

Propuesta para la clasificación de los espacios interiores cerrados por su concentración de ^{222}Rn y las posibles dosis involucradas

Marco Espinoza*, Kety León, Jorge Martínez

Instituto Peruano de Energía Nuclear, Subdirección de Seguridad Radiológica, Av. José Saco km 12.5, Carabayllo, Lima 6, Perú

Resumen

El radón ocasiona más del 50 % de la dosis total del fondo natural de radiación por año. Está ampliamente demostrada su capacidad para inducir cáncer de pulmón en las personas que están expuestas por largos periodos de tiempo a este gas radiactivo. El ^{222}Rn se produce continuamente a partir de suelos, materiales de construcción y minerales del entorno estando presente de manera ubicua en el ambiente que nos rodea. En nuestro país es necesaria una mejor regulación o reglamentación de la concentración de este gas y de las dosis suministradas a las personas en los ambientes cerrados donde permanece la mayor parte de su vida. El Perú tiene una normativa muy simple derivada de una aceptación, sin base experimental propia, de las recomendaciones que emiten entidades internacionales y que responden a realidades muy distintas. En este trabajo se propone una clasificación de los ambientes cerrados de acuerdo con la concentración de ^{222}Rn y las probables dosis involucradas.

Abstract

Radon causes more than 50 % of total dose from natural background radiation per year. It is widely demonstrated the capacity of radon to induce lung cancer in people exposed to this radioactive gas for long periods. Radon emerges continuously from materials that constitute soils, building materials and minerals present in our natural environment, all over the world. In our country, it is necessary to get better regulations to control the exposition of people to this gas inside buildings, dwellings and facilities where people spend their time. Our country has very simple and scarce regulations on this respect. At present, national regulations about radon are adaptations of recommendations and guides published for international organizations but without national studies or statistics to give realistic support to those rules. This work propose a classification for closed spaces where people live and work in this country taking into consideration their ^{222}Rn concentration and probable doses involved.

1. Introducción

El radón ^{222}Rn es un gas noble radiactivo incoloro, inodoro e insípido, que se halla en trazas en el suelo, rocas, agua y aire; que se genera constantemente como producto del decaimiento del ^{238}U , pero principalmente del ^{226}Ra y que tiene un período de semidesintegración de 3,8235 días y por decaimiento alfa (5,590 MeV) dando origen al ^{218}Po y ulteriormente a ^{214}Pb que también son radiactivos. Se sabe que estos últimos, denominados la *progenie* o *las hijas* del radón son sustancias sólidas (micropartículas) que se adhieren fácilmente a las partículas de polvo y pueden entrar a los pulmones de los habitantes o usuarios de los espacios cerrados donde viven, trabajan o transitan [1]. Las partículas alfa que se generan cuando este gas decae hacia ^{218}Po o hacia ^{214}Pb y su posterior decaimiento radiactivo puede ocasionar cáncer de pulmón, situación que se ve agravada cuando en el ambiente hay también

otros agentes químicos tóxicos como el humo del cigarro, por ejemplo [1,2].

El radón y su progenie se encuentran también en las aguas subterráneas y de superficie y es común encontrarlos en agua potable proveniente de esas fuentes. También se encuentran en agua potable de pozos cuyos contenedores emiten o acumulan el radón. El radón en agua puede pasar al aire especialmente cuando el agua se usa para fines domésticos [2, 3]. En consecuencia, es un asunto extremadamente importante para la protección radiológica contra el ^{222}Rn y sus productos de decaimiento que se haga una medición correcta de los niveles de este gas noble dentro de los ambientes donde viven o trabajan las personas y se hace indispensable contar con disposiciones normativas que tomen en cuenta esta protección.

* Correspondencia autor: mespinoza@ipen.gob.pe

Aunque entre los años de 1980 y 2000 se hizo una gran cantidad de estudios a nivel mundial sobre la presencia de radón 222 en el aire, agua, suelos, materiales de construcción, minas, industrias y viviendas [4,5], nuestro país aún no tiene ningún estudio ambiental con resultados concluyentes a nivel nacional que indique los niveles de ^{222}Rn y sus descendientes a lo largo de nuestro territorio; por eso, solo se menciona –en el Reglamento de Seguridad Radiológica vigente en su Anexo IV– que el nivel de actuación para la exposición crónica de radón en viviendas es una concentración media anual de 200 a 600 Bq/m³ de radón 222 en el aire y que el nivel de actuación para una acción reparadora en la exposición crónica a radón en puestos de trabajo es una concentración media anual de 1000 Bq/m³ de radón 222 en el aire [6]. Exactamente los mismos valores que recomendó, tras extensos estudios científicos principalmente en países del hemisferio norte, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR) en 1997 [5].

2. Material y método

Siendo el objetivo principal de este trabajo, presentar una propuesta de clasificación para los ambientes cerrados tomando como base la actividad de ^{222}Rn presente en ellos, hemos revisado los datos publicados en la literatura científica, los hemos contrastado con las condiciones ambientales y laborales de nuestro país y, finalmente, hemos optado por una escala de valores de actividad y de probables dosis derivadas (niveles de referencia) para hacer nuestra propuesta que aparece más adelante.

2.1. Valoración de la información publicada en el Perú sobre el tema

Utilizando un equipo detector Alpha Guard PQ 2000 PRO, debidamente calibrado, el IPEN ha participado de varias campañas de medición de radón en aire y una de ellas, realizada en 2006, dio como resultado los datos de la Tabla 1 (información no publicada, comunicación personal de J. Martínez, coautor de este artículo) valores que se usan como insumo para este trabajo por tratarse de mediciones de ^{222}Rn procedente de materiales de construcción de manufactura nacional, hechas por nuestro grupo de trabajo y que tienen importancia

para estimar los riesgos en las viviendas que se construyen con estos materiales.

Por otro lado, hemos revisado los datos sobre ^{222}Rn en viviendas de Lima Metropolitana [7] del estudio de Pereyra y col., y Gonzáles y col. sobre monitoreo de radón en una zona minera en Macusani, Puno [8]. Pereyra y col., trabajaron haciendo mediciones en 27 Distritos de Lima Metropolitana (Tabla 2, modificada) haciendo mediciones ^{222}Rn en las viviendas seleccionadas utilizando detectores pasivos de Huellas Nucleares (SSNTDs), analizando las huellas nucleares producidas en nitrato de celulosa LR115 Tipo 2 de 112 μm de espesor. El estudio abarcó 97 viviendas durante el año 2014.

2.2. Valoración de información científica publicada en el mundo sobre el tema

Hemos usado como insumos para nuestro análisis algunos trabajos pioneros y otros más recientes en relación con la protección radiológica contra el radón 222 y sus hijas o progenie. Aunque nuestro trabajo no es un meta-análisis de la información epidemiológica disponible, por la gran variabilidad y heterogeneidad de los datos contenidos en los documentos consultados, hemos logrado extraer y comparar datos de diversas fuentes sobre la concentración del radón dentro de las viviendas y centros laborales y ello nos ha llevado a evaluar la situación de la protección radiológica del radón 222 en el país y a proponer una clasificación de los ambientes cerrados tanto laborales como para vivienda en función de su actividad de radón y de las dosis a las que se podrían exponer las personas al permanecer en esos lugares.

El trabajo de J. U. Ahmed [4] nos brinda una comparación de los resultados de la medición de ^{222}Rn en el hemisferio norte en el marco de varios proyectos importantes destacándose los resultados de la United States Environmental Protection Agency (EPA) en la década de 1980, el National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido en 1989 y la investigación realizada en áreas con alto nivel de radiactividad natural como Yangjiang, en China (1972) donde unas 80 000 personas fueron incluidas.

El trabajo de Porstendorfer, J. [9] brinda detalles conceptuales sobre el comporta-

miento del radón, sus efectos en las personas y su comportamiento como elemento natural de la corteza terrestre. También ahonda mucho en los fundamentos de la dosimetría del radón por diversos métodos haciendo hincapié en las consideraciones físicas que se deben tomar en cuenta para el cálculo de las dosis.

El trabajo de A. Canoba y col. [10] por su rigurosidad y extensión sirve como un buen elemento de comparación con nuestro país si tenemos en cuenta que la geología de Argentina debe ser más parecida a la del Perú que la geología de países de Norteamérica u otros continentes con cuyos resultados se han hecho muchas comparaciones y analogías, no siempre adecuadas.

El trabajo de J. H. Lubin y col. [11] es útil para valorar y comparar las mediciones de radón en viviendas versus las mismas mediciones en las minas y su posterior efecto en la inducción de cáncer entre los individuos expuestos. En la discusión de este artículo se brinda detalles sobre la contribución de ese estudio (meta-análisis de ocho estudios

epidemiológicos con más de 4200 personas estudiadas).

2.3. Información relevante para la construcción de la propuesta

En la Tabla 1 se presentan datos no publicados (Martínez, J. 2010) sobre mediciones de radón en los principales materiales de construcción provenientes de la corteza terrestre en nuestro país. La contribución de las arenas fina y gruesa a la dosis estimada por emanación de radón 222 es notoria.

La Tabla 2 presenta los datos obtenidos por Pereyra y col., [7] de la medición de radón en viviendas de Lima Metropolitana. Del promedio de las mediciones obtenidas en 27 distritos se obtiene un valor promedio de 119.56 Bq/m³. En la Tabla 3 se presentan los resultados de la medición de radón-222 en viviendas de 15 países del mundo (13 del hemisferio norte y 2 de Latinoamérica). El valor encontrado para nuestro país parece alto comparado con el de un país geológicamente similar como Argentina (46.5 Bq/m³).

Tabla 1. Resultado de las mediciones de radón en materiales de construcción disponibles en Lima Metropolitana (datos no publicados, Martínez, J., 2010) y las dosis estimadas.

<i>Materiales estudiados</i>	<i>Tiempo de conteo de la muestra (s)</i>	<i>Coficiente de Difusión (m²/s)</i>	<i>Coficiente de Exhalación del ²²²Rn (Bq/m²s)</i>	<i>Working Level (WL)</i>	<i>Working Level Mensual (WLM)</i>	<i>Dosis mensual (mSv)</i>	<i>Dosis anual estimada (mSv)</i>
Ladrillo King-Kong	3600	3,24E-04	0,000457	0,02072	0,02437	0,094563	1,134756
Arena fina	3600	3,78E-04	0,005218	0,20259	0,23835	0,924785	11,09742
Piedra chancada	3600	2,88E-04	0,000247	0,01258	0,01481	0,057444	0,689328
Arena gruesa	3600	3,78E-04	0,002605	0,10114	0,11898	0,461652	5,539824
Ladrillo de techo	3600	3,57E-04	0,000064	0,00265	0,00311	0,012084	0,145008
Cemento verde	3600	6,09E-04	0,000576	0,01389	0,01634	0,063412	0,760944
Cemento blanco	3600	4,27E-04	0,000263	0,00905	0,01065	0,041314	0,495768
Yeso cerámico	3600	2,94E-04	0,000278	0,01389	0,01634	0,063412	0,760944

Tabla 2. Resultados de las mediciones de radón 222 de Pereyra y col., [7] tomados del estudio realizado en 2014 y que es el único estudio cuantitativo sobre contenido de radón en viviendas de Lima Metropolitana.

<i>Número</i>	<i>Distrito</i>	<i>Nº viviendas monitoreadas</i>	<i>Concentración de Actividad Bq/m³(mín)</i>	<i>Concentración de Actividad Bq/m³(máx.)</i>	<i>Concentración de Actividad Promedio (Bq/m³)</i>
1	Ate	2	9	119	64
2	Breña	2	72	162	117
3	Cercado de Lima	7	28	675	248
4	Chaclacayo	2	99	116	108
5	Chorrillos	2	8	75	42
6	Comas	3	57	141	107
7	El Agustino	1	0	0	60
8	Independencia	2	30	45	37
9	Jesús María	3	61	71	65
10	La Molina	3	10	83	45
11	La Victoria	2	50	60	55
12	Lince	2	60	125	92
13	Los Olivos	4	22	75	50
14	Magdalena	4	442	236	128
15	Miraflores	5	57	942	274
16	Pueblo Libre	6	55	268	110
17	Puente Piedra	1	0	0	261
18	San Borja	4	0	305	114
19	San Isidro	1	0	0	110
20	San Juan de Lurigancho	10	38	1095	195
21	San Juan de Miraflores	5	10	387	143
22	San Martín de Porres	8	9	632	145
23	San Miguel	11	7	480	114
24	Surco	2	50	132	91
25	Surquillo	1	0	0	270
26	Villa El Salvador	1	0	0	80
27	Villa María del Triunfo	3	18	148	103

3. Resultados

Después de un análisis de los datos disponibles, bajo las consideraciones de la protección radiológica del público y los trabajadores ocupacionalmente expuestos,

proponemos, en las Tablas 4 y 5, una clasificación de los espacios interiores (ambientes) cerrados de acuerdo con la concentración de ²²²Rn y de acuerdo con las dosis involucradas en tales condiciones.

Tabla 3. Concentración de radón ^{222}Rn en viviendas de 15 países del mundo. Se muestran los datos combinados de países del hemisferio norte [9] y dos países de Sudamérica [7,10].

<i>País</i>	<i>Nº de viviendas</i>	<i>Tipo de Muestreo</i>	<i>Concentración de ^{222}Rn (Bq/m^3)</i>
Bélgica	79	1 año de exposición	41
Canadá	13413	Muestras de pequeño volumen	33
Dinamarca	400	3 meses de exposición	50
Finlandia	8150	1 mes de exposición	90
Francia	765	1 mes de exposición	76
Alemania	5970	3 meses de exposición	49
Irlanda	736	6 meses de exposición	37
Italia	1000	3 - 12 meses de exposición	43
Holanda	1000	4 meses de exposición	29
Noruega	1500	1 semana de exposición	90
Suecia	315	2 semanas de exposición	122
Reino Unido	2300	1 año de exposición	14,5
U. S. A.	352	Varios métodos	61
Argentina	2689	Varios métodos	41,6
Perú	97	7 - 8 semanas de exposición	119,56

Tabla 4. Propuesta de clasificación de los espacios interiores cerrados (para todo uso) de acuerdo a la tasa de dosis asociada a la presencia de ^{222}Rn .

<i>Clase</i>	<i>Dosis ($\mu\text{Sv}/\text{h}$)</i>	<i>Dosis (mSv/a)</i>	<i>Tipo de permanencia</i>	<i>Condiciones reglamentarias</i>
Clase a	< 2.5	≤ 5	Libre acceso para trabajadores (empleados) y público	No se requiere control.
Clase b	$\geq 2.5 < 25$	$> 5 \leq 20$	Libre acceso para trabajadores (empleados) y limitado para el público	Registro de dosis para trabajadores (empleados) Público sólo en tránsito.
Clase c	$\geq 25 \leq 500$	$> 20 \leq 50$	Acceso y permanencia regulada de trabajadores (empleados)	Se requiere estricto control y registro de las dosis. Zona supervisada.
Clase d	> 500	> 50	Acceso y permanencia de personas prohibida. Exposición programada (casos de emergencia)	Acceso no permitido, control permanente de las dosis. Zona controlada.

Tabla 5. Propuesta de clasificación de los espacios interiores cerrados para uso laboral de acuerdo con la concentración de ^{222}Rn estimada en ellos.

<i>Clase de ambiente</i>	<i>Concentración (Bq/m^3)</i>	<i>Condiciones reglamentarias</i>
Clase 1	≤ 100	No requiere control, libre tránsito de trabajadores
Clase 2	$> 100 \leq 300$	Tránsito de trabajadores permitido; acceso público restringido, registro de dosis
Clase 3	$> 300 \leq 1000$	Área vigilada, solo trabajadores, control de la dosis
Clase 4	> 1000	Área controlada, acceso prohibido sin autorización especial

4. Discusión

El riesgo de contraer cáncer por exposición a ^{219}Rn (3,96 s), ^{220}Rn (55,6 s) y ^{222}Rn (3,82 d) y sus hijas o progenie radiactiva, ^{210}Pb (22,3 a) y ^{210}Po (138,4 d), es un hecho absolutamente demostrado desde hace más de 35 años. Los estudios más concluyentes sobre el efecto nocivo del radón en el aire vinieron de los estudios de las poblaciones de mineros en muchos lugares del hemisferio norte [11] y a partir de allí se ha desarrollado mucho conocimiento sobre el efecto del ^{222}Rn y sus descendientes que emergen y se acumulan en los espacios cerrados donde viven o trabajan las poblaciones humanas [12,13].

En la Figura 1 se muestra los dos pasos en los que se genera el aerosol de las hijas del ^{222}Rn . Los radionúclidos que se van generando por decaimiento del ^{222}Rn reaccionan muy rápido (<1s) con trazas de gases y vapores del

entorno y forman diminutos agregados (clústeres) con diámetros de 0.5 a 5 nm. En un segundo momento, estos agregados se adhieren a las partículas ambientales de polvo (aerosoles) en tiempos que van de 1 a 100 s, formando un aerosol radiactivo. El pequeño tamaño de estas partículas hace posible su transporte a través del tracto respiratorio hasta los pulmones donde inician su acción en detrimento de dichos órganos pudiendo –con el tiempo– llegar a ocasionar cáncer. Los aerosoles así formados también pueden depositarse y acumularse sobre el suelo, muebles, techos, árboles, cuerpos de agua, alimentos, etc., complicando aún más la contaminación radiactiva de los ambientes cerrados. Debido a que los niños tienen pulmones más pequeños y respiran más rápido que los adultos, pueden recibir dosis de radiación más altas que los adultos.

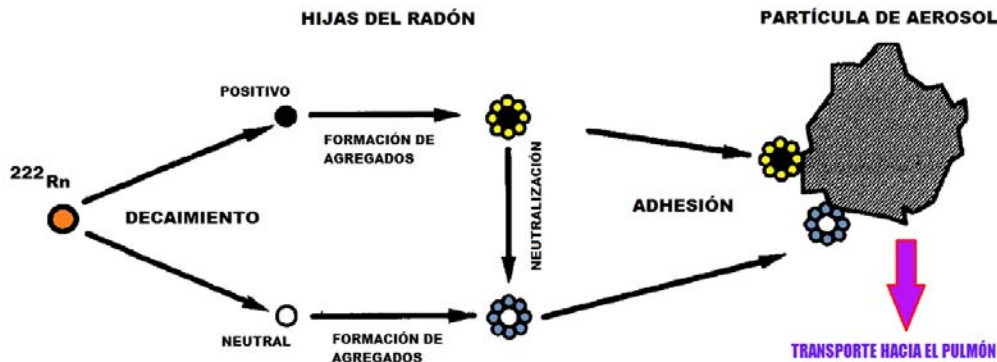


Figura 1. Formación de las partículas de aerosol conteniendo átomos de las hijas del radón que, sobre ese sustrato, serán transportadas hacia el pulmón de las personas que las aspiren del aire. (Figura tomada y modificada de Porstendorfer, J. 1994 [9]).

Los estudios epidemiológicos del radón están en una etapa incipiente en nuestro país. Hasta hoy no se ha hecho un estudio lo suficientemente riguroso, amplio y en un rango de tiempo que permita vislumbrar valores de referencia para concentración de radón en viviendas y edificios públicos representativos del territorio nacional. El trabajo de Pereyra y col. [7], a pesar de haber intentado hacer un muestreo amplio en 27 Distritos de Lima Metropolitana y presentar los datos de mediciones de radón en 97 viviendas, adolece de una falta de análisis estadístico, no expone de manera clara y convincente sus métodos de medición y no acompaña una lista de referencias adecuada. Lo mismo puede decirse de los trabajos de

González y col. [8] sobre los estudios de radón en Macusani, Puno y un segundo trabajo de Pereyra y col. [14] que solo menciona una relación de acciones realizadas por universidades e institutos del Perú entre los años 2012 – 2014, pero sin acompañar una sola referencia bibliográfica consistente ni una tabla de resultados que pueda apuntalar nuestro análisis.

La protección contra el radón es tema de la Protección Radiológica como parte de la cual, el problema de la protección del público ha sido una constante preocupación. La protección radiológica en nuestro país está regulada por la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional y por tanto es ese organismo desde donde debe partir la

iniciativa de una normativa para enfrentar el problema del radón en las casas, con base experimental científica, acorde con las necesidades de la población y de acuerdo con los recientes avances hechos por los países europeos. No existe esa normativa y tampoco se ha asumido ninguna campaña institucional para informar a la población sobre los riesgos, peligros y métodos de protección contra el gas radón y sus hijas radiactivas.

Nuestra propuesta de clasificación de los espacios interiores cerrados (para todo uso) de acuerdo con la tasa de dosis asociada a la presencia de ^{222}Rn (Tabla 4) pretende introducir el concepto que la Protección Radiológica contra el ^{222}Rn y sus descendientes radiactivas debe considerar iguales tanto a los trabajadores ocupacionalmente expuestos así como a cualquier otra población (trabajadores, estudiantes, empleados y familias que viven en espacios interiores cerrados). El radón es un gas que está presente en toda la superficie terrestre permanentemente y ocasiona una cierta cantidad de dosis dependiendo de la localidad, la estación, el clima, los parámetros meteorológicos y las tasas de ocupación de los locales o espacios cerrados por las personas en general. Proponemos una clasificación de los espacios interiores cerrados, cualquiera que sea su uso, de acuerdo con las tasas de dosis ($\mu\text{Sv/h}$ o mSv/h) que se puedan alcanzar como consecuencia de la presencia del radón. La segmentación de los lugares en cuatro clases (a, b, c y d) nos permitirá definir cuatro conjuntos de personas sometidas a rangos de dosis precisos con las que se podría hacer, en el futuro, estudios epidemiológicos del cáncer y poder arribar a conclusiones útiles para mejorar cada vez más la protección de las personas contra este tipo de exposición natural.

La Tabla 5 está dirigida a ser adoptada dentro de la normativa de Protección Radiológica contra el radón y plantea la existencia de cuatro clases de espacios laborales (1, 2, 3 y 4) de acuerdo con la concentración de actividad de radón no solo para los trabajadores con radiaciones, sino también para cualquier tipo de trabajadores que tengan que laborar en los espacios interiores cerrados de cualquier lugar de nuestro país. En esta Tabla también se sugiere la adopción

del valor de intervención de 100 Bq/m^3 que recomienda la OMS y que ha sido recientemente aceptado por el OIEA [13], en vez de 200 Bq/m^3 que recomiendan nuestras normas hoy en día. Asimismo, sugerimos el valor de 1000 Bq/m^3 como límite superior de exposición para personas de cualquier ocupación en espacios cerrados.

Los cálculos hechos a partir de la emanación de ^{222}Rn en los materiales de construcción demuestran que éstos contribuyen con 10 Bq/m^3 a la concentración de actividad en los espacios interiores cerrados, cualquiera que sea su uso. Ese valor es el 25% de la concentración promedio de radón en espacios interiores cerrados del mundo. Si se tiene cuenta que el promedio mundial de concentración de actividad está en alrededor de 40 Bq/m^3 , entonces el radón que entra en los espacios interiores proveniente del suelo es aproximadamente 30 Bq/m^3 . El trabajo de Pereyra y col. [7] deja entender que el promedio de las mediciones efectuadas para el estudio de los 27 distritos de Lima Metropolitana, nos da un valor muy cercano a 120 Bq/m^3 que comparado con el valor promedio para Argentina publicado por Canoba y col. [10], que es de $41,6 \text{ Bq/m}^3$, nos parece demasiado alto. Creemos que nuestro país, aunque ha sido tradicionalmente un país minero, debe tener, en general, un valor de concentración de actividad de ^{222}Rn entre $60 - 100 \text{ Bq/m}^3$. Esperamos poder hacer las mediciones correspondientes para tener los datos fidedignos que nos permitan hacer determinaciones de valores adecuadas y bien fundamentadas.

5. Conclusiones

a. Es necesario planificar y ejecutar una campaña intensa de medición del ^{222}Rn en todo territorio nacional para tener una información científica que nos permita desarrollar acciones de información, sensibilización y protección en favor de la población con un riesgo radiológico real por causa del radón presente en los espacios interiores cerrados donde vive, trabaja o simplemente está la gente.

b. Es necesaria la elaboración de una normativa fundamentada y detallada con datos experimentales adecuados y extensos que sirva para proteger mejor a la población nacional contra el ^{222}Rn y sus hijas

radiactivas.

c. Es conveniente y oportuno contar con algún método o planteamiento para clasificar los espacios interiores cerrados por su concentración de ^{222}Rn y las posibles dosis involucradas, en tanto esto no signifique un encarecimiento del costo de la protección radiológica cuidándose el balance costo-beneficio. Nuestras tablas 4 y 5 son solamente una sugerencia y una aproximación a lo que podría ser la situación real.

d. Por la situación que se viene dando en el mundo, es conveniente la adopción de un valor de intervención de 100 Bq/m^3 para cualquier espacio interior cerrado, tal como recomienda la OMS y el OIEA. El valor de 200 Bq/m^3 que aparece en el Reglamento Nacional de Protección Radiológica es demasiado alto y no hay ninguna base experimental que lo justifique.

e. Es conveniente mantener el máximo nivel de concentración de actividad para los trabajadores ocupacionalmente expuestos a las radiaciones en el valor de 1000 Bq/m^3 .

f. Es necesaria una inmensa labor de información y sensibilización de la población en general sobre el riesgo cotidiano de la exposición al radón.

6. Referencias

- [1] Porstendoerfer J, Urban M, Schmitz J, *et al.* (editors). Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment (EUR-14411). Commission of the European Communities (CEC). 1993.
- [2] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication N° 103. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Traducción oficial al español de la Publicación ICRP N° 103. Editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica; 2007.
- [3] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Radón (Radon). Hoja informativa CAS # 10043-92-2 y 14859-67-7. [Homepage]. 2012. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/substances/toxsubst ance.asp?toxid=71> 2012.
- [4] Ahmed JU. Radon in the human environment: Assessing the picture. IAEA Bulletin. 1994; 2: 32-35.
- [5] Organismo Internacional de Energía Atómica. Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. Colección Seguridad N°115. Viena; 1997.
- [6] Decreto Supremo N° 009-97-EM: Reglamento de Seguridad Radiológica. Instituto Peruano de Energía Nuclear. 20 de mayo de 1997.
- [7] Pereyra PE, López ME, Vilcapoma LP, Pérez BA, Rojas JJ. Mediciones de la concentración de radón 222 en residencias de Lima y Callao – Perú. En: X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica. Buenos Aires, 12-17 de abril 2015.
- [8] González S, Osoreo J, *et al.* Monitoreo de radón en la zona uranífera de Macusani, Región Puno. Informe Científico Tecnológico. 2009; 9:175-177.
- [9] Porstendörfer J. Properties and behavior of radon and thoron and their decay products in the air. J. Aerosol Sci. 1994; 25(2): 219-263.
- [10] Canoba AC, López FO. Mediciones de radón 222 en el interior de viviendas de la República Argentina. Autoridad Regulatoria Argentina. 1° Congreso Americano del IRPA. Acapulco, México, 4-8, Sep. 2006.
- [11] Lubin JH, Boice Jr. JD. Lung cancer risk from residential radon: Meta-analysis of eight epidemiologic studies. J. Natl. Cancer Inst. 1997; 89(1): 49-57.
- [12] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 65. Protection against radon 222 at home and at work. Annals of the ICRP 23 (2), Pergamon Press, Oxford, 1993.
- [13] International Atomic Energy Agency. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. IAEA Safety Standards Series N° SSG-32. Vienna; 2015.
- [14] Pereyra PE, López ME, Gonzales SI, Vilcapoma LP, Pérez BA, Rojas JJ. Monitoreo ambiental de Rn222 en Perú: Logros y perspectivas futuras. Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica, Buenos Aires, 12-17 de abril 2015.