionuclide content and radon emanation rates in building materials used in the U.S.*, *Health Phys.* **45** (1983) 363–368.
- [20] JENSEN, C.L., STRAND, T., RAMBERG, G., RUDEN, L., ANESTAD, K., *The Norwegian Radon Mapping and Remediation Program*, IRPA, Madrid (2004).
- [21] EK, B., THUNHOLM, B., OSTERGREN, I., FALK, R., MJONES, L., *Naturligt radioaktivt ämnen, arsenik och andra metaller i dricksvatten från enskilda brunnar (2008)*, <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Rapport/Stralskydd/2008/ssi-rapp-2008-15.pdf> (summary in English).

- [22] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Air: Radon-222 — Part 4: Integrated Measurement Methods for Determining Average Activity Concentration Using Passive Sampling and Delayed Analysis, ISO Standard 11665-4:2012, ISO, Geneva (2012).
- [23] RADIATION PROTECTION INSTITUTE OF IRELAND, Action Plan to Identify and Remedy Irish Houses with Radon Concentrations above the National Reference Level (2006), http://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_Rad_Action_Plan_06.pdf.
- [24] L'AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, National Action Plan 2011–2015 for Management of Radon-related Risks (2012), <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/News-releases/ASN-s-national-action-plan-for-management-of-the-radon-risk>.
- [25] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, National Action Plan concerning Radon, 2012 – 2020 (2011), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6lnladlIZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCKdH14f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A.
- [26] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Protecting People and Families from Radon: A Federal Action Plan for Saving Lives (2011), http://www.epa.gov/radon/pdfs/Federal_Radon_Action_Plan.pdf.
- [27] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Radiological Protection against Radon Exposure, Publication 126, Elsevier, Oxford (2014).
- [28] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The Optimisation of Radiological Protection, Publication 101b, Elsevier, Oxford (2006).
- [29] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*, Norma ISO/IEC 17025:2005, UNE-EN ISO/IEC 17025, AENOR, España (2010).
- [30] NEZNAL, M., NEZNAL, M., ŠMARDA, J., “Radon infiltration risk from the ground in Chabry, Prague”, Radon Investigations in Czechoslovakia (BARNET, I., Ed.), Vol. 2, Czech Geological Survey, Prague (1991) 34–39.
- [31] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites, Czech Geological Survey Special Papers 16, Czech Geological Survey, Prague (2004).
- [32] MCLAUGHLIN, J., An overview of thoron and its progeny in the indoor environment, *Radiat. Prot. Dosim.* **141** (2010) 316–321.
- [33] GUO, Q., SHIMO, M., IKEBE, Y., MINATO, S., The study of thoron and radon progeny concentrations in dwellings in Japan, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 357–359.
- [34] TOKONAMI, S., et al., Radon and thoron exposures for cave residents in Shanxi and Shaanxi provinces, *Radiat. Res.* **162** (2004) 390–396.
- [35] YAMASAKI, T., LIDA, T., Measurements of thoron progeny concentration using a potential alpha-energy monitor in Japan, *Health Phys.* **68** (1995) 840–844.
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Soil — Part 1: General Guidelines and Definitions, ISO Standard 18589-1:2005, ISO, Geneva (2005).

- [37] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Soil — Part 2: Guidance for the Selection of the Sampling Strategy, Sampling and Pre-treatment of Samples, ISO Standard 18589-2:2007, ISO, Geneva (2007).
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Soil — Part 3: Measurement of Gamma-Emitting Radionuclides, ISO Standard 18589-3:2007, ISO, Geneva (2007).
- [39] KNOLL, G.F., Radiation Detection and Measurement, 4th edn, J. Wiley and Sons, New York (2011).
- [40] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Nuclear Instrumentation — Measurement of Gamma-Ray Emission Rates of Radionuclides — Calibration and Use of Germanium Spectrometers, IEC Standard 61452, IEC, Geneva (1995).
- [41] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Radiation Protection Instrumentation — Measurement of Discrete Radionuclides in the Environment — In Situ Photon Spectrometry System Using a Germanium Detector, IEC Standard 61275, IEC, Geneva (2013).
- [42] ÅKERBLOM, G., Radon Legislation and National Guidelines, SSI Report No. 99:18, Swedish Radiation Protection Institute, Stockholm (1999).
- [43] TREVISI, R., RISICA, S., D’ALESSANDRO, M., PARADISO, D., NUCCETELLI, C., Natural radioactivity in building materials in the European Union: a database and an estimate of radiological significance, *J. Environ. Radioact.* **105** (2012) 11–20.
- [44] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon and Gamma Radiation from Building Materials, CSN 73 0602, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague (2006).

Anexo I

ESTUDIOS DEL RADÓN Y MAPEO DE LAS ZONAS PROPENSAS AL ^{222}Rn

I-1. Las medidas destinadas a controlar el riesgo para la salud pública que supone el radón deben basarse en el conocimiento de las concentraciones de este elemento en los espacios interiores en cada Estado. Varias autoridades internacionales han señalado la necesidad de conocer las concentraciones de radón y sus variaciones de un lugar a otro para determinar la exposición que experimenta la población debido a este elemento [I-1, I-2]. Esto implica la necesidad de realizar estudios del radón y un mapeo del ^{222}Rn . La OMS ha efectuado un estudio del radón en varios Estados [I-3].

I-2. Las concentraciones elevadas de ^{222}Rn en espacios interiores tienen su origen, casi siempre, en el uranio presente en el suelo. En algunos casos, los materiales de construcción pueden generar concentraciones altas de radón en espacios interiores, pero eso no es lo habitual. Las concentraciones relativamente altas de ^{222}Rn están asociadas con determinados tipos de lecho rocoso y depósitos no consolidados, por ejemplo algunos granitos, las rocas fosfáticas y las pizarras ricas en materiales orgánicos. El contenido de uranio no es el único factor que determina la tasa de emisión de ^{222}Rn de las rocas: la permeabilidad, la cantidad de fracturas y fallas, y la meteorización también son factores importantes. Además, debe considerarse el efecto de actividades humanas tales como la minería. Una vez emitido, el gas ^{222}Rn migra hasta la superficie por medio de varios procesos complejos. El movimiento del gas ^{222}Rn desde el suelo hasta el aire de espacios interiores depende de una serie de factores que pueden variar considerablemente de un edificio a otro y con el tiempo.

I-3. Las concentraciones de gas ^{222}Rn en el suelo pueden variar de una región a otra en función de las concentraciones de uranio en las rocas y en el suelo y de la forma en que se desplacen los gases dentro de las distintas estructuras geológicas y entre ellas [I-4]. A una escala mucho menor, la interacción de esa misma categoría general de factores con las características detalladas de la construcción y utilización de los distintos edificios determina las concentraciones de ^{222}Rn en el interior de estos. Esas concentraciones de ^{222}Rn pueden variar considerablemente de un edificio a otro, y también de hora en hora y de día en día, con arreglo a factores meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, la presión atmosférica y la temperatura [I-5, I-6]. El comportamiento de los ocupantes también puede influir en las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores.

I-4. Las concentraciones de ^{222}Rn en los edificios dependen de la concentración de radón en el gas del suelo y de la permeabilidad del suelo y la forma en que se construyen y utilizan los edificios. Se han realizado estudios para intentar correlacionar las concentraciones de ^{222}Rn en el gas del suelo con las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores. Estos estudios han tenido un éxito limitado, porque no se han tomado en consideración todos los factores que influyen en las concentraciones de radón en los espacios interiores.

I-5. La amplia variabilidad de las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores hace que sean necesarios cuidadosos estudios de este radionucleido para poder determinar la escala y naturaleza del problema que plantea en cada Estado o región. La mejor forma de presentar los resultados de esos estudios es en mapas. Synnott y Fenton [I-7] y Dubois [I-8] realizaron exámenes completos de los estudios del ^{222}Rn y del mapeo del radón en Europa. En vista de los resultados, y en particular de la gran heterogeneidad metodológica de los mapas que hacía casi imposible la comparación entre los Estados, en 2006 se inició un proyecto europeo de mapeo del radón en gran escala. Se ha publicado una versión provisional del mapa europeo del radón en espacios interiores (que es un proyecto aún en curso, ya que en muchos Estados se están todavía realizando los estudios) [I-9 a I-11]. En el cuadro I-1 se presenta un resumen de los estudios nacionales del ^{222}Rn descritos por Dubois [I-8, I-12 a I-46]. Desde que se publicó la referencia [I-8], se han adquirido grandes cantidades de datos sobre el radón. Muchos Estados publican también datos sobre las concentraciones de ^{222}Rn en espacios interiores a escala regional y local. El UNSCEAR ha comunicado datos a nivel mundial y su publicación más reciente de este tipo data de 2006 [I-47].

I-6. Los estudios del ^{222}Rn pueden centrarse en la población y tener por objeto adquirir información sobre la exposición de las personas atribuible a este radioisótopo, o basarse en las zonas y tener el objeto de determinar las concentraciones típicas de ^{222}Rn en distintas áreas geográficas, independientemente de la población que viva en ellas. Estos son estudios distintos, aunque naturalmente se relacionan entre sí. Un estudio basado en la población ayuda a entender las consecuencias para la salud pública de la exposición debida al ^{222}Rn . Se necesita un mapa para adoptar decisiones sobre la necesidad de medidas preventivas contra el ^{222}Rn en los edificios nuevos, o para orientar los estudios hacia la detección de los edificios ya existentes que tengan altas concentraciones de ^{222}Rn . Un estudio basado en la población podría incluir, por ejemplo, mediciones en uno de cada 1000 edificios de la zona de interés, sin que importe cuán próximos o alejados estén esos edificios entre sí. En un estudio basado en las zonas se hará un número fijo de mediciones por unidad geográfica, independientemente de cuántos edificios haya en cada unidad.

CUADRO I-1. PROGRAMAS DE MAPEO DE LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn EN LOS ESPACIOS INTERIORES EN EUROPA (*basado en Dubois [I-8]*)

Estado	Referencia seleccionada	Estado	Referencia seleccionada
Alemania	[I-22]	Italia	[I-26]
Austria	[I-12]	Letonia	[I-27]
Bélgica	[I-13]	Lituania	[I-28]
Croacia	[I-14]	Luxemburgo	[I-29]
Chipre	[I-15]	Malta	[I-30]
Dinamarca	[I-17]	Noruega	[I-32]
Eslovaquia	[I-37]	Países Bajos	[I-31]
Eslovenia	[I-38]	Polonia	[I-33]
España	[I-39]	Portugal	[I-34]
Estonia	[I-18]	Reino Unido	[I-43 a I-46]
ex República Yugoslava de Macedonia	[I-42]	República Checa	[I-16]
Finlandia	[I-19, I-20]	Rumania	[I-35]
Francia	[I-21]	Serbia (Vojvodina solamente)	[I-36]
Grecia	[I-23]	Suecia	[I-40]
Hungría	[I-24]	Suiza	[I-41]
Irlanda	[I-25]		

I-7. Los planes de muestreo descritos son sencillos y lógicos. Pero en cuanto se hacen mediciones que no responden a un plan de muestreo formal, la situación se vuelve más compleja. Si son los propietarios de los edificios los que encargan y pagan las mediciones, es probable que haya diferencias socioeconómicas entre los que encarguen esas mediciones y los que no.

I-8. Al elaborar mapas de las concentraciones de ^{222}Rn , es necesario presentar los resultados sobre la base de algún tipo de unidad geográfica. Como se señaló anteriormente, las concentraciones de ^{222}Rn dependen primordialmente de factores geológicos y de las formas en que se construyen y utilizan las

viviendas. Los usuarios de esos mapas pueden considerarlos más fáciles de utilizar si se basan en unidades administrativas, por ejemplo en los límites de las administraciones locales, o en una simple cuadrícula rectangular. El mapeo que utiliza los límites de las administraciones locales resulta más práctico para los fines de la reglamentación. Los procesos físicos de fondo hacen pensar que se obtendrían mejores resultados si se combinara la información que se relaciona con una misma unidad geológica. Sin embargo, la posibilidad de concentraciones altas de ^{222}Rn en los espacios interiores puede variar considerablemente también dentro de una misma unidad geológica.

EJEMPLO DEL ENFOQUE UTILIZADO PARA EL MAPEO DEL ^{222}Rn EN EL REINO UNIDO

I-9. La experiencia con el mapeo del ^{222}Rn en el Reino Unido ilustra algunos de estos aspectos. Cuando se realizaron los primeros estudios basados en la población, los resultados se presentaron en forma de mapas reticulados de las concentraciones medias de ^{222}Rn con cuadrados de 10 km por lado. Sin embargo, muchos cuadrados carecían de información, y quedó de manifiesto que se requería un mapa del radón más completo y detallado que ayudara a formular la política sobre el ^{222}Rn y a establecer las prioridades de las campañas correspondientes [I-48]. Así pues, se realizaron mediciones de las concentraciones de ^{222}Rn para un mapeo detallado, comenzando por las partes del Reino Unido en que se habían encontrado las concentraciones más altas de este radionucleido. En esas zonas se hicieron mediciones adicionales de las concentraciones de ^{222}Rn , con miras a obtener al menos cinco resultados para cada cuadrado de 5 km por lado.

I-10. La distribución de los resultados de las mediciones del ^{222}Rn dentro de los cuadrados resultó ser próxima a una distribución lognormal. Para caracterizar esta distribución solo es necesario determinar dos parámetros en cada cuadrado: la media geométrica y la desviación estándar geométrica. Se desarrollaron técnicas que permitían utilizar los datos de cuadrados adyacentes para estimar esos parámetros cuando los resultados de las mediciones eran insuficientes [I-49, I-50]. Los resultados se presentaron como mapas de probabilidad, que indicaban la probabilidad de que se superara el nivel de intervención para el radón en alguna vivienda de un cuadrado.

I-11. En algunas zonas, campañas intensivas de mediciones destinadas a detectar las viviendas con concentraciones altas de ^{222}Rn produjeron un promedio de 15 resultados por cuadrado de 1 km por lado, aunque la distribución de los resultados era muy dispareja. Una densidad de resultados tan alta permite

un mapeo más detallado de las concentraciones de ^{222}Rn , con una resolución de un cuadrado de 1 km por lado. Sin embargo, se comprobó que los métodos desarrollados para mapear las concentraciones de ^{222}Rn con una resolución de 5 km no eran apropiados para la resolución de 1 km, porque la distribución de las mediciones era demasiado desigual a la escala más fina. Por consiguiente, se desarrolló un nuevo método de análisis de los datos que permitía mapear las concentraciones de ^{222}Rn en cuadrados de 1 km por lado [I-51].

I-12. Los mapas de las concentraciones de ^{222}Rn en el Reino Unido describían, sobre todo, las mediciones de este radionucleido agrupadas por cuadrado de la retícula. Se elaboraron también otros mapas de las concentraciones de ^{222}Rn en que todas las mediciones del ^{222}Rn que correspondían a la misma unidad geológica estaban agrupadas y se trataban como una distribución única [I-52]. Los límites de las unidades geológicas se tomaron de los mapas geológicos digitales.

I-13. Ambos métodos de mapeo, el que se basa en la cuadrícula y el que utiliza la geología, tienen puntos fuertes y débiles. Como la posibilidad de que haya concentraciones altas de ^{222}Rn en los espacios interiores difiere claramente de una unidad geológica a otra, la agrupación de los resultados de las concentraciones de ^{222}Rn por unidades geológicas es un enfoque lógico. Sin embargo, en muchos casos hay variaciones sustanciales en las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores dentro de una misma unidad geológica, y el mapeo geológico no tiene en cuenta esas variaciones. El mapeo cuadrículado pasa por alto las diferencias entre las unidades geológicas, pero puede revelar variaciones dentro de cada una de esas unidades que no aparecen en los mapas geológicos de las concentraciones de ^{222}Rn .

I-14. Para determinar si es posible combinar las diferentes ventajas del mapeo geológico y el mapeo cuadrículado de las concentraciones de ^{222}Rn , los resultados de las mediciones de las concentraciones de ^{222}Rn en las viviendas se agrupan primero por unidades geológicas. A continuación se aplica el método de mapeo en cuadrados de 1 km por lado para cartografiar separadamente las variaciones de las concentraciones de ^{222}Rn en espacios interiores en cada unidad. Por último, se combinan los diferentes mapas de las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores de todas las unidades geológicas, para obtener un mapa de toda la zona comprendida en el estudio [I-53].

I-15. Otros Estados de Europa también atribuyen importancia a los programas de mapeo de las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores (véase el cuadro I-1). Se ha elaborado una reseña de las técnicas de mapeo del ^{222}Rn que

se han aplicado en diferentes Estados europeos [I-7]. Los Estados Unidos de América también tienen cierta experiencia en el mapeo del ^{222}Rn [I-54]. Las técnicas de mapeo se han desarrollado considerablemente en los últimos años, gracias a la mayor disponibilidad y el mejor conocimiento de los sistemas de información geográfica y los métodos geoestadísticos.

REFERENCIAS DEL ANEXO I

- [I-1] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection against Radon-222 at Home and at Work, Publication 65, Pergamon Press, Oxford (1993).
- [I-2] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública*, OMS, Ginebra (2015).
- [I-3] ZEEB, H., Survey on Radon Guidelines, Programmes and Activities, WHO Report WHO/HSE/RAD/07.01, WHO, Geneva (2007).
- [I-4] BARNET, I., PACHEROVÁ, P., NEZNAL, M., NEZNAL, M., Radon in geological environment - Czech experience, Special Papers No. 19, Czech Geological Survey, Prague (2008).
- [I-5] ROBINSON, A.L., SEXTRO, R.G., Radon entry into buildings driven by atmospheric pressure fluctuations, *Environ. Sci. Technol.* **31** 6 (1997) 1742–1748.
- [I-6] SUN, Q., TOKONAMI, S., YAMADA, Y., AKIBA, S., Main meteorological parameters to influence indoor radon level, *Radioisot.* **51** 3 (2002) 120–126.
- [I-7] SYNNOTT, H., FENTON, D., An Evaluation of Radon Reference Levels and Radon Measurement Techniques and Protocols in European Countries (2005), https://www.epa.ie/pubs/reports/radiation/RPII_ERRICA_Measure_Report_05.pdf.
- [I-8] DUBOIS, G., An Overview of Radon Surveys in Europe (2005), http://rem.jrc.ec.europa.eu/RemWeb/publications/EUR_RADON.pdf.
- [I-9] TOLLEFSEN, T., GRUBER, V., BOSSEW, P., DE CORT, M., Status of the European indoor radon map, *Radiat. Prot. Dosim.* **145** (2011) 110–116.
- [I-10] DE CORT, M., GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., JANSSENS, A., Towards a European atlas of natural radiation: Goal, status and future perspectives, *Radioprot.* **46** (2011) S737–S743.
- [I-11] GRUBER, V., TOLLEFSEN, T., BOSSEW, P., DE CORT, M., The European indoor radon map and beyond, *Carpathian J. Earth & Environ. Sci.* **8** (2013) 169–176.
- [I-12] FRIEDMANN, H., et al., “The Austrian radon project”, *Sci. Total Environ.* **272** 1–3 (2001) 211–212 (abstract).
- [I-13] VANMARCKE, H., MOL, H., PARIDAENS, J., EGGERMONT, G., “Exposure of the Belgian Population to Ionizing Radiation”, IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr. Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).

- [I-14] RADOLIC, V., et al., National survey of indoor radon levels in Croatia, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **269** (2006) 87–90.
- [I-15] SARROU, I., PASHILIDIS, I., Radon Levels in Cyprus, *J. Environ. Radioact.* **68** (2003) 269–277.
- [I-16] HULKA, J., THOMAS, J., “National radon programme: 20 years of experience in Czech Republic”, IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr. Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).
- [I-17] ANDERSEN, C.E., ULBAK, K., DAMKJÆR, A., KIRKEGAARD, P., GRAVESEN, P., Mapping indoor radon-222 in Denmark: Design and test of the statistical model used in the second nationwide survey, *Sci. Total Environ.* **272** 1–3 (2001) 231–241.
- [I-18] PAHAPILL, L., RULKOV, A., RAJAMÄE, R., ÅKERBLOM, G., Radon in Estonian Dwellings, Results from a National Radon Survey, SSI Report No. 2003:16, Swedish Radiation Protection Authority, Stockholm (2003).
- [I-19] VALMARI, T., MÄKELÄINEN, I., REISBACKA, H., ARVELA, H., Suomen Radonkartasto — Radon Atlas of Finland, STUKA245, Oy Edita Ab., Helsinki (2010).
- [I-20] MÄKELÄINEN, I., VALMARI, T., REISBACKA, H., KINNUNEN, T., ARVELA, H., “Indoor radon and construction practices in Finnish homes from the 20th to the 21st century”, Third European IRPA Congress (Proc. Int. Congr. Helsinki, 2010) Nordic Society for Radiation Protection, Helsinki (2011) 561–569.
- [I-21] BILLON, S., et al., French population exposure to radon, terrestrial gamma and cosmic rays, *Radiat. Prot. Dosim.* **113** 3 (2005) 314–320.
- [I-22] LEHMANN, R., KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R., VALDIVIA-MANCHEGO, M., The regional distribution of indoor radon concentration in Germany, *Int. Congr. Ser.* **1225** (2002) 55–61.
- [I-23] CLOUVAS, A., XANTHOS, S., ANTONOPOULOS-DOMIS, M., A combination study of indoor radon and in situ gamma spectrometry measurements in Greek dwellings, *Radiat. Prot. Dosim.* **103** 4 (2003) 363–366.
- [I-24] HÁMORI, K., TÓTH, E., KÖTELES, G., PÁL, L., A Magyarországi lakások radonszintje (1994–2004), *Egészstud.* **48** (1994) 283–299.
- [I-25] FENNELL, S.G., et al., Radon in Dwellings, The Irish National Radon Survey, RPII-02/1, Radiological Protection Institute of Ireland, Dublin (2002).
- [I-26] BOCHICCHIO, F., et al., Results of the representative Italian national survey on radon indoors, *Health Phys.* **71** 5 (1996) 741–748.
- [I-27] DAMBIS, M., “Radon in Latvia’s dwellings”, Radiation and Society: Comprehending Radiation Risk (Proc. Int. Conf. Paris, 1994) IAEA, Vienna (1996) 379–382.
- [I-28] MORKUNAS, G., ÅKERBLOM, G., “The outcome of the Lithuanian radon survey”, *Sci. Total Environ.* **272** (2001) 243–244 (abstract).
- [I-29] KIES, A., FEIDER, M., BIELL, A., Indoor radon concentrations in the Grand Duchy of Luxembourg, *Ann. Assoc. Belg. Radioprot.* **19** (1994) 189–201.
- [I-30] MIFSUD, I., SAMMUT, M., A survey on radon levels in local dwellings, *Xjenza* **4** (1999) 40–41.

- [I-31] STOOP, P., GLASTRA, P., HIEMSTRA, Y., DE VRIES, L., LEMBRECHTS, J., Results of the Second Dutch National Survey on Radon in Dwellings, RIVM Report No. 610058006, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands (1998).
- [I-32] STRAND, T., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., Radon in Norwegian dwellings, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 503–508.
- [I-33] STAWARZ, O., ISAJENKO, K., LIPINSKI, P., MAMONT-CIESLA, K., The radon concentration investigations in dwellings of Rzeszow area with the aim of completing missing data in radon atlas of Poland, Activity Report 2008-2009, 25-31, Central Laboratory for Radiological Protection, Warsaw (2010).
- [I-34] FAÍSCA, M.C., TEIXEIRA, M.M.G.R., BETTENCOURT, A.O., Indoor radon concentrations in Portugal — a national survey, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 465–467.
- [I-35] CUCULEANU, V., SONOC, S., GEORGESCU, M., Radioactivity of radon and thoron daughters in Romania, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 483–485.
- [I-36] CURCIC, S., et al., “The first radon map of Vojvodina”, IRPA 11: 11th international congress of the International Radiation Protection Association (Proc. Int. Congr., Madrid, 2004) SENDA, Madrid (2004).
- [I-37] VICANOVÁ, M., DURČÍK, M., NIKODEMOVÁ, D., Radiation Load from Radon Exposure in Slovakia (1999), http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/017/30017847.pdf.
- [I-38] KRIŽMAN, M., ILIC, R., SKVARC, J., JERAN, Z., “A survey of indoor radon concentrations in dwellings in Slovenia”, Proceedings of the IRPA Regional Congress (Proc. Congr. Portorož, 1995), (GLAVIC-CINDRO, D., Ed.), J. Stefan Institute, Ljubljana (1995) 66–70.
- [I-39] QUINDÓS PONCELA, L.S., et al., Natural external gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain, *Environ. Int.* **29** (2004) 1091–1096.
- [I-40] SWEDISH RADON COMMISSION, Proposal for a New Radon Programme for Sweden, The Swedish Radon 2000 Commission’s Report SOU 001:7, Swedish Government Offices, Stockholm (2001).
- [I-41] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, Jahresbericht 2013 der Abteilung Strahlenschutz (2013), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00043/00065/02236/index.html?lang=de>.
- [I-42] REPUBLIC INSTITUTE FOR HEALTH PROTECTION, Radon in Living and Working Environment, Report No. 40096895, RIHP, Skopje (1998).
- [I-43] GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., BRADLEY, E.J., REES, D.M., Radon Atlas of England and Wales, NRPB-W26, National Radiological Protection Board, Chilton (2002).
- [I-44] MILES, J.C.H., et al., Indicative Atlas of England and Wales, Report No. HPA-RPD-033, Health Protection Agency, Didcot (2007).
- [I-45] MILES, J.C.H., et al., Indicative Atlas of Radon in Scotland, Report No. HPA-CRCE-023, Health Protection Agency, London (2011).
- [I-46] GREEN, B.M.R., LARMOUR, R., MILES, J.C.H., REES, D.M., LEDGERWOOD, F.K., Radon in Dwellings in Northern Ireland, Report No. HPA-RPD-061, Health Protection Agency, Chilton (2009).

- [I-47] UNITED NATIONS, Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).
- [I-48] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D.W., The development of the UK radon programme, *J. Radiol. Prot.* **25** 4 (2005) 475–492.
- [I-49] MILES, J.C.H., Mapping the proportion of the housing stock exceeding a radon reference level, *Radiat. Prot. Dosim.* **56** (1994) 207–210.
- [I-50] MILES, J.C.H., Mapping radon-prone areas by lognormal modelling of house radon data, *Health Phys.* **74** (1998) 370–378.
- [I-51] MILES, J.C.H., Development of maps of radon-prone areas using radon measurements in houses, *J. Hazard. Mater.* **61** (1998) 53–58.
- [I-52] APPLETON, J.D., BALL, T.K., “Geological radon potential mapping”, *Geoenvironmental Mapping: Methods, Theory and Practice* (BOBROWSKY, P. T., Ed.), Balkema, Rotterdam (2002) 577–613.
- [I-53] MILES, J.C.H., APPLETON, J.D., Mapping variation in radon potential both between and within geological units, *J. Radiol. Prot.* **25** (2005) 257–276.
- [I-54] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Map of Radon Zones (2012), <http://www.epa.gov/radon/zonemap.html>.

Anexo II

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL ^{222}Rn Y EL ^{220}Rn

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL ^{222}Rn

II-1. Los riesgos para la salud que entrañe la inhalación del radón y de los productos de su desintegración dependerá de la mezcla de radionucleidos que esté presente en el aire inhalado. Los radionucleidos que emiten partículas alfa son especialmente importantes, porque estas partículas causan más daños biológicos que las partículas beta o la radiación gamma dentro del cuerpo. Por lo general, es la progenie del radón más que el propio gas radón la que genera la mayor parte del riesgo; los productos de la desintegración del radón pueden quedar atrapados en el pulmón, mientras que casi todo el gas radón que se inhala se vuelve a exhalar. Se ha demostrado que la concentración del gas radón es por lo general un buen indicador del riesgo existente [II-1]. La medición de la progenie del radón sigue siendo un tema importante, pero cuando se trata de adoptar medidas prácticas para la protección radiológica, lo que se mide habitualmente son las concentraciones de gas radón.

II-2. El riesgo de que una persona expuesta al radón desarrolle un cáncer de pulmón depende de su exposición acumulativa a lo largo de muchos años. Sería conveniente poder estimar esa exposición a partir de una medición rápida. Pero las mediciones del radón pueden ser engañosas, porque las concentraciones de este gas pueden variar, a veces de manera muy considerable, de hora en hora, de día en día y de mes en mes, en función de factores meteorológicos y de otra índole [II-2 a II-4]. Las mediciones puntuales [II-5], a corto plazo [II-6] o continuas [II-7] de las concentraciones de radón pueden ser útiles para fines de cribado y de diagnóstico, o para determinar la plena variación temporal de las concentraciones de este gas. Sin embargo, para evaluar los riesgos sanitarios es preciso conocer la concentración media a largo plazo de la actividad del radón, o la concentración media de la actividad del radón integrada respecto de un período largo. Lo ideal es que las concentraciones de radón se midan durante todo un año, para captar las variaciones estacionales que puedan existir. La concentración anual media de la actividad del radón varía de un año a otro [II-8]. Pero, cuando los detectores se dejan por tanto tiempo en las viviendas, puede ocurrir que se les coloque en un lugar inadecuado o que surjan problemas con su funcionamiento; además, los ocupantes de la vivienda pueden no estar dispuestos a esperar tanto tiempo para obtener un resultado. Por estas razones, las mediciones se realizan habitualmente durante un período de algunos meses, y el promedio anual se estima utilizando

factores de corrección basados en las variaciones estacionales típicas. Las pautas de variación estacional de las concentraciones de ^{222}Rn han sido investigadas por varios autores [II-9 a II-12]. Las concentraciones de ^{222}Rn son generalmente mayores en los meses más fríos, y en algunos Estados las mediciones del ^{222}Rn se realizan durante el invierno para obtener estimaciones más prudentes.

II-3. Es importante que se apliquen protocolos de medición bien diseñados y debidamente especificados [II-4]. En el plano internacional, la Organización Internacional de Normalización elaboró una norma sobre los métodos de ensayo para el ^{222}Rn que publicó por partes, cada una de ellas adaptada a una situación y a objetivos particulares, teniendo en cuenta los objetivos conexos referentes a la calidad de los datos [II-3, II-5 a II-7, II-13 a II-20]. En los Estados Unidos de América, por ejemplo, la Agencia de Protección Ambiental ha publicado asesoramiento [II-21], y otros Estados, como el Reino Unido [II-22] y Francia [II-23, II-24], también han ofrecido orientación. En la mayoría de los Estados, el consejo dado es que se mida la concentración de ^{222}Rn a lo largo de varios meses para determinar la exposición y compararla con el nivel de referencia. Sin embargo, también pueden utilizarse mediciones por períodos breves, a condición de que se sigan protocolos estrictos en la interpretación de los resultados. Este enfoque se ha empleado en algunos Estados [II-21, II-25] y puede indicar rápidamente si las concentraciones de la actividad del ^{222}Rn son muy altas o muy bajas, pero la información que proporcionan estas mediciones no puede utilizarse actualmente para una comparación con los niveles de referencia. En un edificio dado también puede haber variaciones importantes de la concentración de la actividad del ^{222}Rn de año en año [II-26]. Sin embargo, en general no es viable realizar mediciones durante todo un año [II-16], salvo en el marco de un estudio epidemiológico o de una investigación.

II-4. En las secciones siguientes se describen brevemente varios tipos de detectores del ^{222}Rn . En todos los casos, los instrumentos detectan la radiación alfa o gamma emitida por el ^{222}Rn o los productos de su desintegración. Se han publicado exámenes detallados de las técnicas de medición del ^{222}Rn [II-20, II-27].

II-5. Los detectores del ^{222}Rn pueden ser de dos tipos: activos o pasivos. Los detectores pasivos no requieren energía eléctrica y ofrecen ventajas evidentes para un uso a gran escala. La mayoría de las mediciones de las concentraciones de ^{222}Rn en las viviendas se han hecho con detectores de trazas nucleares de estado sólido o con detectores de carbón activado, que son dos tipos de detectores pasivos.

DETECTORES DE TRAZAS NUCLEARES DE ESTADO SÓLIDO

II-6. Los detectores de trazas nucleares de estado sólido consisten por lo general en un detector plástico situado dentro de un pequeño contenedor. El gas radón entra en el contenedor por difusión y decae, emitiendo partículas alfa que dejan huellas de daños en el detector plástico. Para determinar la cantidad de radón a la que ha estado expuesto el detector, el plástico se trata con una solución cáustica que graba las trazas del daño causado por la radiación de partículas alfa. Las trazas pueden contarse automáticamente bajo un microscopio o con un escáner de diapositivas, por ejemplo. El plástico sensible de uso más común es el carbonato de polialildiglicol (PADC, conocido también como CR-39). Una de las primeras descripciones de este principio fue la de Geiger, que figura en la referencia [II-28]. En la referencia [II-29] aparece un examen detallado de las aplicaciones de los detectores de trazas nucleares de estado sólido, y en la [II-6], una norma internacional describe su utilización.

II-7. Los detectores de trazas nucleares de estado sólido son pequeños, baratos y sencillos y no son tóxicos ni peligrosos. Pueden enviarse por correo postal, con las instrucciones para su emplazamiento y su devolución. En las mediciones en las viviendas se utilizan por lo general dos detectores para evaluar la exposición de los ocupantes; uno se coloca en un dormitorio ocupado y el otro en la principal área de estar. Normalmente se dejan ahí por un período mínimo de tres meses y luego se devuelven para el procesamiento. En algunos Estados se aplican asimismo otras modalidades para evaluar la exposición de los ocupantes debida al radón y también la posible exposición causada por los niveles de radón en el sótano. Para ello, los detectores se colocan en una habitación de la planta más baja que esté ocupada, y en el sótano o en una bodega situada bajo el edificio.

II-8. La mayoría de los detectores de trazas nucleares de estado sólido tienen filtros para evitar que los productos de la desintegración del radón penetren y contribuyan a la señal. Sin embargo, algunos detectores están descubiertos y detectan tanto el gas radón como su progenie. Esto podría parecer una ventaja, pero de hecho esos detectores de cámara abierta son muy sensibles a varios factores (por ejemplo, la luz solar y el polvo) que influyen en la proporción de la progenie que se detecta. Los detectores ‘abiertos’ puede también cerrarse durante el período de medición, por lo que es importante que se apunte el tiempo de exposición (es decir, el período en que el detector permanece abierto).

II-9. La radiación debida al ^{220}Rn puede afectar a los resultados de algunos de los detectores de trazas nucleares de estado sólido de cámara cerrada, y de todos los de cámara abierta [II-30]. Este es un inconveniente, porque reduce la

exactitud de las mediciones de las concentraciones de ^{222}Rn . Los detectores de trazas nucleares de estado sólido de cámara cerrada tienen, de preferencia, un semiperíodo para la entrada del ^{222}Rn que es largo en comparación con el período de semidesintegración del ^{220}Rn (55,6 segundos) pero corto en comparación con el del ^{222}Rn (3,82 días). Si los detectores cumplen este criterio, el ^{220}Rn habrá decaído casi del todo antes de entrar en el detector, mientras que el ^{222}Rn no habrá sufrido una desintegración significativa en ese intervalo.

II-10. Los detectores de trazas grabadas tienen muchas ventajas, pero al utilizarlos es necesario prestar gran atención a la garantía de la calidad. Esto se debe a que la respuesta del plástico al daño causado por la partícula alfa puede variar de un lote de plástico a otro y es también muy sensible a las condiciones del grabado por ataque químico [II-31]. Por estos motivos, los laboratorios que crean nuevas instalaciones de producción y procesamiento de detectores de trazas grabadas suelen tener dificultades para alcanzar un alto nivel de exactitud. Esas dificultades se pueden reducir al mínimo si se adquiere un servicio completo de suministro y procesamiento de detectores de trazas grabadas de un laboratorio validado o acreditado. Esta opción será también probablemente menos cara que la creación de un laboratorio de detectores de trazas grabadas en el caso de todos los programas de medición del ^{222}Rn , salvo los más grandes. Quienes adquieran esos detectores o sistemas de servicio completo deberán cerciorarse de que los detectores hayan obtenido buenos resultados en las intercomparaciones internacionales de detectores pasivos de ^{222}Rn y de que cumplan las normas establecidas por la autoridad nacional para las mediciones del ^{222}Rn [II-22].

DETECTORES DE CARBÓN ACTIVADO

II-11. Los detectores de carbón activado se denominan a veces, más formalmente, dispositivos de adsorción en carbón activado. Consisten en un pequeño recipiente con carbón activado que adsorbe el ^{222}Rn presente en el aire; el carbón está cubierto por una pantalla y generalmente por una barrera de difusión. Después del uso, el detector se sella y se devuelve al laboratorio para su análisis con un detector de centelleo. El método de análisis normal consiste en medir las emisiones de radiación gamma producidas por la progenie de período de semidesintegración breve del ^{222}Rn [II-6].

II-12. El radón 222 tiene un período de semidesintegración de 3,82 días, y el que es adsorbido por el carbón al comienzo de su uso decae, en una semana aproximadamente, a niveles en que, para los valores comunes de radón en los espacios interiores, resulta difícil determinar la concentración de la actividad

con la exactitud requerida. Además, el ^{222}Rn que el carbón adsorbe puede desprenderse nuevamente. Luetzelschwab *et al.* [II-32] investigaron la respuesta de los dosímetros de carbón y comunicaron que los detectores sin barrera difusora dependían en sumo grado de los niveles de temperatura y de humedad y no debían utilizarse por más de dos días. La respuesta era mejor si se empleaba una barrera de difusión. La duración de la medición se limita a menos de una semana. Una de las primeras descripciones del principio de la detección del ^{222}Rn por adsorción en carbón se encuentra en Hursh [II-33].

II-13. Los detectores de carbón no son adecuados para mediciones a largo plazo, pero pueden utilizarse para un cribado, por ejemplo con el fin de obtener una indicación de la eficacia de las medidas preventivas y correctivas o de si un edificio tiene un problema importante con el ^{222}Rn . Para estimar mejor la exposición a largo plazo debida al ^{222}Rn , debe efectuarse una medición de confirmación a largo plazo.

CÁMARAS DE IONIZACIÓN ELÉCTRET

II-14. Una cámara de ionización eléctret contiene un disco eléctret de politetrafluoroetileno (PTFE) que se ha cargado positivamente, hasta un potencial que suele ser del orden de 700 V [II-34]. El eléctret mantiene esta carga electrostática, que se neutraliza gradualmente a medida que las partículas alfa emitidas por el ^{222}Rn y su progenie ionizan el aire de la cámara. La medición de la carga del eléctret al comienzo y al final del período permite calcular la concentración del ^{222}Rn . Al hacer este cálculo, debe tenerse en cuenta la ionización causada por la radiación natural de fondo, ya que la tasa de dosis ambiente debida a la radiación gamma en la posición de medición del detector contribuye a una determinada caída del voltaje del eléctret. Además, la respuesta no es lineal en términos de voltaje, y debe efectuarse una cuidadosa calibración. Existen diferentes tipos de eléctrets y distintos tamaños de cámara, que son adecuados para períodos comprendidos entre algunos días y varios meses [II-6].

II-15. Las cámaras de ionización eléctret deben manipularse con cuidado, ya que si se caen o si se toca la superficie sensible del eléctret puede producirse una descarga total o parcial, lo que daría una sobreestimación de la concentración de ^{222}Rn . Estas cámaras son también sensibles a las condiciones ambientales, como la presión atmosférica o un elevado nivel de humedad del aire que conduzca a la condensación de agua en las superficies internas. En principio, no son demasiado grandes para ser enviadas por correo postal, pero su sensibilidad, especialmente a los golpes mecánicos, reduciría su valor práctico. Los eléctrets se utilizan

habitualmente para las mediciones de cribado y de diagnóstico. Por lo general no se emplean en estudios en gran escala.

MONITORES CONTINUOS DE RADÓN

II-16. Existen diversos tipos de monitores electrónicos continuos de radón, que utilizan principios de detección espectrométricos o no espectrométricos. Toman muestras continuas del aire y miden ya sea el radón o los productos de su desintegración utilizando un muestreo activo o el transporte difusivo del aire cargado de radón hacia el volumen sensible de los detectores. Los métodos de ensayo que utilizan monitores de estos tipos se describen en una norma internacional [II-7]. En el caso de un monitor de gas radón, se emplea un filtro para eliminar la progenie del radón y el polvo del aire muestreado. El filtro podría utilizarse también para la medición casi continua de la progenie del radón. La medición se repite en períodos sucesivos, lo que permite determinar la variación de la concentración de radón en el tiempo.

II-17. Si se requieren mediciones muy exactas, particularmente de concentraciones muy bajas de radón, es probable que el instrumento de elección sea una cámara de ionización pulsatoria [II-35]. Este equipo es caro y complejo, y en general no es práctico para un uso a gran escala. Sin embargo, puede resultar inestimable para un estudio detallado de los factores que afectan a las concentraciones de radón en un edificio particular. Los sistemas de medición que utilizan el muestreo activo son caros en términos de tiempo de personal y análisis de datos, y por esta razón solo se emplean en aplicaciones de diagnóstico o de investigación.

MEDICIONES RETROSPECTIVAS DEL ^{222}Rn

II-18. La técnica de la medición retrospectiva del ^{222}Rn es un método pasivo que utiliza detectores de trazas alfa para estimar la actividad superficial del ^{210}Po , un producto de la desintegración del ^{222}Rn , depositado en objetos de vidrio adecuados en una habitación [II-36]. Para ello se emplean por lo general dos tipos de detectores de trazas alfa: uno de PADC, denominado comúnmente CR-39, y otro de nitrato de celulosa, que se vende con el nombre comercial LR-115. El detector LR-115 es sensible a las partículas alfa en el rango de 1,2 MeV a 4,8 MeV y no registrará las partículas alfa de 5,3 MeV emitidas por el ^{210}Po implantado en el vidrio; en cambio, producirá trazas en proporción a la actividad alfa intrínseca del propio vidrio. El detector CR-39 detecta las trazas

debidas tanto a la actividad superficial del ^{210}Po implantado en el vidrio como a la actividad intrínseca del propio vidrio. La diferencia entre las densidades de trazas de los dos detectores permite estimar el ^{210}Po implantado en el vidrio tras la deposición sobre su superficie y el decaimiento del primer producto de desintegración, el ^{218}Po (en su mayor parte, en forma nanométrica). De este modo, es posible estimar el decaimiento del ^{222}Rn en la habitación durante el tiempo de vida del vidrio.

II-19. A partir de la actividad superficial medida del ^{210}Po implantado en el vidrio, puede estimarse la edad del vidrio, junto con información sobre algunos parámetros ambientales (por ejemplo, las concentraciones medias de aerosoles y la tasa de ventilación) y la concentración media de ^{222}Rn a que ha estado expuesto el vidrio, utilizando los modelos disponibles.

II-20. Los objetos de vidrio adecuados son aquellos que se han trasladado de casa en casa junto con los ocupantes y, por lo tanto, pueden revelar el historial de la exposición debida al ^{222}Rn . Casi siempre son fotografías familiares que pueden datarse con exactitud.

II-21. Otro método para evaluar retrospectivamente la exposición debida al ^{222}Rn consiste en determinar el daño causado por las partículas alfa incidentes en los discos compactos [II-37, II-38].

TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL ^{220}Rn

II-22. Debido al breve período de semidesintegración del ^{220}Rn (55,6 s), el equilibrio entre el ^{220}Rn y los nucleidos producidos por su decaimiento puede ser sumamente variable. Es más útil para la protección radiológica, y puede ser más cómodo, fácil y apropiado, medir las concentraciones de la progenie del ^{220}Rn en lugar de las del gas ^{220}Rn . En el caso de este radionucleido, puede haber un marcado desequilibrio entre el gas y su progenie presentes en las viviendas y en otros ambientes interiores y exteriores. En los edificios normales, las concentraciones de ^{220}Rn solo tendrán probabilidades de ser importantes si hay concentraciones elevadas de su radionucleido padre en los materiales de construcción que están en contacto con el aire interior. En general, el breve período de semidesintegración del ^{220}Rn impide su transporte o difusión desde el suelo, pasando por los cimientos de mampostería, a los espacios interiores. Además, a menudo hay una diferencia considerable entre la distribución espacial del gas y la de su progenie en el aire de los espacios interiores. Esto se debe principalmente al breve período de semidesintegración del ^{220}Rn , en comparación

con el de algunos de los productos de su decaimiento. Esta diferencia en la distribución espacial hace que sea más difícil evaluar el equilibrio del ^{220}Rn que el del ^{222}Rn .

II-23. Hay varias técnicas disponibles para medir el ^{220}Rn y su progenie. Estas técnicas se basan principalmente en la detección de las partículas alfa emitidas en la cadena de decaimiento y, en menor medida, en las energías gamma. Los detectores alfa que se utilizan comprenden los detectores de centelleo de ZnS(Ag) , los detectores de barrera superficial, las cámaras de ionización, los electrets y los detectores de trazas nucleares de estado sólido.

II-24. Para el gas ^{220}Rn , se ha desarrollado una técnica que utiliza un detector pasivo de trazas alfa que mide tanto el ^{222}Rn como el ^{220}Rn [II-39, II-40]. En esta técnica, se emplea un detector dual discriminante de trazas alfa que aprovecha las propiedades de difusión del ^{222}Rn y el ^{220}Rn . Uno de los detectores se coloca en una cámara con una alta tasa de intercambio de aire, que genera una baja barrera de difusión para el ^{220}Rn y el ^{222}Rn . El otro detector, construido de modo que tenga una reducida tasa de intercambio de aire, constituye una alta barrera de difusión para el ^{220}Rn , pero no para el ^{222}Rn . A partir de las trazas alfa registradas en los dos detectores, y utilizando factores de calibración determinados con ayuda de cámaras de calibración normalizadas, pueden medirse las concentraciones tanto del ^{220}Rn como del ^{222}Rn .

II-25. La técnica basada en la cámara de iones electret, que se utiliza generalmente para medir el ^{222}Rn , ha sido modificada para que mida el ^{220}Rn [II-34].

II-26. Para medir el ^{220}Rn se emplean también técnicas activas, como las que utilizan cámaras de centelleo de Lucas y cámaras de ionización. Aprovechando los diferentes períodos de semidesintegración en las cadenas de decaimiento del ^{222}Rn y el ^{220}Rn , se han desarrollado técnicas que utilizan las diferencias de tiempo entre los pulsos de estas series en los detectores para distinguir los radioisótopos y medir sus actividades separadamente [II-41, II-42]. Estas técnicas se basan en un análisis de las señales alfa en el detector con respecto a los tiempos de muestreo y conteo transcurridos. Los radionucleidos ^{220}Rn y los radionucleidos ^{216}Po de su progenie inmediata están básicamente en equilibrio secular debido al brevísimo período de semidesintegración del ^{216}Po (0,15 s). Las señales alfa de estos nucleidos pueden, por lo tanto, ser registradas electrónicamente por un detector como coincidencias diferidas con ayuda de algoritmos informáticos para analizar los pulsos y estimar las concentraciones del gas ^{220}Rn . Esto es útil también cuando están presentes otros emisores alfa de la progenie del ^{222}Rn o el

^{220}Rn . Algunos tipos de instrumento combinan la captación electrostática de los nucleidos descendientes del ^{220}Rn en un detector de barrera superficial con la espectrometría alfa para determinar la concentración del gas ^{220}Rn [II-43]. En estos instrumentos, se utiliza la energía alfa del ^{216}Po (6,78 MeV) para estimar la concentración del ^{220}Rn .

II-27. La concentración de la progenie del ^{220}Rn en el aire puede determinarse fácilmente mediante la toma de muestras de aire con una bomba de aspiración y el análisis de la actividad alfa utilizando las secuencias de tiempo de conteo diferido [II-43, II-44]. El análisis alfa puede efectuarse ya sea por conteo bruto o por espectrometría alfa. La concentración del gas ^{220}Rn puede determinarse también utilizando una técnica de doble filtro [II-45]. En esta técnica, el aire se hace pasar por un tubo metálico de una longitud determinada que tiene un mínimo efecto de deposición de los nucleidos de la progenie del ^{220}Rn en la superficie. En la entrada y la salida del tubo se colocan sendos papeles filtro. El primer filtro impide que los productos de la desintegración penetren en el tubo. El gas decae mientras transita a lo largo del tubo y su progenie queda recogida en el segundo filtro. Este se analiza para establecer la actividad alfa en equilibrio transitorio y de ese modo se determina la concentración del gas ^{220}Rn . Para el muestreo dentro de las viviendas, esta técnica puede requerir tubos de gran volumen, que puede ser incómodo transportar de un lugar a otro.

II-28. Los métodos activos no proporcionan datos a largo plazo, porque la duración del muestreo suele ser breve. Por consiguiente, el uso de métodos activos para realizar estudios nacionales a gran escala con fines epidemiológicos tiene sus limitaciones. A veces, es preferible utilizar para este propósito técnicas de detección pasiva integrada con respecto al tiempo. Los avances recientes indican que los monitores pasivos que registran las emisiones alfa del ^{212}Po (a 8,78 MeV, la energía más alta entre los nucleidos descendientes del ^{222}Rn y el ^{220}Rn) en detectores de trazas nucleares de estado sólido permiten hacer mediciones directas para determinar la exposición debida a la progenie del ^{220}Rn [II-46, II-47]. El uso de una película plástica aluminizada y de una película protectora de polipropileno de un espesor total de 71 μm en esta técnica permite restringir la penetración a las partículas alfa de 8,78 MeV y registrar las trazas. Una novedad reciente es una técnica que se basa en la deposición de la progenie del ^{220}Rn en películas de trazas grabadas y en las correlaciones correspondientes con las mediciones activas de integración con respecto al tiempo (por monitores de deposición) para estimar la concentración equivalente de equilibrio del ^{220}Rn .

II-29. El método de ensayo de la Sociedad Americana de Ensayos de Materiales es un método relativamente sencillo para determinar la concentración de los

productos de la desintegración del radón sin necesidad de equipo especializado construido expresamente para ese propósito [II-48].

MEDICIONES PARA EL DIAGNÓSTICO DEL RADÓN

II-30. El diagnóstico del radón es un complejo conjunto de distintos métodos de medición relacionados y no relacionados con el radón que se aplican para determinar los orígenes de este elemento y efectuar un análisis cualitativo y cuantitativo de sus vías de transporte [II-49, II-50]. Los diferentes principios y técnicas de medición descritos en este anexo pueden servir de base para un diagnóstico del radón centrado en la evaluación de su presencia en los espacios interiores y en el gas del suelo.

REFERENCIAS DEL ANEXO II

- [II-1] VANMARCKE, H., BERKEVENS, P., POFFIJN, A., Radon versus radon daughters, *Health Phys.* **56** (1989) 229–231.
- [II-2] UNITED NATIONS, Effects of Ionizing Radiation (2006 Report to the General Assembly), Annex E: Sources-to-Effects Assessment for Radon in Homes and Workplaces, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2009).
- [II-3] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 1: Orígenes del radón y sus productos de desintegración de vida corta y métodos de medición asociado*, Norma ISO 11665-1:2012, UNE-EN ISO 11665-1:2016, España (2016).
- [II-4] MILES, J.C.H., Temporal variation of radon levels in houses and implications for radon measurement strategies, *Radiat. Prot. Dosim.* **93** (2001) 369–375.
- [II-5] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 6: Método de medición puntual para la concentración de actividad*, Norma ISO 11665-6:2012, UNE-EN ISO 11665-6:2016, AENOR, España (2016).
- [II-6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Air: Radon-222 — Part 4: Integrated Measurement Method for Determining Average Activity Concentration using Passive Sampling and Delayed Analysis, ISO Standard 11665-4:2012, ISO, Geneva (2012).
- [II-7] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 5: Método de medición en continuo para la concentración de actividad*, Norma ISO 11665-5:2012, UNE-EN ISO 11665-5:2016, AENOR, España (2016).

- [II-8] STECK, D.J., Annual average indoor radon variations over two decades, *Health Phys.* **96** (2009) 37–47.
- [II-9] ARVELA, M., VOUTILAINEN, I., CASTREN, O., WINQVIST, K., Comparison of predicted and measured variations of radon indoor concentrations, *Radiat. Prot. Dosim.* **24** (1988) 231–235.
- [II-10] WRIXON, A.D., GREEN, B.M.R., LOMAS, P.R., et al., Natural Radiation Exposure in UK Dwellings, NRPB-R190, National Radiological Protection Board, Chilton (1988).
- [II-11] MAJBORN, B., Seasonal variations of radon concentrations in single-family houses with different sub-structures, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 443–447.
- [II-12] PINEL, J., FEARN, T., DARBY, S.C., MILES, J.C.H., Seasonal correction factors for indoor radon measurements in the United Kingdom, *Radiat. Prot. Dosim.* **58** (1995) 127–132.
- [II-13] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 2: Método de medición integrada para determinar la concentración promedio de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta*, Norma ISO 11665-2:2012, UNE-EN ISO 11665-2:2016, AENOR, España (2016).
- [II-14] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 3: Método de medición puntual de la concentración de energía potencial alfa de sus productos de desintegración de vida corta*, Norma ISO 11665-3:2012, UNE-EN ISO 11665-3:2016, AENOR, España (2016).
- [II-15] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN, *Medición de la radiactividad en el ambiente. Aire: radón-222. Parte 7: Método de acumulación para estimar la tasa de exhalación en superficie*, Norma ISO 11665-7:2012, UNE-EN ISO 11665-7:2016, AENOR, España (2016).
- [II-16] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, Measurement of Radioactivity in the Environment — Air: Radon-222 — Part 8: Methodologies for Initial and Additional Investigations in Buildings, ISO Standard 11665-8:2012, ISO, Geneva (2012).
- [II-17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Radiation Protection Instrumentation – Radon and Radon Decay Product Measuring Instruments – Part 1: General Principles, IEC Standard 61577-1, IEC, Geneva (2006).
- [II-18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL ORGANIZATION, Radiation Protection Instrumentation – Radon and Radon Decay Product Measuring Instruments – Part 2: Specific Requirements for Radon Measuring Instruments, IEC Standard 61577-2, IEC, Geneva (2014).
- [II-19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Radiation Protection Instrumentation – Radon and Radon Decay Product Measuring Instruments – Part 3: Specific Requirements for Radon Decay Product Measuring Instruments, IEC Standard 61577-3, IEC, Geneva (2011).
- [II-20] CALMET, D., et al., International standardisation work on the measurement of radon in air and water, *Radiat. Prot. Dosim.* **145** (2011) 267–272.

- [II-21] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Protocols for Radon and Radon Decay Product Measurements in Homes (1993), https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/homes_protocols.pdf.
- [II-22] HOWARTH, C.B., MILES, J.C.H., Validation Scheme for Organizations Making Measurements of Radon in Dwellings: 2008 Revision, HPA-RPD-047, HPA, Chilton (2008).
- [II-23] AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Recueil des dispositions législatives et réglementaires relatives à la radioprotection, Partie 1: Extraits du Code de la santé publique et du code du travail concernant la protection de la population, des patients et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, ASN, Montrouge, France (2013).
- [II-24] AUTORITÉ DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Recueil des dispositions législatives et réglementaires relatives à la radioprotection, Partie 2 : Arrêtés et décisions pris en application du code de la santé publique et du code du travail concernant la protection de la population, des patients et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants, ASN, Montrouge, France (2012).
- [II-25] IBRAHIMI, Z.-F., MILES, J.C.H., An etched track detector for short-term screening measurements of radon, *J. Radiol. Prot.* **29** (2009) 139–146.
- [II-26] YU, K.N., YOUNG, E.C.M., LI, K.C., A study of factors affecting indoor radon properties, *Health Phys.* **71** (1996) 179–184.
- [II-27] GEORGE, A.C., State of the art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings — A review, *Health Phys.* **70** (1996) 451–463.
- [II-28] GEIGER, E.L., Radon film badge, *Health Phys.* **13** (1967) 407–411.
- [II-29] DURRANI, S.A., ILIĆ, R., Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment, World Scientific Publishing, Singapore (1997).
- [II-30] TOKONAMI, S., Why is ^{220}Rn (thoron) measurement important? *Radiat. Prot. Dosim.* **141** (2010) 335–339.
- [II-31] MILES, J.C.H., KENDALL, G.M., IBRAHIMI, F., HOWARTH, C.B., Practical considerations for radon etched track dosimetry service, *J. Radiol. Prot.* **24** (2004) 165–171.
- [II-32] LUETZELSCHWAB, J.W., HASTINGS, L., ELLIS, S.M., Adsorption of Rn-222 by open-faced and diffusion barrier canisters at different conditions of temperature and humidity, *Health Phys.* **66** (1994) 63–71.
- [II-33] HURSH, J.B., The measurement of breath radon by charcoal absorption, *Nucleonics* **12** 1 (1954) 63–65.
- [II-34] KOTRAPPA, P., E-PERM System Manual — Part II 11 — Modified E-PERM for Passive Measurements of Thoron in Air, Rad. Elec. Inc., Frederick, MD (1996).
- [II-35] ISHIKAWA, T., Effects of thoron on a radon detector of pulse-ionization chamber type, *Radiat. Prot. Dosim.* **108** (2004) 327–330.
- [II-36] McLAUGHLIN, J.P., The application of techniques to assess radon exposure retrospectively, *Radiat. Prot. Dosim.* **78** (1998) 1–6.

- [II-37] PRESSYANOV, D.S., BUYASSE, J., POFFIJN, A., MEESEN, G., VAN DEYNSE, A., The compact disk as radon detector — a laboratory study of the method, *Health Phys.* **84** 5 (2003) 642–651.
- [II-38] PRESSYANOV, D.S., Modeling a ^{222}Rn measurement technique based on absorption in polycarbonates and track-etch counting, *Health Phys.* **97** (2009) 604–612.
- [II-39] DOI, M., KOBAYASHI, S., FUJIMOTO, K., A passive measurement technique for characterisation of high-risk houses in Japan due to enhanced levels of indoor radon and thoron concentrations, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 425–430.
- [II-40] TOKONOMI, S., TAKAHASHI, H., KOBAYASHI, Y., ZHOU, W., HULBER, E., Up-to-date radon-thoron discriminative detector for large scale surveys, *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 113505–113509.
- [II-41] FALK, R., MORE, H., NYBLOM, L., Measurements of ^{220}Rn in air using a flow-through Lucas cell and multiple time analysis of recorded pulse events, *Radiat. Prot. Dosim.* **45** (1992) 111–113.
- [II-42] IIMOTO, T., KUROSAWA, R., A pulse coincidence ^{220}Rn monitor with three time-gates, *Environ. Int.* **22** Suppl. 1 (1996) S1139–S1145.
- [II-43] McLAUGHLIN, J., An overview of thoron and its progeny in the indoor environment, *Radiat. Prot. Dosim.* **141** (2010) 316–321.
- [II-44] HARIDASAN, P.P., PILLAI, P.M.B., TRIPATHI, R.M., PURANIK, V.D., Occupational radiation exposure due to NORM in a rare-earth compounds production facility, *Radiat. Prot. Dosim.* **131** (2008) 217–221.
- [II-45] KOTRAPPA, P., et al., “Modified double-filter system for measuring radon/thoron in the environment and in exhaled breath”, *Advances in Radiation Protection Monitoring (Proc. Symp. Stockholm, 1978)*, IAEA, Vienna (1979) 423.
- [II-46] ZHOU, W., IIDA, T., Estimation of thoron progeny concentrations in dwellings with their deposition rate measurements, *Jpn. J. Health Phys.* **35** (2000) 365–370.
- [II-47] MISHRA, R., MAYYA, Y.S., Study of deposition-based direct thoron progeny sensor (DTPS) technique for estimating equilibrium equivalent thoron concentration (EETC) in indoor environment, *Radiat. Meas.* **43** (2008) 1408–1416.
- [II-48] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Standard Test Method for Determination of Radon Decay Product Concentration and Working Level in Indoor Atmospheres by Active Sampling on a Filter, ASTM D6327 - 10, West Conshohocken, PA (2010).
- [II-49] FROŇKA, A., MOUČKA, L., ČECHÁK, T., Application of the advanced radon diagnosis methods in the indoor building environment, *Radiat. Prot. Dosim.* **130** (2008) 172–175.
- [II-50] FROŇKA, A., Indoor and soil gas radon simultaneous measurements for the purpose of detailed analysis of radon entry pathways into houses, *Radiat. Prot. Dosim.* **145** (2011) 117–122.

Anexo III

MEDIDAS PREVENTIVAS PARA REDUCIR LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn EN VIVIENDAS Y OTROS EDIFICIOS NUEVOS

III-1. En un creciente número de Estados, se están empezando a aplicar medidas en los edificios nuevos para prevenir la acumulación del ^{222}Rn . En general, es más barato y más fácil incorporar medidas preventivas contra el radón cuando se construye un edificio nuevo que adoptar medidas correctivas en una vivienda ya existente. Esas medidas preventivas en los nuevos edificios reducirán gradualmente las concentraciones medias de ^{222}Rn en el parque de viviendas, lo que ayudará a reducir los efectos en la salud pública de la exposición a largo plazo de la población debida al ^{222}Rn presente en los espacios interiores. Además, estas medidas pueden mejorar otros aspectos de la calidad del aire de interiores. Las medidas preventivas para reducir el radón se han elaborado para las regiones del mundo que tienen cuatro estaciones climáticamente distintas, y puede ser necesario verificar que su aplicación sea adecuada en otras partes del mundo.

III-2. La inclusión de una membrana impermeable continua en toda la superficie del piso de la vivienda para aislar el edificio del suelo es una medida preventiva eficaz contra el radón en los nuevos edificios. La efectividad de la membrana antiradón depende mucho del cuidado con que se instale. De ser posible, conviene que la inspección de la membrana forme parte de los controles que se realizan habitualmente durante la construcción de un edificio. La integridad y durabilidad de la membrana antiradón son generalmente más importantes que sus propiedades de barrera contra la difusión del radón. El coeficiente de difusión del radón es un parámetro adecuado para seleccionar las barreras eficaces contra el radón de entre los materiales impermeables disponibles en el mercado de la construcción [III-1]. Los valores del coeficiente de difusión del radón de los materiales impermeables comunes pueden encontrarse en la referencia [III-2]. La medición del coeficiente de difusión del radón se puede emplear también para poner a prueba la hermeticidad de las uniones entre las membranas prefabricadas.

III-3. Además de colocar una membrana, pueden adoptarse disposiciones para la ventilación o despresurización del suelo (bajo la losa), o para la ventilación y/o la despresurización del espacio vacío bajo el piso. El objetivo de estos sistemas es diluir las concentraciones de radón bajo la membrana y reducir la presión del aire en el suelo o en el espacio bajo el piso, en comparación con la presión en los espacios interiores. Ambos sistemas pueden funcionar de manera

pasiva o activa. La necesidad de un extractor depende de la permeabilidad del suelo, la geometría de los cimientos, la altura del espacio vacío bajo el piso y los medios de ventilación existentes (es decir, la presencia o ausencia de un conducto de escape vertical). Los sistemas pasivos pueden activarse instalando un extractor [III-3]. Esto puede hacerse en un segundo momento, si la medición de las concentraciones de radón una vez que el edificio está ocupado indica que la ventilación pasiva no es eficaz. Las publicaciones de diversas autoridades nacionales [III-4 a III-11] ofrecen asesoramiento práctico detallado sobre las medidas preventivas contra el ^{222}Rn .

III-4. Las medidas preventivas contra el ^{222}Rn en los edificios nuevos se aplican en general por conducto de los códigos de construcción nacionales. En el cuadro III-1, que se basa en la referencia [III-12], figuran ejemplos de esos códigos. Una propiedad particularmente importante de las medidas preventivas contra el ^{222}Rn es que en general reducen también las concentraciones de otros contaminantes que, de lo contrario, entrarían en la vivienda junto con el gas del suelo. Esta es una ventaja nada indiferente, pero que puede ser difícil de cuantificar de manera formal.

III-5. En algunos Estados, las mediciones de las concentraciones del ^{222}Rn en el gas del suelo y las evaluaciones de la permeabilidad del suelo en los sitios en que se va a edificar se efectúa antes del inicio de la construcción, para obtener una orientación sobre el alcance de las medidas preventivas contra el ^{222}Rn que habrá que incluir en las viviendas [III-13]. Según las condiciones existentes, estas mediciones pueden ayudar a mejorar la eficiencia del diseño de las medidas preventivas contra el ^{222}Rn . Las prácticas utilizadas para construir casas eficientes desde el punto de vista energético pueden afectar a las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores de manera positiva o negativa. El hecho de que los nuevos edificios tengan que cumplir con las normas nacionales de hermeticidad tiende a traducirse en una menor tasa de intercambio de aire que la de los edificios ya existentes. Al mejorar la eficiencia térmica de un edificio, la temperatura más alta del aire en los espacios interiores puede dar lugar a una reducción de la presión en esos espacios y, de esa manera, a un mayor flujo de ^{222}Rn desde el suelo hacia el interior del edificio. En algunos Estados se han modificado los códigos de construcción pertinentes para evitar las concentraciones altas de ^{222}Rn en los espacios interiores en los edificios energéticamente eficientes.

CUADRO III-1. LEGISLACIÓN DE DIFERENTES ESTADOS SOBRE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA EL ^{222}Rn EN LOS EDIFICIOS NUEVOS

(Basado en el trabajo de Lund [III-12] y actualizado)

Estado	Órgano regulador o autoridad nacional	Nº de referencia del código, ley o reglamento	Fecha
Alemania	Ministerio del Interior de Sajonia	Reglamento de Construcción de Sajonia	1997
	Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear, Ministerios de Medio Ambiente de los estados federales alemanes	Ordenanza sobre Protección Radiológica	2001
Canadá	Canadian Commission on Building and Fire Codes	Código Nacional de Construcción del Canadá de 1995 (revisado en 1998)	1998
Dinamarca	Ministerio de Vivienda	Norma de Construcción para Viviendas Pequeñas	1998
Eslovenia	Ministerio de Medio Ambiente y Planificación Espacial	Normas sobre la ventilación y el aire acondicionado en los edificios (Boletín Oficial Nº 42/2002)	2002
Finlandia	Building Information Ltd, en cooperación con el Ministerio de Medio Ambiente	Archivo RT de información sobre la construcción — Prevención del radón en los edificios nuevos RF-81-10791	2003
	Ministerio de Medio Ambiente	Código de Construcción B3 Cimientos, y D2 — Climatización Interior y Ventilación en los Edificios	2003
Irlanda	Departamento de Medio Ambiente	Reglamento Nacional de Construcción, y documentos de orientación técnica conexos	1997
	NSAI/Irish Agreement Board	Certificación de la evaluación y aprobación técnicas de las membranas contra el radón, SI Nº 497	1997
Polonia	Organismo Polaco de Energía Atómica	Ya no está en vigor	Hasta 2002

CUADRO III-1. LEGISLACIÓN DE DIFERENTES ESTADOS SOBRE LAS MEDIDAS PREVENTIVAS CONTRA EL ^{222}Rn EN LOS EDIFICIOS NUEVOS (cont.)

(Basado en el trabajo de Lund [III-12] y actualizado)

Estado	Órgano regulador o autoridad nacional	Nº de referencia del código, ley o reglamento	Fecha
Reino Unido	Gabinete del Viceprimer Ministro, División de Reglamentos de la Construcción	Reglamento de Construcción de Inglaterra y Gales	1999
	Departamento de Medio Ambiente de Irlanda del Norte	Reglamento de Construcción de Irlanda del Norte	2001
	Ejecutivo escocés	Reglamento de Construcción de Escocia	1999
República Checa	Oficina Estatal de Seguridad Nuclear	Ley Atómica Nº 18/1997, en su forma enmendada Reglamento Nº 307/2002, en su forma enmendada	1997 2002
	Oficina Checa de Normas, Metrología y Ensayos	Norma Checa de Construcción CSN 730601	2006
Suecia	Junta Nacional de Construcción y Planificación de Viviendas	Reglamento de Construcción BFS 2014:3 BBR 21	2014
		Ley de Planificación y Construcción	1987
Suiza	Oficina Federal de Salud Pública de Suiza	Ley de Protección Radiológica (SR 814.50)	1991
		Ordenanza de Protección Radiológica (SR 814.501)	1994
	Asociación Suiza de Ingenieros y Arquitectos (SIA)	Norma SIA 180 — Aislamiento térmico y protección contra la humedad en la construcción de edificios	1999

REFERENCIAS DEL ANEXO III

- [III-1] JIRÁNEK, M., ROVENSKA, K., Basic principles for the development of a common standardised method for determining the radon diffusion coefficient in waterproofing materials, *Appl. Radiat. Isot.* **70** (2012) 752–757.
- [III-2] JIRÁNEK, M., KOTRBATÁ, M., Radon diffusion coefficients in 360 waterproof materials of different chemical composition, *Radiat. Prot. Dosim.* **145** 1 (2012) 178–183.
- [III-3] ARVELA, H., HOLMGREN, O., REISBACKA, H., Radon prevention in new construction in Finland: a nationwide sample survey in 2009, *Radiat. Prot. sim.* **148** 4 (2012) 465–474.
- [III-4] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, Radon: Guidance on Protective Measures for New Buildings, Report No. BR 211, BRE, Garston (2007).
- [III-5] BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU), BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS), Das Radon-Handbuch Deutschland, BMU, Bonn (2001).
- [III-6] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Build Radon Out: a Step by Step Guide on How to Build Radon Resistant Homes (2001), https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/homes_protocols.pdf.
- [III-7] DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT AND LOCAL GOVERNMENT, Radon in Existing Buildings: Corrective Options, Dublin (2002), <http://www.environ.ie/en/DevelopmentHousing/BuildingStandards/PublicationsDocuments/FileDownload,1656,en.pdf>.
- [III-8] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, How to reduce radon levels in your home, UK BRE, Garston, Watford (2000), <http://www.bre.co.uk/radon/reduce.html>.
- [III-9] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Houses against Radon from the Soil, CSN 730601, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, Prague (2006).
- [III-10] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, Recommandations de l'OFSP pour les bâtiments neufs (2012), http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11592/index.?lang=en&download=NHZLpZeg7t,lnp610NTU042I2Z6ln1ad1IZn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCEfX5_f2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--.
- [III-11] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon: Precautions for New Buildings (2011), <http://www.alexandria.admin.ch/bv001486709.pdf>.
- [III-12] LUND, C.E., Protecting new buildings, Deliverable D7 of the ERRICCA Project, European Commission, Luxembourg (2004).

[III-13] NEZNAL, M., NEZNAL, M., MAOTLIN, M., BARNET, I., MIKSOVA, J., The New Method for Assessing the Radon Risk of Building Sites, Czech Geological Survey Special Papers 16, Czech Geological Survey, Prague (2004).

Anexo IV

MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn EN VIVIENDAS Y OTROS EDIFICIOS YA EXISTENTES

MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LAS CONCENTRACIONES DE ^{222}Rn

IV-1. Está demostrado que es factible reducir las concentraciones altas de ^{222}Rn en las viviendas ya existentes mediante medidas correctivas. Estas medidas tienen por objeto ya sea impedir que el ^{222}Rn del suelo entre en el edificio o eliminar el ^{222}Rn del edificio mediante una mejor ventilación de los espacios interiores. La eficacia de toda medida correctiva depende de la construcción de la vivienda y del clima, así como del estilo de vida de los ocupantes. Las medidas correctivas se han desarrollado para las regiones del mundo que tienen cuatro estaciones climáticamente distintas, y puede ser necesario verificar que su aplicación sea adecuada en otras partes del mundo.

IV-2. Las medidas correctivas se describen como activas o pasivas. Las medidas correctivas pasivas no requieren ninguna forma de asistencia mecánica, mientras que las activas necesitan asistencia mecánica para funcionar de manera óptima. Son ejemplos de medidas correctivas pasivas las barreras impermeables al ^{222}Rn y los orificios de ventilación en las paredes y las ventanas. Las medidas activas contra el ^{222}Rn incluyen, por ejemplo, la despresurización del espacio bajo el piso con ayuda de un ventilador y la ventilación mecánica de los espacios interiores del edificio. Los principales inconvenientes de las medidas activas son los costos y la necesidad de un control periódico de su buen funcionamiento y de un mantenimiento a largo plazo. Las medidas pasivas son, por lo general, menos caras pero también menos eficaces que las activas, y pueden ser parcial o totalmente ineficaces.

IV-3. La aplicación práctica y la eficacia de esas medidas correctivas se describen en los párrafos siguientes. El uso de estas medidas debe guiarse por información técnica más detallada, que puede encontrarse en otras publicaciones [IV-1 a IV-4]. Varias autoridades nacionales han elaborado asesoramiento sobre las medidas correctivas para el ^{222}Rn [IV-5], y se ha publicado un examen importante de este y otros asuntos relacionados con el ^{222}Rn en Europa [IV-6]. Las medidas correctivas pueden variar de un Estado a otro, y algunos Estados

pueden tener que desarrollar sus propias medidas correctivas que tengan en cuenta las prácticas de construcción nacionales.

IV-4. En algunos casos, pueden realizarse pruebas para determinar las medidas correctivas más apropiadas [IV-3]. Debe aplicarse el principio de la optimización, de modo que un determinado esfuerzo conduzca a una disminución considerable de las concentraciones de ^{222}Rn , y no solo a su reducción apenas por debajo del nivel de referencia. En la referencia [IV-7] figura un ejemplo de un análisis de la relación costo-eficacia y la relación costo-beneficio aplicado a las medidas correctivas.

IV-5. Tras la aplicación de medidas correctivas, deben medirse las concentraciones de ^{222}Rn para verificar que se hayan reducido suficientemente.

IV-6. En algunos casos, el origen del ^{222}Rn en los espacios interiores pueden ser los materiales de construcción y no el suelo bajo el edificio [IV-8]. En estas circunstancias, puede ser necesario estudiar la posibilidad de restringir el uso de ciertos materiales de construcción. Si los materiales de construcción son la principal fuente de radón en los edificios ya existentes, las concentraciones de radón en los espacios interiores pueden reducirse eliminando los materiales que tengan una tasa elevada de emanación de radón, creando un espacio de aire ventilado alrededor de los materiales con esas características, o aumentando la ventilación de los espacios interiores [IV-9]. La aplicación de revestimientos impermeables sobre la superficie de los materiales de construcción debe evitarse, porque su eficacia es muy baja en el caso del ^{222}Rn . Sin embargo, los revestimientos superficiales pueden ser eficaces para reducir la emanación de ^{220}Rn (véase el párr. 3.67).

IV-7. Las prácticas de construcción utilizadas en la retroadaptación de edificios para mejorar su eficiencia energética pueden afectar positiva o negativamente a las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores [IV-10, IV-11]. La mayor hermeticidad de los edificios reduce la mezcla del aire del interior con aire exterior. Al mejorar la eficiencia térmica del edificio, la mayor temperatura puede dar lugar a una disminución de la presión dentro del edificio y, de esa forma, generar un mayor flujo de ^{222}Rn del suelo hacia el interior de la construcción. Algunos Estados han modificado los códigos de construcción pertinentes para evitar que se creen altas concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores de los edificios retroadaptados. En la referencia [IV-12] figura un ejemplo del asesoramiento proporcionado por una autoridad nacional sobre el efecto de la retroadaptación para el aislamiento térmico.

VENTILACIÓN Y DESPRESURIZACIÓN DEL SUELO

IV-8. Los sistemas de ventilación y despresurización del suelo pueden consistir en lo siguiente:

- a) Cañerías perforadas colocadas en la capa de drenaje bajo el nuevo piso, cuando se sustituya un piso ya existente por otro nuevo.
- b) Cañerías perforadas introducidas por horadación del suelo bajo un piso ya existente, sin alterar ese piso; la inserción en el suelo puede hacerse desde el sótano, desde un foso de ensamblaje en una de las habitaciones o desde el exterior.
- c) Un sumidero de radón consistente en una cavidad del tamaño de un balde excavada en el suelo inmediatamente por debajo de la losa del piso y conectada con el exterior por medio de cañerías; el sumidero puede construirse perforando la losa del piso o insertando una cañería a través de la pared de los cimientos desde el exterior de la vivienda.
- d) Un pozo de radón construido bajo el edificio o en su proximidad. La profundidad del pozo de radón suele ser de 3 m a 5 m. Este pozo tiene una construcción permeable que permite extraer el aire del suelo adyacente.

Estos sistemas de ventilación y despresurización del suelo funcionan por inversión de la diferencia de presión entre el suelo bajo el piso y la habitación situada encima de este.

IV-9. Por lo general, un pequeño ventilador eléctrico colocado en la cañería controla la subpresión, y los sistemas que utilizan esos ventiladores son sistemas activos. Cuando no se emplea un ventilador, el sistema se considera pasivo. Los sistemas pasivos aprovechan las diferencias naturales de presión causadas por las diferencias de temperatura y los vientos. Un sistema pasivo ofrece las ventajas de no tener costos de funcionamiento, de ser completamente silencioso y de no necesitar en general controles periódicos o un mantenimiento a largo plazo. Sin embargo, los sistemas pasivos son normalmente menos eficaces que los activos. Cuando las concentraciones de ^{222}Rn son de varios centenares de becquerels por metro cúbico o más, un sistema activo será probablemente la solución más eficaz.

AUMENTO DE LA VENTILACIÓN BAJO EL PISO

IV-10. En el caso de las viviendas con pisos de hormigón o madera flotante, el aumento del flujo de aire bajo el piso puede reducir las cantidades de ^{222}Rn que penetran en la construcción. El aumento del flujo de aire puede lograrse

instalando más ladrillos huecos u orificios de ventilación bajo el piso, o desatascando o sustituyendo los ya existentes. Ahora hay ladrillos huecos de plástico con una mayor superficie abierta que la de los de arcilla del mismo tamaño. La posición de los ladrillos huecos influye considerablemente en la reducción de las concentraciones de ^{222}Rn que se obtiene, ya que si se encuentran en espacios muertos sin flujo de aire su eficacia es menor.

IV-11. Si se considera que no se ha logrado la reducción deseada de las concentraciones de ^{222}Rn con las medidas pasivas, la instalación de un ventilador puede aumentar aún más la ventilación bajo el piso. Los ventiladores pueden instalarse de modo que soplen aire hacia el espacio subterráneo (ventilación de inyección) o que lo aspiren (ventilación de extracción). Cuando se instale un ventilador, deberá prestarse atención a los posibles peligros de condensación de humedad o de congelación en las cañerías, que dañarían el ventilador.

PRESURIZACIÓN POSITIVA

IV-12. El método de presurización positiva como medida correctiva para reducir el ^{222}Rn entraña la inyección de aire en la vivienda o en el sótano mediante un ventilador instalado especialmente para ello en el desván. De ese modo se reduce o incluso se invierte la subpresión normal en la vivienda con respecto al aire exterior, lo que a su vez reduce la entrada de ^{222}Rn . El aire puede proceder del desván mismo o del exterior. En ambos casos, el aire que entra en la vivienda es considerablemente más frío y aumenta la necesidad de calefacción.

IV-13. La presurización positiva da mejores resultados en las viviendas relativamente herméticas, y ha demostrado ser más eficaz en las de una sola planta [IV-4]. Los sistemas de presurización positiva son sencillos de instalar y no requieren una intrusión estructural importante, pero tienen la gran desventaja de que causan condensación. Por lo tanto, esta medida no es adecuada en climas fríos. Además, los costos de funcionamiento de estos sistemas serán probablemente mayores que los de un sistema activo de despresurización del suelo.

VENTILACIÓN O DESPRESURIZACIÓN POR ESPACIOS DE AIRE

IV-14. Los espacios de aire se crean en torno a las estructuras (paredes y pisos) que están en contacto directo con el suelo. La ventilación o la inducción de una ligera subpresión en esos espacios reduce el transporte del radón del suelo al

interior de la casa. Pueden emplearse formas pasivas o activas de ventilación. Los espacios de aire son eficaces en los casos en que no solo hay entrada de ^{222}Rn sino también humedad que afecta a la construcción.

AUMENTO DE LA VENTILACIÓN EN LOS ESPACIOS INTERIORES

IV-15. A veces es posible aumentar la ventilación en una vivienda desobstruyendo los orificios de ventilación, instalando otros nuevos en las paredes o instalando orificios de apertura manual en las ventanas. La mayor ventilación mezcla el aire del interior rico en ^{222}Rn con el del exterior, reduciendo así las concentraciones de ^{222}Rn en los espacios interiores. La instalación o el desbloqueo de los orificios de ventilación reducen también la subpresión en la vivienda y, de ese modo, la succión del ^{222}Rn del suelo hacia el interior.

IV-16. El aumento de la ventilación de fondo como medida correctiva contra el ^{222}Rn debe aplicarse solo en la planta baja. Una mayor ventilación de los pisos superiores podría elevar las concentraciones de ^{222}Rn , debido al efecto de succión, que hace ascender el aire dentro de la vivienda.

IV-17. Las concentraciones de ^{222}Rn tienden a ser más altas cuando la diferencia de temperatura entre los espacios interiores y el exterior es mayor, por lo que el aumento de la ventilación no será probablemente una solución eficaz si los ocupantes de la vivienda no están dispuestos a mantener la alta tasa de ventilación durante el invierno [IV-7].

IV-18. El aumento de la ventilación natural tiene la ventaja de ser un sistema completamente pasivo, que no requiere mantenimiento a largo plazo. Además, puede ayudar a mejorar la calidad del aire interior en general.

IV-19. Un sistema de ventilación con recuperación de calor (dotado de un intercambiador de calor aire-aire) es un sistema accionado por energía eléctrica que aumenta la ventilación de una vivienda al tiempo que calienta el aire entrante (o lo enfría, si es necesario) con el aire que está extrayendo. Estos sistemas pueden ayudar también a reducir las concentraciones de ^{222}Rn en el aire de los espacios interiores.

IV-20. Los sistemas de aire acondicionado pueden repercutir en la entrada de ^{222}Rn del suelo a la vivienda. Es importante velar por que se mantenga el equilibrio entre el aire que entra y el que sale para que el sistema de aire acondicionado no cree una subpresión en la construcción; de ser posible, debería generar más bien

una ligera sobrepresión. Si el sistema de aire acondicionado aumenta la tasa de ventilación de la vivienda, contribuirá también a reducir las concentraciones de ^{222}Rn al diluir este radionucleido en el aire interior.

SELLADO DE PISOS Y PAREDES

IV-21. En teoría, es posible evitar la entrada de ^{222}Rn del suelo a una vivienda sellando todos los puntos de entrada de este gas, como las grietas en los pisos macizos, las fisuras o aberturas en las paredes en contacto con el suelo y los huecos alrededor de cables y tuberías. En la práctica, sin embargo, el sellado eficaz suele ser sumamente difícil de lograr, y es más probable que sea útil si se aplica junto con otros métodos y no por sí solo.

IV-22. Para sellar todas las posibles rutas de entrada del ^{222}Rn del suelo a una vivienda es necesario levantar los revestimientos de los pisos y los rodapiés y cerrar todas las grietas y juntas con un sellador adecuado. El sellador debe ser duradero y suficientemente flexible para resistir a los futuros movimientos de las estructuras del edificio.

IV-23. Para que este método de sellado dé buenos resultados, tienen que cerrarse efectivamente todas las aberturas. Sin embargo, algunas aberturas pueden ser invisibles, y con el tiempo pueden formarse nuevas grietas y fisuras. Además, podría aumentar el flujo de ^{222}Rn a través de las aberturas restantes. Por consiguiente, es posible que solo se consigan reducciones menores de las concentraciones de ^{222}Rn .

IV-24. Si existe la posibilidad de cubrir el suelo bajo un piso flotante con una membrana (por ejemplo, en una vivienda con un sótano de poca altura), esta podría ser una medida correctiva útil para reducir las concentraciones de ^{222}Rn , especialmente si se combina con el uso de una bomba que reduzca la presión bajo la membrana (como en un sumidero). Debe procederse con mucho cuidado al aplicar la membrana directamente a un piso de madera, porque ello podría conducir a la pudrición de la madera.

REFERENCIAS DEL ANEXO IV

- [IV-1] SCIVYER, C., Surveying Dwellings with High Indoor Radon Levels: A BRE Guide to Radon Remedial Measures in Existing Dwellings, Building Research Establishment, BRE Report No. 250, BRE, Garston (1993).
- [IV-2] UNITED KINGDOM BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, “Buildings and radon”, BRE Good Building Guides and Good Repair Guides: A Library of Information for all Construction Professionals, BRE, Garston (2013).
- [IV-3] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Consumer’s Guide to Radon Reduction (2013),
<https://www.epa.gov/radon/consumers-guide-radon-reduction-how-fix-your-home>.
- [IV-4] NAISMITH, S.P., MILES, J.C.H., SCIVYER, C.R., The influence of house characteristics on the effectiveness of radon remedial measures, *Health Phys.* 75 (1998) 410–416.
- [IV-5] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon – Mitigation measures in existing buildings (2011),
<http://www.radonleaders.org/sites/default/files/4.pdf>.
- [IV-6] SWEDJEMARK, G.A., The history of radon from a Swedish perspective, *Radiat. Prot. Dosim.* 109 (2004) 421–426.
- [IV-7] JIRÁNEK, M., ROVENSKÁ, K., Limited applicability of cost-effectiveness and cost-benefit analyses for the optimization of radon remedial measures, *J. Hazard. Mater.* 182 (2010) 439–446.
- [IV-8] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon from the Soil, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, CSN 730601 (2006).
- [IV-9] CZECH OFFICE FOR STANDARDS, Protection of Buildings against Radon and Gamma Radiation from Building Materials, Czech Office for Standards, Metrology and Testing, CSN 730602 (2000).
- [IV-10] JIRANEK, M., KACMARIKOVA, V., Dealing with the increased radon concentration in thermally retrofitted buildings, *Radiat. Prot. Dosim.* 160 (2014) 43–47.
- [IV-11] FOJTIKOVA, I., NAVRATILOVA ROVENSKA, K., Influence of energy-saving measures on the radon concentration in some kindergartens in the Czech Republic, *Radiat. Prot. Dosim.* **160** (2014) 149–153.
- [IV-12] ÖSTERREICHISCHE AGENTUR FÜR GESUNDHEIT UND ERNÄHRUNGSSICHERHEIT, MINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG, BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDESAGENTUR FÜR UMWELT BOZEN, SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, AMT DER OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG, Radon – The effect of retrofitting thermal insulation (2011),
<http://www.alexandria.admin.ch/bv001486768.pdf>.

Anexo V

PROGRAMAS DE INFORMACIÓN PÚBLICA SOBRE LOS RIESGOS DEBIDOS AL RADÓN

V-1. La preocupación pública por el radón es en general menor que la preocupación por otros riesgos comparables, o por riesgos mucho menos importantes que los relacionados con la radiación artificial. El Sr. Lee [V-1] señala que la población tiende a preocuparse más por los peligros que:

- a) son de origen humano, no natural;
- b) ocurren por una actuación humana, no por azar;
- c) pueden causar daños a grupos, no solo a personas;
- d) son evidentes, inmediatos y pavorosos, y no ocultos, diferidos y familiares.

V-2. Ninguno de estos cuatro factores que aumentarían la preocupación se aplica al radón, y un estudio ha indicado que los ocupantes de las viviendas a menudo niegan la existencia de un riesgo para la salud [V-2]. Por este motivo, se necesitan programas de información pública, para que los riesgos debidos al radón se empiecen a tomar en serio.

V-3. Las autoridades de muchos Estados han reconocido la necesidad de realizar programas de información pública sobre el radón, y han adoptado medidas para concienciar a la población acerca de los riesgos causados por el radón. Sea cual sea el enfoque concreto que se adopte a fin de aumentar la conciencia pública, para lograr avances es necesario el esfuerzo a largo plazo de diversas partes: los gobiernos nacionales y locales, las autoridades sanitarias, las organizaciones ambientales y de protección radiológica nacionales e internacionales, los órganos reguladores y la propia población. Las actividades realizadas para crear conciencia sobre el radón en Europa han sido descritas por Scivyer [V-3, V-4] y en la labor del grupo de prevención y reducción del radón, de la Comisión Europea, cuyo trabajo incluye la comunicación de los riesgos [V-5].

V-4. Tal vez el grupo destinatario más importante de las actividades de creación de conciencia sobre el radón sean los propietarios de edificios, pero otros grupos importantes son los funcionarios de las autoridades locales, los aparejadores, los constructores, los profesionales del sector de la vivienda, los corredores de propiedades, los abogados, los profesionales de la salud y la seguridad, y los profesionales médicos. El mensaje general que debe transmitirse es el mismo en todos los casos, pero los aspectos principales que han de especificarse, el grado

de detalle y la forma en que se presenten deberán adaptarse a las necesidades específicas de cada grupo destinatario.

V-5. Un aspecto particularmente importante es la entrega de material escrito en un lenguaje sencillo (de ser posible, en la Web) para un público no experto. Como ejemplos cabe citar:

- A Citizen’s Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon (Guía del ciudadano sobre el radón: guía para la protección suya y de su familia contra el radón) [V-6];
- Home Buyer’s and Seller’s Guide to Radon (Guía sobre el radón para quienes compran y venden casas) [V-7];
- Radon: A Guide for Canadian Homeowners (El radón: Guía para los propietarios de casas canadienses) [V-8];
- Understanding Radon Remediation: A Householder’s Guide (Medidas correctivas contra el radón: guía para los residentes [V-9];
- Radon — Hauptursache der natürlichen Strahlenexposition (El radón — Principal fuente de radiación natural); Radon in Häusern (El radón en las casas); Maßnahmen zum Schutz vor erhöhten Radonkonzentrationen in Gebäuden (Medidas de protección contra las concentraciones altas de radón en los edificios) [V-10];
- Das Radon-Handbuch Deutschland (Manual sobre el radón — Alemania) [V-11];
- Radon - Don’t Live with the Risk (El radón — No conviva con el riesgo) [V-12];
- Vågen till ett radonfritt boende (Vivir sin riesgo con el radón) [V-13];
- Rischio radon: cosa è, come si previene, come si misura, come si interviene — 13 quesiti sul problema Radon (El peligro del radón: Qué es, cómo se previene, cómo se mide, cómo se interviene — 13 interrogantes sobre el problema del radón) [V-14];
- The Risks to Your Health from Radon (Los riesgos para la salud que plantea el radón) [V-15];
- Le radon dans le bâtiment — Guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves (El radón en los edificios — Guía para una acción correctiva en las construcciones existentes y para la prevención en las construcciones nuevas) [V-16];
- National Action Plan concerning Radon 2012 – 2020 (Plan de Acción Nacional sobre el Radón 2012-2020) [V-17];
- Radon: Informations sur un thème “rayonnant” (Radón: Información sobre un tema “radiante”) [V-18].

V-6. Las ‘campañas del radón’ a nivel nacional ayudan a crear conciencia sobre la exposición debida al radón como problema de salud pública. Sin embargo, las campañas de mediciones y de medidas correctivas pueden ser más eficaces si se realizan a nivel local [V-19, V-20], porque la población y los funcionarios están más familiarizados con las circunstancias de su propia localidad y porque la población será probablemente menos escéptica ante un mensaje que provenga de los funcionarios locales. Las campañas locales permiten preparar folletos que traten específicamente de las preocupaciones de la población del lugar y ofrecen la posibilidad de utilizar métodos baratos y eficaces de suministro de información, como los puestos de exposición en las bibliotecas y las oficinas públicas. La realización de campañas del radón en que participen profesionales que conozcan el problema puede tener un impacto importante en la reducción del riesgo debido al radón al promover las mediciones de este gas y las medidas correctivas correspondientes. Esos profesionales pueden ser funcionarios de las autoridades locales, aparejadores, constructores, profesionales del sector de la vivienda, corredores de propiedades, abogados, profesionales de la salud y la seguridad, y profesionales médicos.

V-7. La participación de los medios de comunicación electrónicos e impresos es una parte importante de las campañas del radón. El mensaje en la prensa nacional y local debe ser coherente. Las radios locales también pueden hacer una aportación sustantiva. Los artículos de publicaciones y boletines especializados destinados a determinadas autoridades y públicos profesionales son importantes de por sí y pueden respaldar las campañas de creación de conciencia [V-21, V-22].

V-8. Lo ideal es que la información se comunique al público personalmente. Las visitas de los funcionarios de la autoridad local a las viviendas llevan tiempo, pero pueden ser sumamente efectivas para alentar a los propietarios a aplicar medidas correctivas. Las exposiciones o las veladas de información pública a cargo de funcionarios de la autoridad local y de expertos nacionales pueden también ayudar a reducir los riesgos debidos al radón al promover la adopción de medidas correctivas. Los servicios de asesoramiento a distancia, como las líneas telefónicas directas y los sitios web, son formas eficaces y económicas de difundir consejos y orientación.

REFERENCIAS DEL ANEXO V

- [V-1] LEE, T.R., The public's perception of radon, *Radiat. Prot. Dosim.* **42** (1992) 257–262.
- [V-2] ZHANG, W., CHOW, Y., MEARA, J., GREEN, M., Evaluation and equity audit of the domestic radon programme in England, *Health Policy* **102** (2011) 81–88.
- [V-3] SCIVYER, S., Review of Radon Awareness Activities in Europe, Building Research Establishment, Garston (2005).
- [V-4] SCIVYER, S., Compilation of Responses to Radon Public Awareness Raising Questionnaires 2002–2003, Building Research Establishment, Garston (2005).
- [V-5] EUROPEAN COMMISSION, Radon Prevention and Remediation: Overview and Background (2014),
<https://radpar.uowm.gr/>.
- [V-6] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, A Citizen's Guide to Radon: The Guide to Protecting Yourself and Your Family from Radon, US EPA (2012),
https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/2016_a_citizens_guide_to_radon.pdf.
- [V-7] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Home Buyer's and Seller's Guide to Radon (2013),
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/hmbugud.pdf>.
- [V-8] CANADA MORTGAGE AND HOUSING COMMISSION, HEALTH CANADA, Radon: A Guide for Canadian Homeowners, CMHC and Health Canada, Ottawa (1997).
- [V-9] RADIOLOGICAL PROTECTION INSTITUTE OF IRELAND, Understanding Radon Remediation: A Householder's Guide, RPII, Dublin (1997).
- [V-10] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, Radon — Hauptursache der natürlichen Strahlenexposition (2013),
http://www.bfs.de/de/bfs/publikationen/broschueren/ionisierende_strahlung/radon/.
- [V-11] BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMU), BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BfS), Das Radon-Handbuch Deutschland, BMU, Bonn (2001).
- [V-12] HEALTH PROTECTION AGENCY, Radon — don't live with the risk, Health Protection Agency, Chilton, Didcot (2005),
http://www.doeni.gov.uk/nica/radon_at_home__at_work_booklet.pdf.
- [V-13] STATENSSTRALSKYDDSDS-INSTITUT (Swedish Radiation Safety Authority), Vågen till ett radonfritt boende (2009),
http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Broschyr/2009/Faktablad_Vagen_till_ett_radonfritt_boende2.pdf
- [V-14] ASSOCIAZIONE NAZIONALE PROFESSIONALE ESPERTI QUALIFICATI, Rischio radon: cosa è, come si previene, come si misura, come si interviene — 13 quesiti sul problema Radon (2003),
http://www.anpeq.it/anpeq/download/libretto_radon.pdf.

- [V-15] UNITED KINGDOM HEALTH PROTECTION AGENCY, The Risks to your Health from Radon (2009),
<http://www.ukradon.org/article.php?key=risksradon>.
- [V-16] CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT, Le radon dans les bâtiments, Guide pour la remédiation dans les constructions existantes et la prévention dans les constructions neuves, CSTB, Paris (2008).
- [V-17] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, National Action Plan concerning Radon 2012–2020, Bern (2011),
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/11649/index.html?lang=en>.
- [V-18] SWISS FEDERAL OFFICE OF PUBLIC HEALTH, Radon: Informations sur un Thème “Rayonnant” (2008),
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00046/index.html?lang=en>.
- [V-19] POORTINGA, W., BRONSTERING, K., LANNON, S., Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: a population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales, *Risk Anal.* **31** (2011) 1800–1812.
- [V-20] KENDALL, G.M., GREEN, B.M.R., MILES, J.C.H., DIXON, D.W., The development of the UK radon programme, *J. Radiol. Prot.* **25** 4 (2005) 475–492.
- [V-21] POORTINGA, W., BRONSTERING, K., LANNON, S.C., Awareness and perceptions of the risks of exposure to indoor radon: A population-based approach to evaluate a radon awareness and testing campaign in England and Wales, *Risk Anal.* **31** (2011) 1800–1812.
- [V-22] FOJTIKOVA, I., ROVENSKA, K., Radon programmes and health marketing, *Radiat. Prot. Dosim.* **145** (2011) 92–95.

Anexo VI

APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO PARA LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

MÉTODO UTILIZADO PARA LA EVALUACIÓN DE LAS DOSIS DEBIDAS A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

VI-1. En el presente anexo se describe un método para calcular la dosis derivada de la radiación gamma externa emitida por los materiales de construcción sobre la base del enfoque de Markkanen [VI-1]. Los resultados se presentan en forma tabular como tasas de dosis específicas. Ello permite hacer las evaluaciones de dosis más típicas sin necesidad de cálculos de computadora. En este anexo se presentan cinco ejemplos de estas evaluaciones.

VI-2. El método se basa en el cálculo de la tasa de dosis para un edificio rectangular construido con materiales de densidad uniforme, que contienen radionucleidos con concentraciones de la actividad uniformes. La tasa de dosis en el espacio interior se obtiene sumando las tasas de dosis, calculadas por separado, debidas a los radionucleidos en las paredes, el piso y el techo de una habitación como la que se ilustra en la figura VI-1. Los efectos de las puertas y las ventanas solo reducen la tasa de dosis en una cantidad pequeña; por lo tanto, en aras de la simplicidad, las puertas y ventanas no se toman en consideración en la evaluación. El cálculo incluye las situaciones en que los radionucleidos están distribuidos en dos capas de materiales de construcción distintos, con diferentes densidades y concentraciones de la actividad, por ejemplo, en paredes de hormigón recubiertas por una capa delgada de otro material, que pueden ser azulejos.

VI-3. En algunos casos, los propios materiales de construcción proporcionan un blindaje considerable contra la radiación gamma del suelo, que es parte de la radiación de fondo terrestre. Cuando se trata de estructuras de hormigón muy grandes, el blindaje es casi completo. El nivel de referencia de 1 mSv/a utilizado para los materiales de construcción se define como el causado por la ‘exposición añadida’ debida a esos materiales, por encima de la exposición causada por los niveles normales de radiación de fondo. El método básico para determinar la ‘exposición añadida’ es el siguiente:

- a) Primero se calcula la exposición total debida al material de construcción y a los niveles de fondo, teniendo en cuenta el blindaje proporcionado por el

material de construcción contra el componente gamma de la radiación de fondo terrestre.

- b) Luego se sustrae la exposición a la radiación gamma del fondo terrestre.
- c) El resultado es la 'exposición añadida', que se comparará con el nivel de referencia.

VI-4. En los ejemplos de cálculos que se presentan a continuación, se presupone una tasa de dosis media mundial ponderada según la población de 60 nGy/h para la radiación gamma del fondo terrestre [VI-2]. En los cálculos que realicen los Estados se deberá utilizar el nivel de radiación gamma en el fondo terrestre que corresponda. El efecto de blindaje de la radiación cósmica que pueden tener los materiales se considera pequeño; por lo tanto, la exposición a esta radiación no se tiene en cuenta en las evaluaciones.

VI-5. La tasa de dosis gamma se calcula en el centro de la habitación de tamaño estándar representada en la figura VI-1. Las tasas de dosis gamma específicas aportadas por las paredes, el piso y el techo se presentan en el cuadro VI-1. La tasa de dosis total en el interior se obtiene sumando las tasas de dosis calculadas por separado para las paredes, el piso y el techo. Las diversas evaluaciones de dosis resultantes del uso de las tasas de dosis específicas consignadas en el cuadro VI-1 se describen en los ejemplos 1 a 5. Las evaluaciones de dosis proporcionan ejemplos referentes a estructuras de hormigón muy grandes (como los bloques de apartamentos) y a un tipo de estructura más pequeño y sencillo, como el que abunda en las zonas rurales de los países en desarrollo.

VI-6. Para convertir la dosis absorbida en aire en una dosis efectiva se utiliza un factor de 0,7 Sv/Gy [VI-3].

VI-7. Risica *et al.* realizaron un análisis de sensibilidad de los efectos de la modificación de los parámetros de la habitación en la dosis calculada para esta y obtuvieron los siguientes resultados [VI-4]:

- a) La variación de la tasa de dosis en aire según la posición en la habitación se limitaba a aproximadamente un 10 % a una distancia de hasta 1 m de las paredes.
- b) La tasa de dosis absorbida en aire se calculó como una función de las dimensiones de la habitación, fijando la altura en 2,8 m y haciendo variar la anchura y la longitud entre 2 m y 10 m, con formas rectangulares y cuadradas. La variación máxima de la tasa de dosis obtenida fue del 6 % con respecto al cálculo para una habitación con un volumen de 60 m³.

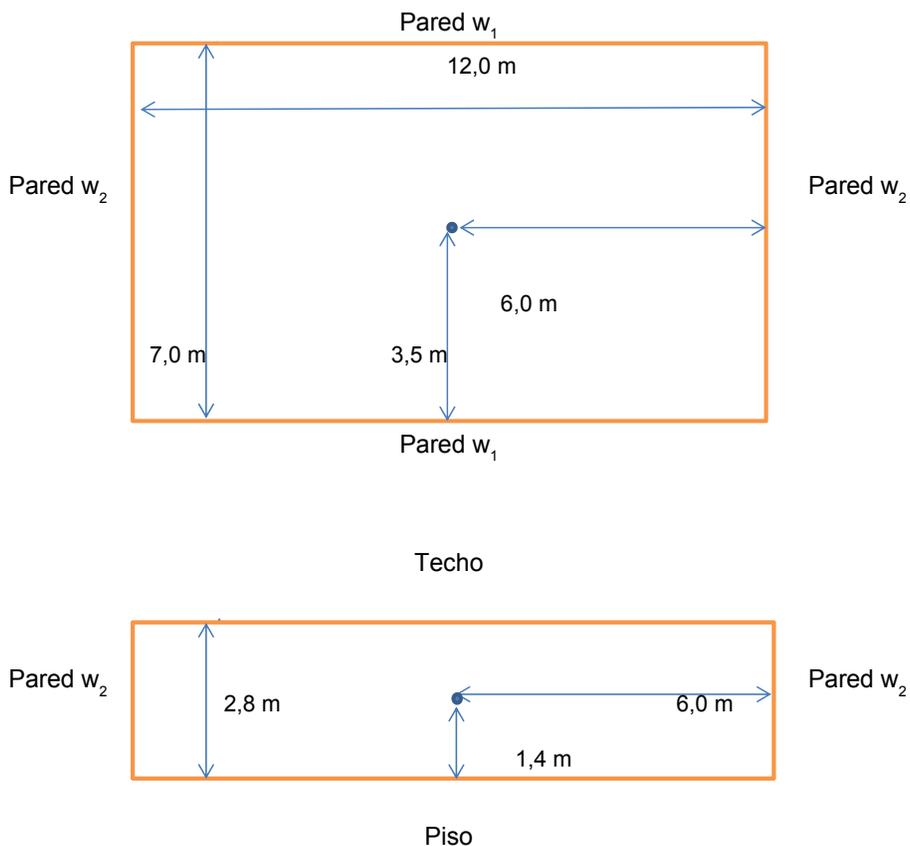


Fig. VI-1. Geometría utilizada en el cálculo de la tasa de dosis gamma en el espacio interior debida a los materiales de construcción.¹

- c) La tasa de dosis absorbida en aire en la habitación se calculó como una función del grosor de las paredes, el piso y el techo. Se determinó que, hasta un valor de 0,4 m, el aumento del grosor elevaba la tasa de dosis de radiación, mientras que, por encima de los 0,4 m de grosor, la autoabsorción del material hacía que el efecto de un aumento del grosor fuera insignificante.

¹ Las tasas de dosis se calculan para el punto central de la habitación. Puede demostrarse que, debido a la geometría de tipo 4π de la exposición, las tasas de dosis en otros puntos de la habitación no difieren en más de un 5 % a un 10 % de la del punto central. Por consiguiente, la tasa de dosis en el punto central es una buena aproximación de la tasa de dosis de toda la habitación.

CUADRO VI-1. TASA DE DOSIS GAMMA ESPECÍFICA EN AIRE DEBIDA A LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Masa por unidad de superficie del material de las paredes, el techo o el piso ^a (kg/m ²)	Material de las paredes, el techo o el piso (capa superior) ^b			Hormigón de 0,2 m de espesor detrás del material de las paredes, el techo o el piso ^c		
	(pGy/h por Bq/kg)			(pGy/h por Bq/kg)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
<i>Pared w₁: Dimensiones 12,0 m × 2,8 m, distancia 3,5 m</i>						
0	0	0	0	95	110	8,0
25	9	10	0,73	87	100	7,3
50	18	21	1,5	80	94	6,7
100	35	40	2,8	65	77	5,6
150	50	56	3,9	52	62	4,6
200	61	70	4,9	40	50	3,8
300	79	91	6,4	24	31	2,5
500	96	110	8,1	8	12	1,0
<i>Pared w₂: Dimensiones 7,0 m × 2,8 m, distancia 6,0 m</i>						
0	0	0	0	32	37	2,7
25	2,7	3,1	0,22	30	35	2,5
50	5,5	6,2	0,44	28	32	2,3
100	11	12	0,85	22	27	2,0
150	15	18	1,2	19	23	1,7
200	20	22	1,6	16	19	1,4
300	26	30	2,1	10	13	1,0
500	33	38	2,7	3,7	5,4	0,45
<i>Piso o techo: Dimensiones 12,0 m × 7,0 m, distancia 1,4 m</i>						
0	0	0	0	350	420	30
25	46	52	3,7	310	370	27
50	90	100	7,1	270	330	24

CUADRO VI-1. TASA DE DOSIS GAMMA ESPECÍFICA EN AIRE DEBIDA A LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1 (cont.)

Masa por unidad de superficie del material de las paredes, el techo o el piso ^a (kg/m ²)	Material de las paredes, el techo o el piso (capa superior) ^b			Hormigón de 0,2 m de espesor detrás del material de las paredes, el techo o el piso ^c		
	(pGy/h por Bq/kg)			(pGy/h por Bq/kg)		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
100	160	190	13	200	250	18
150	220	250	18	150	180	14
200	260	300	21	110	140	11
300	310	360	26	56	78	6,3
500	350	420	30	15	27	2,2

^a La masa por unidad de superficie de las paredes, el piso o el techo es el producto del grosor por la densidad de la estructura. Por ejemplo, en el caso de una pared de 0,15 m de grosor fabricada con bloques de una densidad de 2000 kg/m³, la masa por unidad de superficie de la pared es de 0,15 m × 2000 kg/m³ = 300 kg/m².

^b Esta es la tasa de dosis debida a la pared, w₁ o w₂, o el piso o el techo, que tienen una determinada masa por unidad de superficie. Por ejemplo, si la pared w₁ tiene una masa por unidad de superficie de 300 kg/m² y su concentración de la actividad del ²²⁶Ra es de 100 Bq/kg, la tasa de dosis debida al ²²⁶Ra en la pared w₁ será de (79 pGy/h por Bq/kg) × (100 Bq/kg) = 7900 pGy/h = 7,9 nGy/h = 0,0079 μGy/h. La ‘capa superior’ entre paréntesis se refiere al caso en que la estructura de la pared, el techo o el piso comprende dos capas de materiales diferentes, por ejemplo azulejos en la superficie y una estructura de hormigón por debajo. En tal caso, las tasas de dosis específicas que aparecen en esta columna pueden utilizarse para el material de la ‘capa superior’, como los azulejos.

^c En el caso de una estructura en dos capas (véase la nota b), esta columna da la tasa de dosis para una estructura de hormigón de 20 cm de espesor por debajo de la capa superior. El efecto del blindaje de la capa superior se tiene en cuenta, por lo que la tasa de dosis de esta segunda capa de material disminuye a medida que aumenta la masa por unidad de superficie de la capa superior.

Por consiguiente, cabe concluir que la tasa de dosis en la habitación modelo no resulta afectada de manera significativa por los cambios en el tamaño de la habitación entre 12 m² y 100 m², con una altura fija de 2,8 m, ni por las variaciones del grosor de las paredes.

EJEMPLOS DE EVALUACIONES DE DOSIS

Ejemplo 1: Exposición a la radiación gamma en una habitación de hormigón en que las concentraciones de ^{226}Ra y ^{232}Th son ligeramente superiores a la media

VI-8. En una habitación como la representada en la figura VI-1, las paredes, el piso y el techo son de hormigón. Se supone que el hormigón tiene niveles ligeramente elevados de radionucleidos de origen natural y que la habitación tiene las especificaciones indicadas en el cuadro VI-2.

CUADRO VI-2. EJEMPLO 1: ESPECIFICACIONES DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Radionucleido	Pisos, techo, paredes (hormigón)
	Concentración de la actividad
^{226}Ra	80 Bq/kg
^{232}Th	80 Bq/kg
^{40}K	800 Bq/kg
<i>Otros parámetros</i>	
Densidad del hormigón	2350 kg/m ³
Espesor del hormigón	0,20 m

VI-9. La masa por unidad de superficie de las paredes, el piso y el techo es de $2350 \text{ kg/m}^3 \times 0,20 \text{ m} = 470 \text{ kg/m}^2$; por lo tanto, se utilizan las tasas de dosis específicas para una masa por unidad de superficie de 500 kg/m^2 que figuran en el cuadro VI-1. La tasa de dosis en la habitación se calcula como se indica en el cuadro VI-3.

VI-10. La dosis efectiva anual añadida para un ocupante dependerá del tiempo de ocupación anual:

$$\text{Ocupación del 100 \%: } 8760 \text{ h/a} \times 0,121 \mu\text{Sv/h} = 1060 \mu\text{Sv/a} = 1,1 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 80 \%: } 7008 \text{ h/a} \times 0,121 \mu\text{Sv/h} = 848 \mu\text{Sv/a} = 0,85 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 60 \%: } 5256 \text{ h/a} \times 0,121 \mu\text{Sv/h} = 636 \mu\text{Sv/a} = 0,64 \text{ mSv/a}$$

CUADRO VI-3. EJEMPLO 1: TASA DE DOSIS EN LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Fuente	Cálculo	Tasa de dosis
w_1 (hormigón)	$2 \times (96 \times 80 + 110 \times 80 + 8,1 \times 800)$	0,0459 $\mu\text{Gy/h}$
w_2 (hormigón)	$2 \times (33 \times 80 + 38 \times 80 + 2,7 \times 800)$	0,0157 $\mu\text{Gy/h}$
Piso o techo (hormigón)	$2 \times (350 \times 80 + 420 \times 80 + 30 \times 800)$	0,1712 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis total en la habitación (excluida la radiación cósmica)		0,2328 $\mu\text{Gy/h}$
Radiación gamma terrestre en el exterior: las estructuras de hormigón del edificio protegen contra esta radiación		-0,06 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis añadida debida a los materiales de construcción		0,1728 $\mu\text{Gy/h}$
Dosis efectiva añadida		$0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,1728 \mu\text{Gy/h}$ 0,121 $\mu\text{Sv/h}$

Ejemplo 2. Exposición a la radiación gamma en una habitación en que las paredes son de un material con concentraciones elevadas de ^{226}Ra y ^{232}Th y el piso y el techo son de hormigón típico

VI-11. En una habitación como la representada en la figura VI-1, el piso y el techo están contruidos con hormigón que contiene las concentraciones medias mundiales ponderadas según la población de radio, torio y potasio en el suelo [VI-2], de 33 Bq/kg, 45 Bq/kg y 420 Bq/kg para el ^{226}Ra , el ^{232}Th y el ^{40}K , respectivamente. Las paredes son de ladrillos con niveles elevados de radionucleidos de origen natural. Las especificaciones de los materiales son las que se indican en el cuadro VI-4.

CUADRO VI-4. EJEMPLO 2: ESPECIFICACIONES DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Radionucleido	Piso, techo (hormigón)	Paredes (ladrillos)
	Concentración de la actividad	Concentración de la actividad
^{226}Ra	33 Bq/kg	200 Bq/kg
^{232}Th	45 Bq/kg	300 Bq/kg
^{40}K	420 Bq/kg	1500 Bq/kg
<i>Otros parámetros</i>		
Densidad del hormigón	2350 kg/m^3	2000 kg/m^3
Espesor del hormigón	0,20 m	0,15 m

VI-12. La masa por unidad de superficie de las paredes es de $2000 \text{ kg/m}^3 \times 0,15 \text{ m} = 300 \text{ kg/m}^2$, y la del piso y el techo, de $2350 \text{ kg/m}^3 \times 0,20 \text{ m} = 470 \text{ kg/m}^2$; por lo tanto, se utilizan las tasas de dosis específicas para una masa por unidad de superficie de 300 kg/m^2 , en el caso de las paredes, y de 500 kg/m^2 , en el del piso y el techo, que figuran en el cuadro VI-1. La tasa de dosis en la habitación se calcula como se indica en el cuadro VI-5.

CUADRO VI-5. EJEMPLO 2: TASA DE DOSIS EN LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Fuente	Cálculo	Tasa de dosis
w_1 (ladrillo)	$2 \times (79 \times 200 + 91 \times 300 + 6,4 \times 1500)$	0,1054 $\mu\text{Gy/h}$
w_2 (ladrillo)	$2 \times (26 \times 200 + 30 \times 300 + 2,1 \times 1500)$	0,0347 $\mu\text{Gy/h}$
Piso y techo (hormigón)	$2 \times (350 \times 33 + 420 \times 45 + 30 \times 420)$	0,0861 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis total en la habitación (excluida la tasa de dosis debida a la radiación cósmica)		0,2262 $\mu\text{Gy/h}$
Radiación gamma terrestre en el exterior: las estructuras de hormigón del edificio protegen contra esta fuente		-0,06 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis añadida debida a los materiales de construcción		0,1662 $\mu\text{Gy/h}$
Dosis efectiva añadida	$0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,1662 \mu\text{Gy/h}$	0,116 $\mu\text{Sv/h}$

VI-13. La dosis efectiva anual añadida para un ocupante dependerá del tiempo de ocupación anual:

$$\begin{aligned} \text{Ocupación del 100 \%: } & 8760 \text{ h/a} \times 0,116 \mu\text{Sv/h} = 1016 \mu\text{Sv/a} = 1,0 \text{ mSv/a} \\ \text{Ocupación del 80 \%: } & 7008 \text{ h/a} \times 0,116 \mu\text{Sv/h} = 813 \mu\text{Sv/a} = 0,81 \text{ mSv/a} \\ \text{Ocupación del 60 \%: } & 5256 \text{ h/a} \times 0,116 \mu\text{Sv/h} = 610 \mu\text{Sv/a} = 0,61 \text{ mSv/a} \end{aligned}$$

Ejemplo 3. Exposición a la radiación gamma en una habitación de hormigón con azulejos en las paredes

VI-14. En una habitación como la representada en la figura VI-1, las paredes, el piso y el techo son de hormigón y todas las paredes están recubiertas de azulejos con niveles elevados de radionucleidos de origen natural. Las especificaciones de los materiales son las que se indican en el cuadro VI-6.

CUADRO VI-6. EJEMPLO 3: ESPECIFICACIONES DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Radionucleido	Piso, techo y paredes (hormigón)	Paredes (revestidas con azulejos)
	Concentración de la actividad	Concentración de la actividad
²²⁶ Ra	33 Bq/kg	1200 Bq/kg
²³² Th	45 Bq/kg	1500 Bq/kg
⁴⁰ K	420 Bq/kg	1200 Bq/kg
<i>Otros parámetros</i>		
Densidad del hormigón	2350 kg/m ³	2500 kg/m ³
Espesor del hormigón	0,20 m	0,01 m

VI-15. La masa por unidad de superficie de los azulejos es de $2500 \text{ kg/m}^3 \times 0,01 \text{ m} = 25 \text{ kg/m}^2$; por lo tanto, se utilizan los valores correspondientes de las tasas de dosis específicas consignadas en el cuadro VI-I, como se muestra en el cuadro VI-7.

CUADRO VI-7. EJEMPLO 3: TASA DE DOSIS EN LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Fuente	Cálculo	Tasa de dosis
w ₁ (azulejos)	$2 \times (9 \times 1200 + 10 \times 1500 + 0,73 \times 1200)$	0,0534 μGy/h
w ₁ (hormigón detrás de los azulejos)	$2 \times (87 \times 33 + 100 \times 45 + 7,3 \times 420)$	0,0209 μGy/h
w ₂ (azulejos)	$2 \times (2,7 \times 1200 + 3,1 \times 1500 + 0,22 \times 1200)$	0,0163 μGy/h
w ₂ (hormigón detrás de los azulejos)	$2 \times (30 \times 33 + 35 \times 45 + 2,5 \times 420)$	0,0072 μGy/h
Piso y techo (hormigón)	$2 \times (350 \times 33 + 420 \times 45 + 30 \times 420)$	0,0861 μGy/h
Tasa de dosis total en la habitación (excluida la tasa de dosis debida a la radiación cósmica)		0,1839 μGy/h
Radiación gamma terrestre en el exterior: las estructuras de hormigón del edificio protegen contra esta fuente		-0,06 μGy/h
Tasa de dosis añadida debida a los materiales de construcción		0,1239 μGy/h
Dosis efectiva añadida	$0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,1239 \text{ μGy/h}$	0,0867 μSv/h

VI-16. La dosis efectiva anual añadida para un ocupante dependerá del tiempo de ocupación anual:

$$\text{Ocupación del 100 \%: } 8760 \text{ h/a} \times 0,0867 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 760 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,76 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 80 \%: } 7008 \text{ h/a} \times 0,0867 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 608 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,61 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 60 \%: } 5256 \text{ h/a} \times 0,0867 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 456 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,46 \text{ mSv/a}$$

En este ejemplo, es interesante analizar más a fondo el origen de la dosis debida a la radiación gamma, y especialmente la parte de la dosis añadida causada por los azulejos. La tasa de dosis debida a los azulejos es de $0,0534 \text{ } \mu\text{Gy/h} + 0,0163 \text{ } \mu\text{Gy/h} = 0,0697 \text{ } \mu\text{Gy/h}$; sin embargo, la tasa de dosis añadida debida a los azulejos es inferior a $0,0697 \text{ } \mu\text{Gy/h}$, porque los azulejos reducen la tasa de dosis debida a la radiación gamma emitida por el hormigón que se encuentra detrás. Por consiguiente, la tasa de dosis añadida debida a los azulejos puede obtenerse calculando la tasa de dosis de la habitación sin azulejos y sustrayendo esta cantidad de la tasa de dosis total calculada anteriormente. La tasa de dosis de la habitación sin azulejos se calcula como en el ejemplo 1, lo que da un valor de $0,117 \text{ } \mu\text{Gy/h}$. La tasa de dosis añadida debida a los azulejos es, pues, de $0,1839 - 0,117 \text{ } \mu\text{Gy/h} = 0,0669 \text{ } \mu\text{Gy/h}$, y la dosis efectiva añadida para un ocupante a causa de los azulejos es de $0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,0669 \text{ } \mu\text{Gy/h} = 0,0468 \text{ } \mu\text{Sv/h}$. La dosis efectiva anual añadida que reciba un ocupante a causa de los azulejos dependerá del tiempo anual de ocupación:

$$\text{Ocupación del 100 \%: } 8760 \text{ h/a} \times 0,0468 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 410 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,41 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 80 \%: } 7008 \text{ h/a} \times 0,0468 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 328 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,33 \text{ mSv/a}$$

$$\text{Ocupación del 60 \%: } 5256 \text{ h/a} \times 0,0468 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 256 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,26 \text{ mSv/a}$$

Ejemplo 4: Exposición a la radiación gamma en una habitación en que las paredes ligeras están hechas de materiales con una elevada concentración de ^{226}Ra

VI-17. En este modelo se examina una forma de construcción que es común en las zonas rurales de los países en desarrollo. El piso y el techo de una habitación como la de la figura VI-1 son de madera, paja o materiales similares, y por lo tanto no contribuyen a la dosis causada por la exposición a la radiación gamma en los espacios interiores. La dosis derivada de esta exposición se debe al suelo subyacente y a las paredes de la habitación. Las paredes están construidas con bloques huecos y ligeros que tienen niveles elevados de ^{226}Ra . Las especificaciones del material son las que se indican en el cuadro VI-8.

CUADRO VI-8. EJEMPLO 4: ESPECIFICACIONES DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Radionucleido	Paredes (bloques de construcción)
	Concentración de la actividad
^{226}Ra	1200 Bq/kg
^{232}Th	45 Bq/kg
^{40}K	420 Bq/kg
<i>Otros parámetros</i>	
Densidad del hormigón	1000 kg/m ³
Espesor del hormigón	0,15 m

VI-18. La masa por unidad de superficie de las paredes es de $1000 \text{ kg/m}^3 \times 0,15 \text{ m} = 150 \text{ kg/m}^2$. El techo y el piso no contribuyen a la dosis. Las paredes no protegen mucho contra la radiación de fondo terrestre, por lo que no se aplica la sustracción correspondiente. La tasa de dosis de la habitación se calcula como se indica en el cuadro VI-9.

CUADRO VI-9. EJEMPLO 4: TASA DE DOSIS EN LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Fuente	Cálculo	Tasa de dosis
w_1 (bloques de construcción)	$2 \times (50 \times 1200 + 56 \times 45 + 3,9 \times 420)$	0,1283 $\mu\text{Gy/h}$
w_2 (bloques de construcción)	$2 \times (15 \times 1200 + 18 \times 45 + 1,2 \times 420)$	0,0386 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis total en la habitación (excluida la tasa de dosis debida a la radiación cósmica)		0,1669 $\mu\text{Gy/h}$
Radiación gamma terrestre en el exterior: debido a que no hay piso, los materiales de construcción protegen muy poco contra esta radiación; en aras de la simplicidad, se supone que la reducción de la tasa de dosis por esa protección es igual a cero.		0,00 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis añadida debida a los materiales de construcción		0,1669 $\mu\text{Gy/h}$
Dosis efectiva añadida	$0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,1669 \mu\text{Gy/h}$	0,1168 $\mu\text{Sv/h}$

VI-19. La dosis efectiva anual añadida para un ocupante dependerá del tiempo de ocupación anual:

Ocupación del 100 %: $8760 \text{ h/a} \times 0,117 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 1025 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 1,0 \text{ mSv/a}$

Ocupación del 80 %: $7008 \text{ h/a} \times 0,117 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 820 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,82 \text{ mSv/a}$

Ocupación del 60 %: $5256 \text{ h/a} \times 0,117 \text{ } \mu\text{Sv/h} = 615 \text{ } \mu\text{Sv/a} = 0,62 \text{ mSv/a}$

Ejemplo 5: Exposición a la radiación gamma en una habitación con paredes de hormigón hechas con un material de elevada concentración de ^{226}Ra

VI-20. Este caso es igual al del ejemplo 4, salvo que las paredes son de 20 cm de hormigón. Las especificaciones del material se consignan en el cuadro VI-10.

CUADRO VI-10. EJEMPLO 5: ESPECIFICACIONES DE LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Radionucleido	Paredes (hormigón)
	Concentración de la actividad
^{226}Ra	1200 Bq/kg
^{232}Th	45 Bq/kg
^{40}K	420 Bq/kg
<i>Otros parámetros</i>	
Densidad del hormigón	2350 kg/m ³
Espesor del hormigón	0,20 m

VI-21. La masa por unidad de superficie de las paredes es de $2350 \text{ kg/m}^3 \times 0,2 \text{ m} = 470 \text{ kg/m}^2$; por lo tanto, se utilizan las tasas de dosis específicas para una masa por unidad de superficie de 500 kg/m^2 consignadas en el cuadro VI-1. La tasa de dosis en la habitación se calcula como se indica el cuadro VI-11.

CUADRO VI-11. EJEMPLO 5: TASA DE DOSIS EN LA HABITACIÓN REPRESENTADA EN LA FIGURA VI-1

Fuente	Cálculo	Tasa de dosis
w_1 (bloques de construcción)	$2 \times (96 \times 1200 + 110 \times 45 + 8,1 \times 420)$	0,2471 $\mu\text{Gy/h}$
w_2 (bloques de construcción)	$2 \times (33 \times 1200 + 38 \times 45 + 2,7 \times 420)$	0,0849 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis total en la habitación (excluida la tasa de dosis debida a la radiación cósmica)		0,332 $\mu\text{Gy/h}$
Radiación gamma terrestre en el exterior: debido a que no hay piso, los materiales de construcción protegen muy poco contra esta radiación; en aras de la simplicidad, se supone que la reducción de la tasa de dosis por esta protección es igual a cero.		0,00 $\mu\text{Gy/h}$
Tasa de dosis añadida debida a los materiales de construcción		0,332 $\mu\text{Gy/h}$
Dosis efectiva añadida	$0,7 \text{ Sv/Gy} \times 0,332 \mu\text{Gy/h}$	0,232 $\mu\text{Gy/h}$

VI-22. La dosis efectiva anual añadida para un ocupante dependerá del tiempo de ocupación anual:

- Ocupación del 100 %: $8760 \text{ h/a} \times 0,232 \mu\text{Sv/h} = 2032 \mu\text{Sv/a} = 2,0 \text{ mSv/a}$
- Ocupación del 80 %: $7008 \text{ h/a} \times 0,232 \mu\text{Sv/h} = 1626 \mu\text{Sv/a} = 1,6 \text{ mSv/a}$
- Ocupación del 60 %: $5256 \text{ h/a} \times 0,232 \mu\text{Sv/h} = 1219 \mu\text{Sv/a} = 1,2 \text{ mSv/a}$

REFERENCIAS DEL ANEXO VI

- [VI-1] MARKKANEN, M., Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity, Publication STUK-B-STO 32, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, Helsinki (1995).
- [VI-2] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), Annex B: Exposures from Natural Radiation Sources, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
- [VI-3] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1993).
- [VI-4] RISICA, S., BOLZAN, C., NUCCETELLI, C., Radioactivity in building materials: Room model analysis and experimental methods, Sci. Total Environ. **272** (2001) 119-126.

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN

Arvela, H.	Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear (Finlandia)
Boal, T.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Bradley, J	Agencia de Protección de la Salud (Reino Unido)
Colgan, T.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Fojtíková, I.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)
Froňka, A.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)
Hůlka, J.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)
Jiranek, M.	Universidad Técnica Checa de Praga (República Checa)
Markkanen, M.	Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear (Finlandia)
Miles, J	Agencia de Protección de la Salud (Reino Unido)
Murith, C.	Oficina Federal de Salud Pública (Suiza)
Neznal, M.	Radon v.o.s. (República Checa)
Pierre, M.J.R.	Departamento de Defensa Nacional (Canadá)
Pravdova, E.	Oficina Estatal de Seguridad Nuclear (República Checa)
Rovenska, K.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)
Shannoun, F.	Organización Mundial de la Salud
Thomas, J.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)

van der Steen, J.	Consultor privado (Países Bajos)
van Deventer, T.E.	Organización Mundial de la Salud
Hůlka, J.	Instituto Nacional de Protección Radiológica (República Checa)
Webster, S.	Saskatchewan Labour (Canadá)
Zeeb, H.	Organización Mundial de la Salud



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 25

PEDIDOS DE PUBLICACIONES

En los siguientes países, las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse a través de los proveedores que se indican a continuación o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA. Al final de la lista de proveedores se proporcionan los datos de contacto.

ALEMANIA

Goethe Buchhandlung Teubig GmbH

Schweitzer Fachinformationen

Willstätterstrasse 15, 40549 Dusseldorf, ALEMANIA

Teléfono: +49 (0) 211 49 874 015 • Fax: +49 (0) 211 49 874 28

Correo electrónico: kundenbetreuung.goethe@schweitzer-online.de • Sitio web: www.goethebuch.de

CANADÁ

Renouf Publishing Co. Ltd

22-1010 Polytek Street, Ottawa, ON K1J 9J1, CANADÁ

Teléfono: +1 613 745 2665 • Fax: +1 643 745 7660

Correo electrónico: order@renoufbooks.com • Sitio web: www.renoufbooks.com

Bernan / Rowman & Littlefield

15200 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, EE.UU.

Teléfono: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Correo electrónico: orders@rowman.com • Sitio web: www.rowman.com/bernan

ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Bernan / Rowman & Littlefield

15200 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, EE.UU.

Teléfono: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Correo electrónico: orders@rowman.com • Sitio web: www.rowman.com/bernan

Renouf Publishing Co. Ltd

812 Proctor Avenue, Ogdensburg, NY 13669-2205, EE.UU.

Teléfono: +1 888 551 7470 • Fax: +1 888 551 7471

Correo electrónico: orders@renoufbooks.com • Sitio web: www.renoufbooks.com

FEDERACIÓN DE RUSIA

Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety

107140, Moscú, Malaya Krasnoselskaya st. 2/8, bld. 5, FEDERACIÓN DE RUSIA

Teléfono: +7 499 264 00 03 • Fax: +7 499 264 28 59

Correo electrónico: secnrs@secnrs.ru • Sitio web: www.secnrs.ru

FRANCIA

Form-Edit

5 rue Janssen, PO Box 25, 75921 París CEDEX, FRANCIA

Teléfono: +33 1 42 01 49 49 • Fax: +33 1 42 01 90 90

Correo electrónico: formedit@formedit.fr • Sitio web: www.form-edit.com

INDIA

Allied Publishers

1st Floor, Dubash House, 15, J.N. Heredi Marg, Ballard Estate, Bombay 400001, INDIA

Teléfono: +91 22 4212 6930/31/69 • Fax: +91 22 2261 7928

Correo electrónico: alliedpl@vsnl.com • Sitio web: www.alliedpublishers.com

Bookwell

3/79 Nirankari, Delhi 110009, INDIA

Teléfono: +91 11 2760 1283/4536

Correo electrónico: bkwell@nde.vsnl.net.in • Sitio web: www.bookwellindia.com

ITALIA

Libreria Scientifica "AEIOU"

Via Vincenzo Maria Coronelli 6, 20146 Milán, ITALIA

Teléfono: +39 02 48 95 45 52 • Fax: +39 02 48 95 45 48

Correo electrónico: info@libreriaaeiou.eu • Sitio web: www.libreriaaeiou.eu

JAPÓN

Maruzen-Yushodo Co., Ltd

10-10 Yotsuyasakamachi, Shinjuku-ku, Tokio 160-0002, JAPÓN

Teléfono: +81 3 4335 9312 • Fax: +81 3 4335 9364

Correo electrónico: bookimport@maruzen.co.jp • Sitio web: www.maruzen.co.jp

REPÚBLICA CHECA

Suweco CZ, s.r.o.

Sestupná 153/11, 162 00 Praga 6, REPÚBLICA CHECA

Teléfono: +420 242 459 205 • Fax: +420 284 821 646

Correo electrónico: nakup@suweco.cz • Sitio web: www.suweco.cz

Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, pueden enviarse directamente a:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria

Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530 • Fax: +43 1 26007 22529

Correo electrónico: sales.publications@iaea.org • Sitio web: www.iaea.org/books

Seguridad mediante las normas internacionales

“Los Gobiernos, órganos reguladores y explotadores de todo el mundo deben velar por que los materiales nucleares y las fuentes de radiación se utilicen con fines benéficos y de manera segura y ética. Las normas de seguridad del OIEA están concebidas para facilitar esa tarea, y aliento a todos los Estados Miembros a hacer uso de ellas.”

Yukiya Amano
Director General

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA
ISBN 978-92-0-302117-3
ISSN 1020-5837