

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**Medición de radón 222 en Lima Metropolitana
utilizando tres tipos de monitores con detectores
de trazas nucleares**

Tesis para optar al grado de
Magíster en Física

Presentada por:

César Jheferson Guevara Pillaca

Asesor:

MSc. Patrizia Edel Pereyra Anaya

Miembros del Jurado:

Dra. María Elena López Herrera
PhD. Daniel Francisco Palacios Fernández
MSc. Patrizia Edel Pereyra Anaya

Lima, Perú

Abril 2019

Dedicatoria

A mis padres:

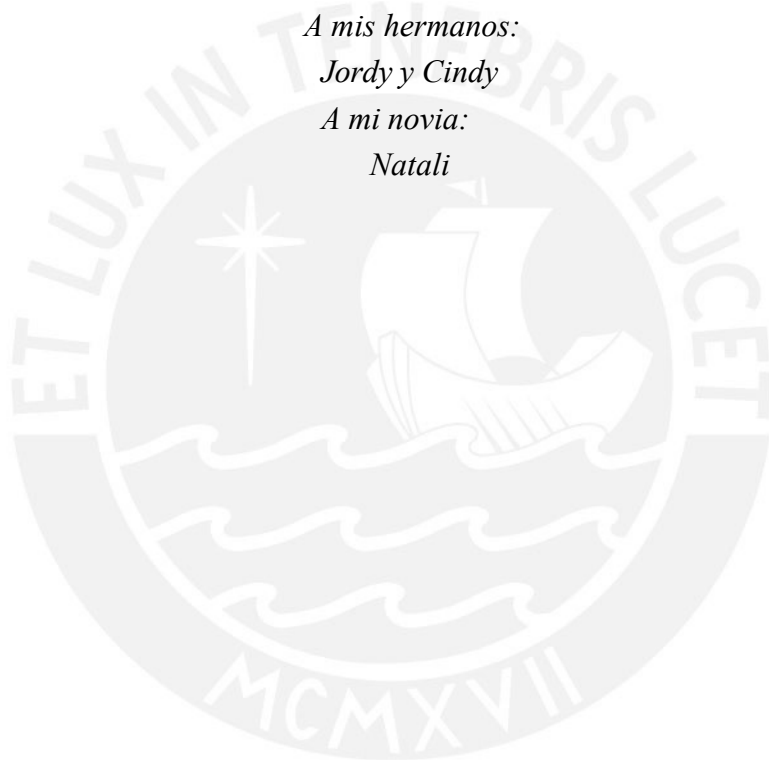
César y Kathy

A mis hermanos:

Jordy y Cindy

A mi novia:

Natali



Agradecimientos

A mi asesor de tesis, MSc. Patrizia Pereyra Anaya, docente de la Sección Física de la PUCP y coordinadora del Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU), por introducirme al apasionante tema del radón y brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico. Por permitirme desarrollar la tesis en el marco del Proyecto Nacional PER9024, por sus valiosos aportes y recomendaciones, así como también haberme tenido toda la paciencia para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

A la Dra. María Elena López Herrera, Directora de la Maestría en Física de la PUCP e investigadora del grupo GITHUNU, por sus valiosas recomendaciones en esta tesis, así como por su constante interés, preocupación y apoyo durante los dos años de estudios.

Al PhD. Daniel Palacios Fernández, docente de la Escuela de Posgrado de la PUCP e investigador del grupo GITHUNU, por sus valiosos aportes para la tesis, basados en su amplia experiencia como investigador en temas de física nuclear y radiaciones ionizantes.

Al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) que en convenio con la PUCP me otorgaron una beca para realizar los estudios de Maestría en Física mediante la subvención N.º 233-2015-2-CONCYTEC-FONDECYT.

A la contraparte del Proyecto Nacional PER9024, "Mediciones de Radón en viviendas en tres regiones del Perú y creación de mapas de Radón para los formuladores de políticas", del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), por la capacitación recibida en los talleres de medición y mapeo de radón con expertos internacionales en el tema, realizados con el financiamiento del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

A todos mis compañeros, investigadores y amigos, que trabajan actualmente en el grupo GITHUNU en temas afines, por sus experiencias, consejos y conocimientos que me brindaron durante todo el tiempo compartido.

A mis padres, ante todo por los valores y consejos que con su ejemplo me formaron como persona. Por todas las oportunidades que me brindaron, que por su incansable esfuerzo me han permitido recibir una buena educación y lograr mis objetivos profesionales.

Resumen

El radón ($Rn-222$) es un gas que se genera a partir de la desintegración natural de átomos de radio ($Ra-226$) presentes en las rocas del suelo. Los átomos de radón que alcanzan los poros del suelo pueden transportarse por difusión y/o convección hacia la atmósfera. La exhalación de radón hacia ambientes poco ventilados, puede provocar el incremento de su concentración. Para medir las concentraciones de radón en interiores se han establecidos diferentes metodologías, en una de ellas se usan detectores de trazas nucleares de estado sólido (SSNTDs por sus siglas en inglés). El Organismo Mundial de la Salud (OMS) ha establecido que el radón es la causa principal de cáncer de pulmón en personas no fumadoras, de allí la importancia su medición. Perú ha adoptado los niveles de referencia de concentraciones de radón en interiores establecidos en normativas internacionales. Con el objetivo de conocer la situación real de los niveles de radón en nuestro país y en el marco del Proyecto Nacional PER9024 "Mediciones de Radón en viviendas en tres regiones del Perú y creación de mapas de Radón para los formuladores de políticas", se midieron las concentraciones de radón en Lima, Arequipa y Puno. Este proyecto fue planteado por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Pontificia Universidad Católica del Perú, con la colaboración de otras instituciones de investigación. En este trabajo se presentan las mediciones de las concentraciones de radón en el interior de viviendas de los distritos de Lima Metropolitana utilizando dos monitores pasivos de radón basados en SSNTDs y cámaras de difusión: monitor G2, implementado por el Grupo de Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y monitor DPR2 marca ALGADE, correspondiente al Proyecto PER9024. En ambos monitores se utiliza como detector el polímero LR-115 (tipo II). Adicionalmente, se colocaron detectores LR-115 (tipo II) en modo descubierto (bare mode) en las paredes de las habitaciones. Las mediciones se realizaron entre los meses de setiembre de 2017 a diciembre de 2018. Los monitores fueron colocados simultáneamente en ambientes del primer piso de las viviendas, por un tiempo mínimo de exposición de 80 días. Todos los detectores LR-115 fueron revelados utilizando condiciones estándares en dos sistemas termostatizados del laboratorio de Huellas Nucleares de la Sección Física en la PUCP; los monitores DPR2 fueron enviados al laboratorio de ALGADE en Francia. Para la lectura de trazas reveladas se

utilizó el sistema automatizado Politrack. Se utilizaron métodos estadísticos para la detección de campos de lecturas con cantidades anómalas de trazas (outliers). Se determinó el factor de calibración para la medición de radón con detectores LR-115, tanto dentro de los monitores G2 como los expuestos en modo descubierto. Finalmente se analizan los resultados de las concentraciones de radón determinadas mediante los monitores G2 y DPR2.



Índice general

Lista de Figurasxiii

Lista de Tablasxvii

1 Introducción

1.1	Antecedentes	1
1.2	Contenido de uranio y torio en el suelo	3
1.3	Programas internacionales de medición de radón	4
1.3.1	Mapa de radón de España	5
1.3.2	Mapa de radón de Irlanda	6
1.3.3	Mapa de radón de Suiza	7
1.4	Objetivos de la Investigación	8
1.4.1	Objetivos generales.....	8
1.4.2	Objetivos específicos	8

2 Protección Radiológica relacionada al Radón9

2.1	Fuentes naturales de Radón.....	9
2.2	Radón y cáncer de pulmón	10
2.3	Marco Normativo sobre el Radón.....	13
2.3.1	Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)	14
2.3.2	ICRP 103: “Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica”	14
2.3.3	Reglamento de Seguridad Radiológica del Perú	15

3 Física del Radón17

3.1	Propiedades fisicoquímicas del radón.....	17
3.1.1	Propiedades físicas	17
3.1.2	Propiedades químicas	18
3.2	Mecanismos de transporte del radón	18

3.2.1	Difusión del radón.....	20
3.3	Radiactividad del radón	21
3.3.1	Estabilidad nuclear y decaimiento radiactivo.....	22
3.3.2	Ley de desintegración radiactiva	26
3.3.3	Partículas alfa y su interacción con la materia	30
3.3.4	Comportamiento de radón, torón y su progenie en interiores	31
4	Técnicas de detección de partículas alfa	35
4.1	Detectores de trazas nucleares	35
4.1.1	Detector polímero LR-115 tipo II	35
4.1.2	Formación de la traza latente	36
4.1.3	Formación de la traza revelada	37
4.2	Método de lectura del detector.....	38
4.3	LR-115 en modo descubierto	39
4.4	LR-115 en cámara de difusión	41
4.4.1	Umbral de decisión.....	43
4.4.2	Límite de detección	44
4.5	Discriminación por método de pinhole	44
5	Metodología	47
5.1	Lugar de medición de concentraciones de radón.....	47
5.2	Procedimiento de grabado de detectores	50
5.2.1	Preparación de la solución alcalina	50
5.2.2	Sistemas de grabado de detectores	51
5.3	Procedimiento de lectura de detectores.....	54
5.4	Tratamiento estadístico de los resultados	56
5.4.1	Test de Chi cuadrado en SSNTD.....	56
5.4.2	Detección de campos anómalos en SSNTD.....	57
5.5	Proceso de calibración de los detectores G2	61
6	Resultados	63
6.1	Caracterización del monitor G2.....	63
6.1.1	Discriminación de torón de la cámara G2.....	63
6.1.2	Calibración de los detectores G2	64
6.1.3	Límite de detección del monitor G2.....	65
6.2	Análisis de las mediciones con el monitor G2	66
6.2.1	Distribución de detectores en Lima Metropolitana.....	66

6.2.2	Evaluación temporal del fondo del monitor G2	68
6.2.3	Análisis de las concentraciones de radón.....	69
6.2.4	Mapa de radón de Lima Metropolitana.....	72
6.3	Mediciones de radón con monitores DPR2 en Lima	74
6.3.1	Mediciones en Lima	74
6.3.2	Comparación de resultados con diferentes monitores	75
6.4	Análisis de las mediciones en modo descubierto	76
6.4.1	Fondo para medición en modo descubierto.....	76
6.4.2	Análisis de las concentraciones de radón.....	76
6.4.3	Estimación del Factor de Equilibrio	78
6.4.4	Estimación del PAEC con detectores descubiertos	79
7	Conclusiones	81
	Bibliografía	83
	Anexo A Instructivos de uso de detectores	91
	Anexo B Tabla de Chi cuadrado reducido	93
	Anexo C Resultados de radón en el Perú	95

Lista de Figuras

1.1	Reporte de concentraciones de U-238 y Th-232 en suelo	3
1.2	Entidades nacionales que pueden participar en un programa del radón	4
1.3	Mapa de radón de España.....	5
1.4	Mapa de radón de Irlanda.....	6
1.5	Mapa de radón de Suiza	7
2.1	Cadenas naturales de desintegración del U-238 y Th-232	10
2.2	Vías para la migración de los radionucleidos liberados al medio ambiente	11
2.3	Dosis efectiva anual (mSv) para la población de Estados Unidos el 2006	11
2.4	Riesgo relativo de cáncer de pulmón de un grupo europeo	13
3.1	Esquema de la producción y generación de radón en el suelo	19
3.2	Representación del transporte del radón en suelo	19
3.3	Promedio de energía por nucleón	23
3.4	Curva de estabilidad nuclear	24
3.5	Modelos de equilibrio secular	29
3.6	Curva de Bragg con relación a la energía residual.....	31
3.7	Vías de ingreso del radón en las viviendas.....	31
3.8	Comportamiento de la progenie del Rn-222 y Rn-220	32
4.1	Ventana de Energía del LR-115 y modelo del daño por la partícula alfa	36
4.2	Modelo y Fases de la formación de la traza para V_t constante	37
4.3	Imagen de trazas en el detector LR-115	38
4.4	Superficies efectivas para el Rn-222, Rn-220 y sus progenies en LR-115	40
4.5	Esquema de evaluación para el Factor de equilibrio.....	40
4.6	Sistema de detección con cámaras de difusión	42
4.7	Umbral de decisión y Límite de detección	43
4.8	Esquema de un sistema de cámara tipo orificio	45

5.1	Mapas de la densidad poblacional de los distritos de Lima Metropolitana .	47
5.2	Detectores para la medición de concentración de Rn-222.....	48
5.3	Posiciones de uso del Monitor DPR2 ALGADE	49
5.4	Esquema del monitor G2 de la PUCP	50
5.5	Sistemas de grabado de detectores del Laboratorio de Huellas Nucleares .	51
5.6	Proceso de grabado de LR-115 en sistema abierto de grabado	52
5.7	Proceso de grabado de LR-115 en sistema cerrado de grabado	53
5.8	Equipo Politrack para la lectura de SSNTD de la PUCP	54
5.9	Proceso de lectura de LR-115 con el equipo Politrack.....	56
5.10	Distribución de chi cuadrado y sus límites	57
5.11	Distribución de trazas en un detector con chi-cuadrado igual a 1	58
5.12	Esquema de un diagrama de cajas	58
5.13	Diagrama de caja de la lectura de SSNTD	59
5.14	Distribución no uniforme de un SSNTD	60
5.15	SSNTD con daño mecánico	60
5.16	Imagen del proceso de intercomparación de MetroRadón.....	61
6.1	Dimensiones de la cámara G2.....	63
6.2	Distribución de los puntos de medición por zonas de Lima Metropolitana .	66
6.3	Número de muestras de Rn-222 por distrito de Lima Metropolitana.....	67
6.4	Distribución de detectores por periodo en las zonas de Lima Metropolitana .	67
6.5	Densidad de trazas y su fondo estimado.....	69
6.6	Comparación de densidades de trazas de los detectores G2.....	70
6.7	Densidad de trazas neta con los monitores G2	70
6.8	Distribución de las concentraciones de Rn-222 medidas con los monitores G271	
6.9	Diagrama de cajas del Logaritmo natural de las concentraciones de radón .	72
6.10	Distribución espacial de los lugares de medición en Lima Metropolitana .	73
6.11	Mapa del promedio de radón en Lima Metropolitana	73
6.12	Distribución de las concentraciones de Rn-222 con monitores DPR2 en Lima	74
6.13	Comparación de concentraciones de radón con monitores G2 y DPR2 . .	75
6.14	Distribución de las concentraciones de Rn-222 en interiores por detectores LR-1115 en modo descubierto.....	77
6.15	Diagrama de cajas del Logaritmo natural de las concentraciones de radón .	78
6.16	Diagrama de cajas del Factor de equilibrio	78
6.17	Diagrama de cajas de PAEC	79
A.1	Indicaciones de uso de LR-115 modo descubierto.....	91

A.2 Indicaciones de uso de los monitores de Rn-222.....	92
C.1 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Arequipa	95
C.2 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Puno	96
C.3 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Cusco	96



Lista de Tablas

2.1	Exposición pública a la radiación natural.....	12
2.2	Niveles de referencia de Radón en el Perú	16
3.1	Propiedades físicas del radón.....	17
3.2	Proceso de emanación de radón y sus factores físicos y experimentales	18
3.3	Coeficientes de difusión de radón para varios medios	20
3.4	Propiedades radiactivas del radón y torón	22
3.5	Energía alfa del radón y su progenie.....	26
3.6	Datos básicos necesarios para calcular los coeficientes k_j	34
6.1	Resultado de discriminación de Rn-220	64
6.2	Detectores utilizados como testigos	64
6.3	Resultados de las lecturas de los detectores de calibración.....	65
6.4	Resultados del umbral de decisión y límite de detección del monitor G2	66
6.5	Relación de detectores para la evaluación del fondo	68
6.6	Estimación de los valores de fondo durante el muestreo	69
6.7	Detectores LR-115 de fondo para modo descubierto	76
B.1	Tabla de Chi cuadrado reducido-Parte I	93
B.2	Tabla de Chi cuadrado reducido-Parte II.....	94

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El descubrimiento del radón inicia a partir del descubrimiento de la radiactividad. En 1895 el físico alemán, Wilhelm Konrad Roentgen, produjo y detectó radiación electromagnética denominándola rayos X [66], por este estudio obtuvo en 1901 el Premio Nobel de Física. Luego en 1896 Antonie-Henri Becquerel, físico francés, mientras realizaba estudios con sales de uranio, accidentalmente descubrió la primera evidencia de radiactividad natural [8]. En los años siguientes los esposos Marie y Pierre Curie, físicos franceses, descubrieron nuevos elementos radiactivos, el polonio y el radio [72]. Posteriormente junto a A. H. Becquerel obtuvieron en 1903 el Premio Nobel de Física.

Durante ese tiempo el físico y químico británico, Ernest Rutherford, realizó muchos experimentos para estudiar las propiedades de la radiactividad, pudo clasificar los distintos tipos de radiaciones que emitía el uranio y estableció los fundamentos teóricos de la radiactividad [49], lo que le valió para ganar el Premio Nobel de Química en 1908. Los estudios realizados por E. Rutherford y F. Soddy demostraron la existencia de un gas radiactivo, creían que se trataba de un nuevo elemento. Impulsado por este descubrimiento Friedrich Ernst Dorn, químico alemán, en 1900 mediante sus propios experimentos descubrió que tanto el torio como el radio producían la emanación de un gas radiactivo. Posteriormente en 1910 el químico escocés Sir William Ramsay y el químico británico Robert Whytlaw-Gray, identificaron al radón (Rn-222). Demostraron que era un gas noble y establecieron su lugar en la tabla periódica [51].

El Comité Científico de las Naciones Unidas en los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR por sus siglas en inglés) mediante su reporte general el año 2008 establece que el promedio de dosis anual por persona es de 3,01 mSv, donde el 80,40% se debe por la exposición a la radiación natural. Siendo una de las principales fuentes de radiación natural

el radón, que al ser un gas ingresa al organismo por inhalación. El promedio de dosis efectiva anual por inhalación de radón es de 1,15 mSv, representando el 47,52% de dosis recibida por radiación natural [85]. El Organismo Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) ha catalogado al radón como la segunda causa de cáncer pulmonar en la población general después del tabaco [89]. Estudios epidemiológicos han demostrado que la incidencia de cáncer pulmonar no solo está relacionada a la exposición al radón, sino también a sus productos de decaimiento [58,81].

Debido al riesgo de la población por la exposición al radón, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés), fundada en 1928, estableció niveles de referencia de concentraciones de radón para el interior de las viviendas y lugares de trabajo que se sugieren no sean superados. Actualmente el nivel de referencia para concentraciones de radón en el interior de las viviendas es de 200 - 600 Bqm⁻³, mientras que para lugares de trabajo es de 500 - 1 500 Bqm⁻³, basado en el número desigual de horas transcurridas en cada lugar [82]. A nivel nacional, el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) en base a los niveles recomendados por la ICRP, ha establecido en el Reglamento de Seguridad Radiológica de 1997 [35] un nivel de concentración media anual de 200 - 600 Bqm⁻³ para la concentración de radón en viviendas y de 1 000 Bqm⁻³ en puestos de trabajo.

Con el interés de conocer los niveles de radón en el Perú, el Grupo de Investigación en Técnicas de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) en el año 2015 implementó el Proyecto (120-PNICP-PIAP-2015) "Desarrollo de un sistema de monitoreo de Rn-222 ambiental mediante la técnica de huellas nucleares en la ciudad de Lima - Perú". Los trabajos de investigación desarrollados en el marco de este proyecto, financiado por el Fondo de Investigación de Ciencia y Tecnología del Perú (FINCyT), lograron establecer los primeros mapas de niveles de radón en interiores de residencias en determinados distritos de Lima [67,88,52,83].

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto Nacional PER9024 "Mediciones de Radón en viviendas en tres regiones del Perú y creación de mapas de Radón para los formuladores de políticas", financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés). En este trabajo se realizó la medición de concentraciones de radón en el interior de viviendas de Lima Metropolitana utilizando dos tipos de monitores, monitor G2 (implementado por GITHUNU) y monitor DPR2 (del Proyecto PER9024), ambos utilizan el detector LR-115 (tipo II). También se midió la exposición de radón con detectores LR-115 (tipo II) en modo descubierto.

1.2 Contenido de uranio y torio en el suelo

Los elementos químicos creados en la gran explosión que le dio inicio al universo se incorporaron en nuestro planeta durante su proceso de formación. En este proceso de formación se incorporaron radionucleidos los cuales se están en la corteza terrestre y se encuentran liberando energía de manera natural en las formaciones geológicas, denominados materiales radiactivos de origen natural (NORM por sus siglas en inglés). También existen actividades realizadas por el hombre que incrementan la exposición a NORM, en estos casos se les denominan materiales radiactivos de origen natural tecnológicamente mejorado (TENORM por sus siglas en inglés) [36].

Con relación al contenido de radionucleidos naturales presentes en el suelo, se han estudiado en 58 países del mundo su contenido de elementos radiactivos presentes en el suelo. Encontrándose U-238, Th-232 y Ra-226, el promedio de su concentración en suelo fue de 37, 33 y 34 Bqkg⁻¹ respectivamente [85]. El contenido en el suelo de estos radionucleidos es de mucha importancia debido a que del U-238 y del Th-232 inician dos cadenas naturales de desintegración radiactiva donde se encuentran el Rn-222 (comúnmente llamado radón) y Rn-220 (comúnmente llamado torón), respectivamente. Además, el Ra-226 también forma parte de la cadena del U-238 y es el radionucleido progenitor del Rn-222.

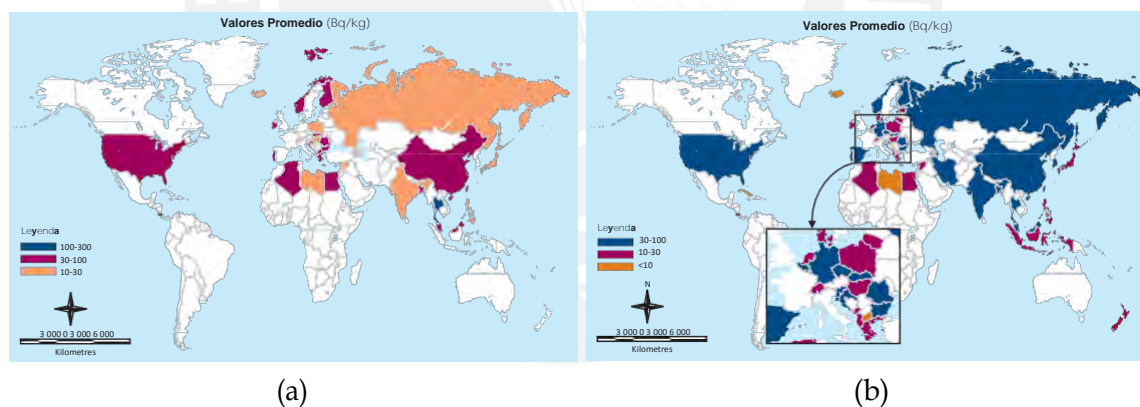


Fig. 1.1 Reporte de concentraciones de U-238 y Th-232 en suelo [85]

a) Concentraciones de U-238 en suelo; b) Concentraciones de Th-232 en suelo

En la Fig.1.1ase muestra el contenido de U-238 en el suelo, la zona territorial con valores promedio de 100 – 300 Bqkg⁻¹ es muy pequeña y la mayor parte de la zona de estudio presento valores promedio de 10–100Bqkg⁻¹, mediante este estudio se estimó que en 1 kg de tierra o suelo puede encontrarse una actividad promedio de 37Bq de U-238.

En la Fig.1.1bse muestra el contenido de Th-232 en el suelo, los valores promedio de su contenido no superaron los 100 Bqkg⁻¹, en comparación con el U-238 el contenido de

Th-232 en el suelo es menor. Y gran parte de la zona de estudio presento valores promedio de concentración entre $30 - 100 \text{ Bqkg}^{-1}$, se estimó que en 1 kg de tierra o suelo puede encontrarse una actividad promedio de 34 Bq de Th-232.

Estos estudios justifican que se considere al suelo como la mayor fuente natural de radiación, no solo por su contenido de U-238, Th-232 y Ra-226 sino porque también son progenitores de otros radionucleidos, como el radón y torón. Los cuales son muy estudiados por su influencia en la dosis por radiaciones ionizantes que reciben las personas [85].

1.3 Programas internacionales de medición de radón

El mapeo de radón en interiores de viviendas es una herramienta valiosa para dibujar la imagen de la exposición por la inhalación de radón y su progenie. La información proporcionada por medio de un mapa es útil como elemento de sensibilización y estratégico para las autoridades y los responsables de formuladores de políticas. También es el punto de partida científico en el diseño de estudios epidemiológicos y otros estudios específicos sobre la exposición a la radiación natural.

Un programa nacional de medición de radón para proteger al público frente a la exposición al radón en interiores requiere la colaboración de entidades nacionales y otras partes implicadas, en la Fig.1.2 se muestra un esquema presentado por la UNSCEAR para la puesta en marcha de un programa nacional de medición de radón.

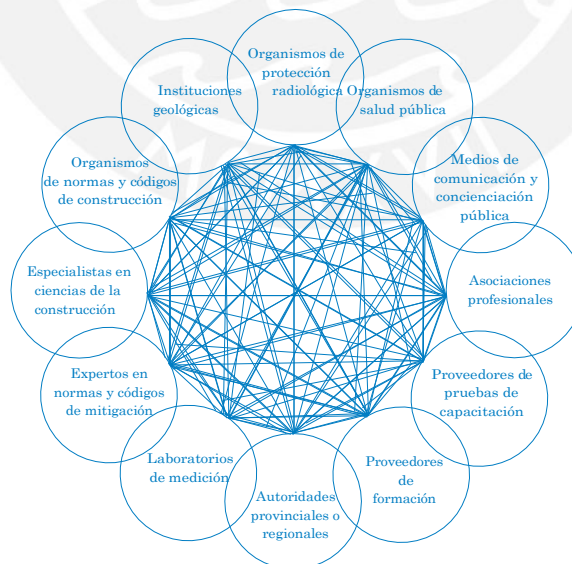


Fig. 1.2 Entidades nacionales y otras partes implicadas que pueden participar en un programa del radón [89]

A continuación, se presentan algunos programas nacionales de medición de radón en el interior de las viviendas en Europa, cada una se realizó con diferente método de medición, celdas de centelleo, detector CR-39 y dispositivos electret, con más de 10 000 puntos de medición.

1.3.1 Mapa de radón de España

En España se realizó una encuesta nacional sobre los niveles de radón en interiores, midiendo la concentración de radón con celdas de centelleo alfa en 1555 casas elegidas al azar. Las mediciones se realizaron durante las temporadas de invierno de 1988 y 1989. Se encontró que la media geométrica de la distribución de los niveles de radón en interiores era $41,1 \text{ Bq m}^{-3}$. Aproximadamente, el 4% de las casas tenían concentraciones de radón superiores al valor recomendado de 400 Bq m^{-3} , sugerido por la Comisión de las Comunidades Europeas y pudieron establecer en qué zonas del país se encontraban los niveles elevados de concentración de radón [69]. El 2014 se presentó un nuevo mapa de radón de España (Fig.1.3), con alrededor de 12 000 mediciones de radón en interiores. Las mediciones se iniciaron a finales de los años ochenta, temporada en la que comenzó el Programa Nacional Español de Radón [76]. Actualmente todavía se siguen realizando las mediciones de radón para actualizar los valores de concentración de radón en el mapa.



Fig. 1.3 Mapa de radón de España [76]

1.3.2 Mapa de radón de Irlanda

Durante los años 1985 y 1989 se midieron las concentraciones de radón en 1 300 viviendas, obteniéndose un valor medio de 31 Bqm^{-3} . Además, los resultados de las mediciones mostraron que el 4% del total de mediciones superaba el nivel de referencia irlandeses (400 Bqm^{-3} para puestos de trabajo y 200 Bqm^{-3} para viviendas y colegios). Durante los años 1992 y 1999 se realizó el Programa Nacional de Radón en Irlanda, tiempo en el que se midieron las concentraciones de radón utilizando cámaras de difusión con detectores CR-39. Logrando mediciones en 11 319 viviendas, de las cuales 993 viviendas superaron los niveles de referencia, obteniendo una media de 89 Bqm^{-3} [25]. Los resultados de este programa nacional se muestran en la Fig.1.4, mapa de riesgo de radón en interiores, este mapa tiene cinco categorías relacionadas con la probabilidad de superar los 200 Bqm^{-3} .

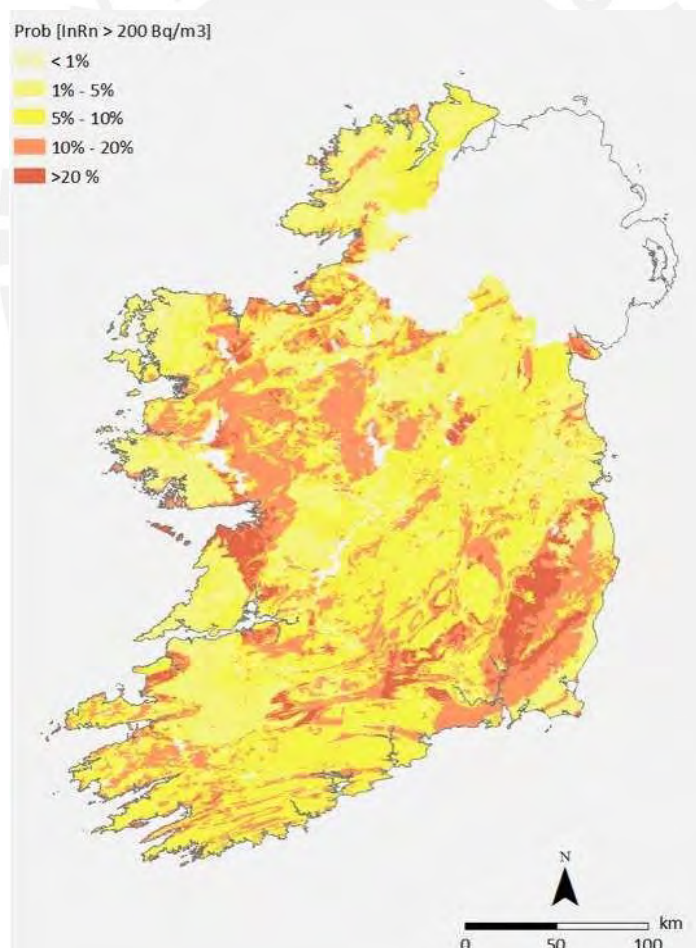


Fig. 1.4 Mapa de radón de Irlanda [23]

1.3.3 Mapa de radón de Suiza

Las mediciones de radón en Suiza se realizaron desde 1994 hasta 2015, dividido en dos etapas y utilizando detectores de trazas nucleares y electret [48]. En la primera etapa se realizó mediciones en todas las regiones dando como resultado el 2009 un mapa de radón de Suiza [6] publicado por la Oficina Federal Suiza de Salud Pública (FOPH por sus siglas en inglés), estableciendo un valor medio (VM) para cada zona, basado en el promedio anual de todas las viviendas medidas. Este mapa estaba categorizado en regiones con concentraciones de radón alta ($VM > 200 \text{ Bqm}^{-3}$), media (VM entre $100\text{-}200 \text{ Bqm}^{-3}$) y baja ($VM < 100 \text{ Bqm}^{-3}$) [89]. En la segunda etapa se realizó la campaña de medición de radón en zonas de alto riesgo (zonas con un $VM > 200 \text{ Bqm}^{-3}$) [6]. Además, el año 2014 M. Palacios et al. [59] propusieron una nueva estrategia para reducir los riesgos para la salud por exposición al radón a un costo aceptable. Se plantearon medidas efectivas como el cumplimiento de las normas de seguridad y la educación de los profesionales de la construcción. Se recomendó que la difusión del conocimiento sobre el radón y sus riesgos debe ser transmitido a personas reconocidas en un grupo social, alcaldes, médicos, sacerdotes y otros, los cuales compartirán la información sobre el radón a la sociedad. El mapa de radón de Suiza actual (Fig.1.5), indica la probabilidad (%) que presenta una zona de exceder el valor de referencia (300 Bqm^{-3}) en una residencia. [6].

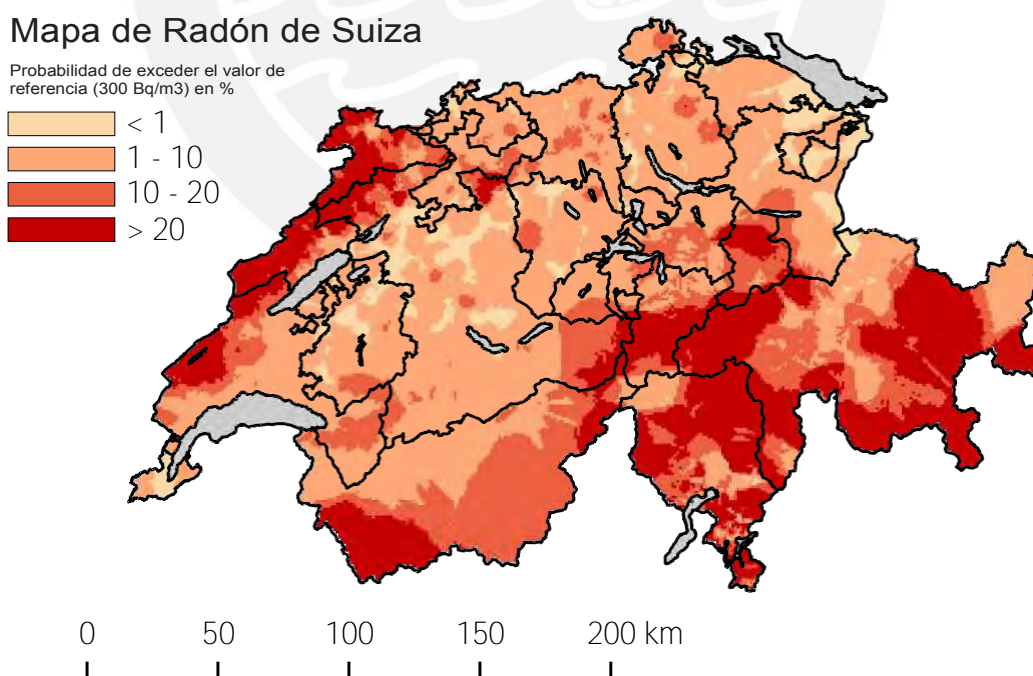


Fig. 1.5 Mapa de radón de Suiza [24]

De acuerdo con los estudios realizados para la elaboración de estos mapas podemos concluir que en base al método elegido para la comunicación de los resultados existen diferentes tipos de mapas. Además, se requiere la mayor cantidad posible de puntos de estudio y se recomienda enfocarse en las zonas que presenten altas concentraciones de radón, por lo cual la elaboración de un mapa de radón de un país toma un largo tiempo de estudio.

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivos generales

- Evaluar y caracterizar el monitor G2 como una cámara de difusión para medir radón.
- Medir las concentraciones de radón en interiores de las viviendas de Lima Metropolitana con el monitor G2.
- Realizar un mapa de radón de los distritos de Lima Metropolitana con las mediciones de los monitores G2.
- Medir las concentraciones de radón en interiores de las viviendas de Lima Metropolitana usando detectores LR-115 en modo descubierto.
- Establecer una relación de las mediciones de concentraciones de radón obtenidas con los monitores G2 y DPR2.

1.4.2 Objetivos específicos

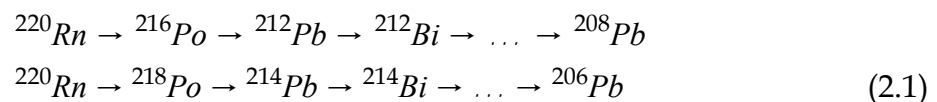
- Determinar la discriminación de torón usando el monitor G2.
- Establecer una calibración apropiada para la medición de radón en interiores usando el monitor G2.
- Estimar el límite de detección para medición de radón usando el monitor G2.
- Estimar el factor de equilibrio experimental usando detectores G2 y descubiertos.
- Estimar el factor de calibración para la medición de radón con detectores descubiertos.

Capítulo 2

Protección Radiológica relacionada al Radón

2.1 Fuentes naturales de Radón

Como se ha mencionado el radón ($Rn-222$) y el torón ($Rn-220$) forman parte de las cadenas naturales de desintegración del U-238 (Fig.2.1a) y Th-232 (Fig.2.1b) respectivamente. La cadena del U-238 presenta 14 niveles de decaimiento hasta terminar en Pb-206. La cadena del Th-232 presenta 10 niveles de decaimiento hasta terminar en Pb-208. Ambos isótopos del plomo son estables [30]. Existe también la cadena del U-235 donde se encuentra el Rn-219, conocido como actinón, la cual termine en Pb-207 [37]. El U-235 está presente en un 0,7% del uranio natural, por lo tanto, la abundancia del Rn-219 en gases por fuentes geológicas naturales es limitada. [5]. Como manera de simplificación de las cadenas naturales que corresponde al radón y torón, en el siguiente esquema se muestran los principales productos de decaimiento de vida corta del Rn-222 y Rn-220.



En la sección 1.2 se estableció que el suelo o tierra es la mayor fuente natural de radiación, por su contenido de U-238 y Th-232, causando la presencia de Rn-222 y Rn-220 en el ambiente. Estos gases originados en el suelo luego de transportarse hacia la atmósfera pueden concentrarse en ambientes cerrados, como el interior de viviendas o residencias. Por lo tanto, un gran porcentaje de la concentración de Rn-222 en el interior de una vivienda se debe al suelo sobre el cual se encuentra construido.

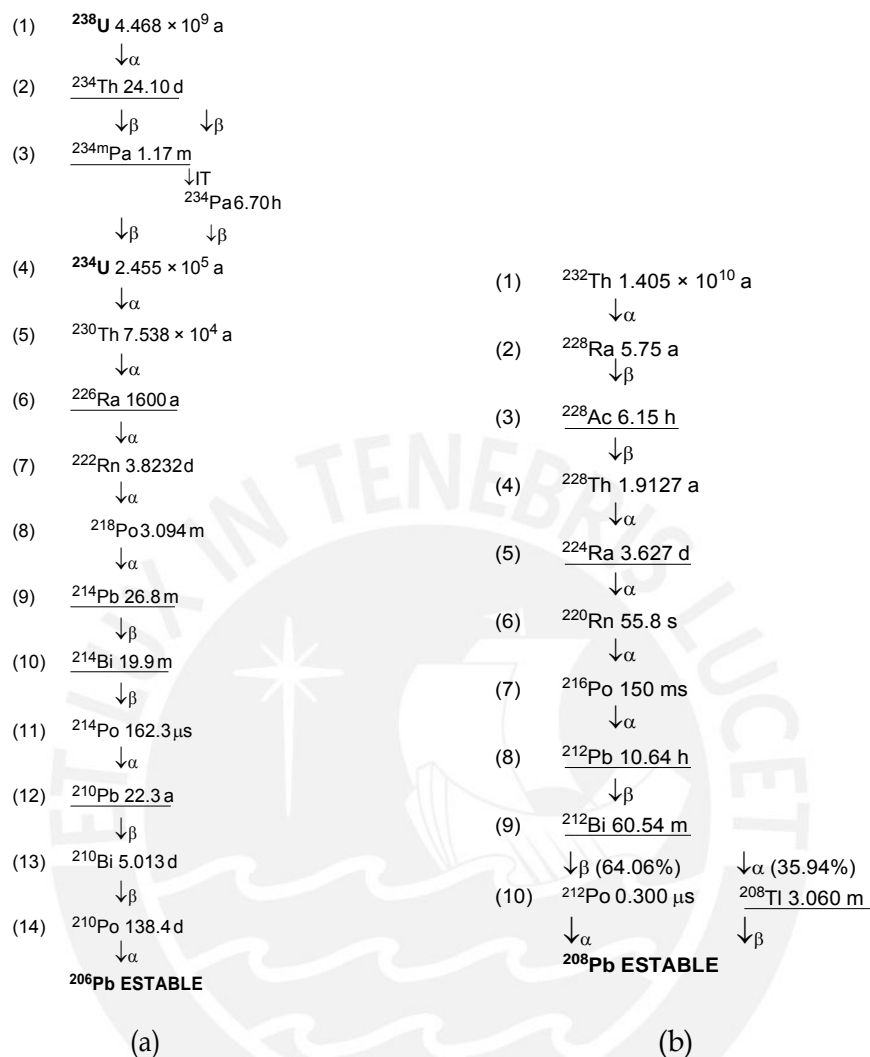


Fig. 2.1 Cadenas naturales de desintegración del U-238 y Th-232 [30]
 a) Cadena natural del U-238; b) Cadena natural del Th-232

Sin embargo, la concentración de radón en el interior de las viviendas depende de diferentes factores como el modelo de la construcción, el estilo de vida, tipos de materiales utilizados en la construcción, entre otros [21]. En el caso del Rn-220, la mayor fuente de este radioisótopo son las paredes de las viviendas [29].

2.2 Radón y cáncer de pulmón

Las personas se encuentran expuestas a diferentes fuentes de radiaciones que pueden ser de origen natural o artificial. Como se mencionó en la sección 1.2 existen materiales clasificados como NORM que contribuyen a la exposición de tipo natural y la exposición artificial creada

por el hombre debido al desarrollo tecnológico [84]. En la Fig.2.2 se muestran los medios de exposición por materiales NORM y TENORM, puede ser mediante la ingestión e inhalación las cuales son acciones biológicas. A diferencia de la exposición a radiación artificial que en gran medida se debe a procedimientos médicos para el diagnóstico de enfermedades.

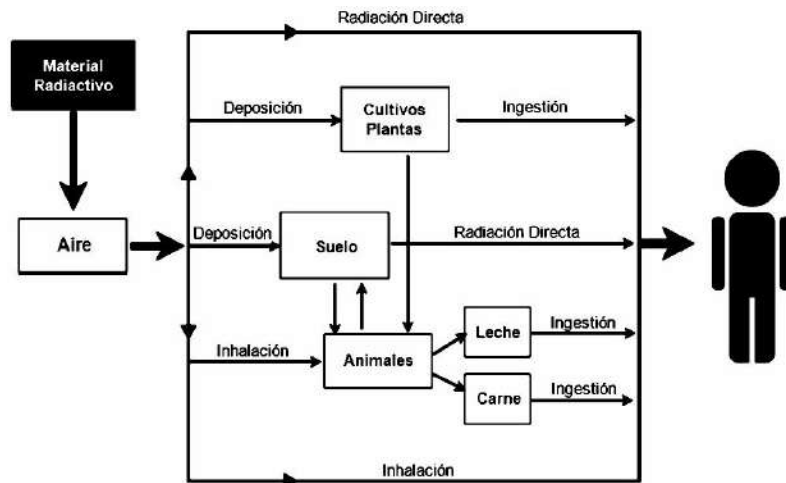


Fig. 2.2 Vías para la migración de los radionucleidos liberados al medio ambiente [22]

La exposición a radiaciones ionizantes causa un efecto perjudicial en los seres vivos, denominado daño biológico, el cual es evaluado mediante un parámetro conocido como dosis. En la Fig.2.3 se presentan los resultados de estudios realizados el 2006 [85] con relación a los niveles de dosis anual en promedio de las personas por diferentes medios de exposición. Puede observarse que la mayor parte de la dosis que reciben las personas se debe al fondo natural, donde se encuentra la exposición a radón y torón [85].

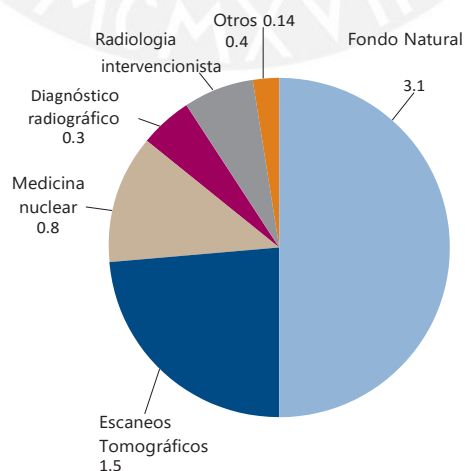


Fig. 2.3 ; Dosis efectiva anual (mSv) para la Población de Estados Unidos el 2006 [85]

Los medios de exposición, tipos de fuentes y valores promedios de dosis efectiva anual por la radiación natural se presentan en la Tabla 2.1. La dosis efectiva es un parámetro dosimétrico que indica el daño causado en un medio biológico, relacionada con los diferentes componentes del organismo (órganos, tejidos y huesos) y el tipo de radiación (alfa, beta, gamma y neutrones).

Tabla 2.1 Exposición pública a la radiación natural [85]

Fuente de Exposición		Dosis efectiva anual (mSv)	
		Promedio	Rango típico
Radiación cósmica	Componente directamente ionizante y fotónico	0,28	
	Neutrones cósmicos	0,1	
	Radionúclidos cosmogénicos	0,01	
	Exposición total cósmica y cosmogénica	0,39	0,3 - 1,0 ^a
Radiación externa terrestre	Al aire libre	0,07	
	En interiores	0,41	
	Radiación externa terrestre total	0,48	0,3 - 1,0 ^b
Inhalación	Series de Uranio y Torio	0,006	
	Radón (Rn-222)	1,15	
	Torón (Rn-222)	0,1	
	Exposición total por Inhalación	1,26	0,2 - 10 ^c
Ingestión	K-40	0,17	
	Series de Uranio y Torio	0,12	
	Exposición total por ingestión	0,29	0,2 - 1,0 ^d
Total		2,4	1,0 - 13

^a Un rango desde el nivel del mar hasta la elevación del suelo

^b Dependiendo de la composición de radionúclidos del suelo y del material de construcción

^c Dependiendo de la acumulación interior de gas radón

^d Dependiendo de la composición de los alimentos y del agua potable

De acuerdo con la Tabla 2.1 la exposición a radón y torón también puede darse por ingestión, aunque la exposición por esta vía es mucho menor que la exposición por inhalación. Sin embargo, se han realizado estudios para la estimación de la dosis en diversos tejidos del cuerpo a partir de la ingestión de radón disuelto en el agua de consumo humano. [60].

Entre los años 1960 y 1970 se realizaron los primeros estudios epidemiológicos por el riesgo a la inhalación de radón y sus productos de decaimientos fueron realizados en recintos mineros, debido al desarrollo de cáncer de pulmón en sus trabajadores [50]. En 1998 la WHO declaró que el radón es un agente que influye en la ocurrencia de cáncer de pulmón en las personas. El desarrollo de cáncer pulmonar por exposición a radón se considera un efecto

estocástico, sin embargo, el riesgo de desarrollar esta enfermedad aumenta a medida que la concentración de radón sea mayor [89].

Los resultados de estudios realizados en Europa (Fig.2.4) sobre el riesgo de sufrir cáncer pulmonar (el riesgo se evaluó con intervalo de confianza del 95%) son la base de los límites de tolerancia establecidos por la ICRP [85]. La WHO propone un nivel de referencia de 100 Bq/m^3 para minimizar los riesgos en la salud por exposición al radón en interiores [89]. Además, se han dado algunas recomendaciones para la reducción de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas ([21], [14]).

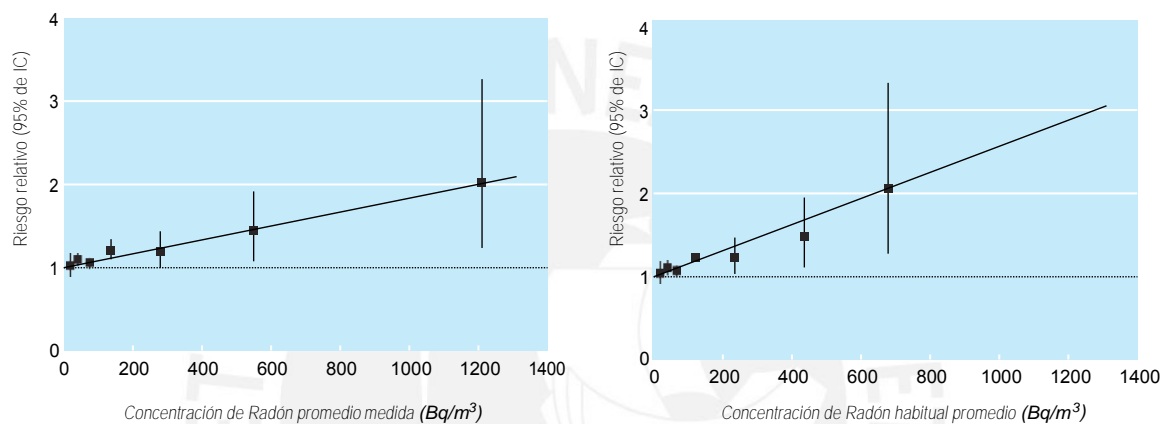


Fig. 2.4 Riesgo relativo de cáncer de pulmón según la concentración promedio de radón residencial medida y la concentración de radón residencial habitual promedio [15]

2.3 Marco Normativo sobre el Radón

En 1957 se fundó el IAEA, como la organización mundial de los “Átomos para la paz”. Fue creada como respuesta a las expectativas por el desarrollo de la tecnología nuclear, con el objetivo de promover y difundir el desarrollo tecnológico nuclear a la sociedad. Es la entidad encargada de regular y controlar las aplicaciones de la tecnología nuclear, las cuales solo deben disponerse para fines pacíficos. El IAEA regularmente publica reportes donde sintetizan los últimos avances en las diferentes áreas de aplicación. Existen también comisiones internacionales, que son organismos gubernamentales sin fines de lucro (ICRP, UNSCEAR), las cuales realizan una evaluación exhaustiva de las últimas investigaciones relacionadas con la exposición por radiaciones ionizantes emitiendo recomendaciones sobre los niveles de exposición y dosis permisibles.

2.3.1 Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)

La ICRP es una organización científica, se estableció en 1928 en el segundo Congreso Internacional de Radiología como respuesta a las crecientes preocupaciones sobre los efectos de la radiación ionizante observada en la comunidad médica. Desde 1977 la ICRP tiene su propia serie de publicaciones en forma de una revista científica, "Annals of the ICRP", donde publican sus recomendaciones en base a las investigaciones publicados de todo el mundo. En los últimos años la ICRP ha publicado en tres ocasiones sus recomendaciones:

- ICRP 26: Publicación 26 (1977) Se cuantificó los efectos estocásticos de la radiación y se propuso un sistema de limitación de dosis sentando las bases conceptuales de la protección radiológica. Estableciendo los tres principios fundamentales de la protección radiológica, Justificación, Optimización de la protección y Límites de dosis [39].
- ICRP 60: Publicación 60 (1991) Es la base de las actuales normas reguladoras, se revisaron las recomendaciones anteriores y se realizaron cambios en los límites de dosis. Además, se extendió su filosofía a un sistema de protección radiológica [40].
- ICRP 103 Publicación 103 (2007) Esta publicación sustituye las recomendaciones anteriores, se han actualizado los factores de ponderación del tipo de radiación y de tejido en las magnitudes dosimétricas. En base a la última información biológica por exposición a la radiación, se actualiza el detrimento que estos producen [41].

2.3.2 ICRP 103: "Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica"

La Publicación 103 de la ICRP, contribuye al nivel adecuado de protección de las personas y del medio ambiente, de los efectos perjudiciales (detrimento) de la exposición a la radiación, sin limitar indebidamente las acciones humanas beneficiosas que pueden estar asociadas a tal exposición.

Los individuos en protección radiológica se clasifican en público, paciente o persona ocupacionalmente expuesta. Los individuos se encuentran expuestos a diferentes fuentes de radiaciones ionizantes, su valor de actividad de estas fuentes nos indica la tasa de desintegraciones radiactivas emitidas. Y su interacción con el individuo se clasifica en irradiación y contaminación [41].

- La irradiación se refiere a la exposición frente a una fuente radiactiva externa, se caracteriza porque la contribución de dosis termina cuando finaliza la exposición a una fuente radiactiva.

- La contaminación por una fuente radiactiva puede ser superficial, cuando hay un contacto directo con la fuente, la exposición del individuo termina al realizarse un procedimiento de descontaminación. O puede ser contaminación interna, debida a la inhalación, ingestión o incorporación por heridas o piel sana. Para el estudio de la exposición por gases radiactivos como el radón y torón, se evalúa la concentración de la actividad presente en un recinto cerrado (Bqm^{-3}).

La exposición a radiaciones ionizantes causa efectos en el individuo, denominado daño. La radiación puede ionizar de manera directa, debido a la interacción entre la radiación con el blanco (célula). O de manera indirecta, causada por los radicales libres los cuales también ionizan el blanco objetivo. Factores como el nivel de dosis recibida, radiosensibilidad del organismo y factores genéticos, influyen en las consecuencias debidas a la exposición a las radiaciones ionizantes [41].

Los efectos causados por exposición a una fuente radiactiva se clasifican como determinísticos y estocásticos.

- Los efectos determinísticos se caracterizan porque poseen un umbral de dosis, se desarrollan por exposición a altas tasas de dosis y respecto al nivel del daño es proporcional a la dosis recibida.
- Los efectos estocásticos no cuentan con un umbral de dosis para su desarrollo, está relacionado con factores hereditarios y su riesgo de desarrollo en las personas está relacionada con el nivel de dosis.

Para desarrollar un mayor grado de conciencia se estableció el principio ALARA, "As Low As Reasonably Achievable", que quiere decir hacer el mayor esfuerzo para reducir la exposición de los individuos dentro de las limitaciones del entorno del trabajo y el costo.

2.3.3 Reglamento de Seguridad Radiológica del Perú

En 1997 fue aprobado el Reglamento de Seguridad Radiológica presentado por el IPEN, con el objetivo de establecer los requisitos fundamentales para la protección contra la exposición a la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación que causan dicha exposición. Su finalidad es la de garantizar la protección del individuo y del medio ambiente por la exposición a radiaciones ionizantes.

Con respecto a la problemática por exposición a Radón, este reglamento establece niveles de referencia para interiores de viviendas y puestos de trabajo. En la Tabla 2.2, se presentan los niveles de referencia para el Radón en el territorio nacional. Sin embargo, estos valores

no corresponden a nuestra realidad ya que son valores tomados por recomendación de asociaciones internacionales.

Tabla 2.2 Niveles de referencia de Radón en el Perú [35]

Radón en viviendas y puestos de trabajo	
1)	El nivel de actuación para la exposición crónica de radón en vivienda es una concentración media anual de 200 a 600 Bqm ⁻³ de Rn-222 en el aire.
2)	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 Bqm ⁻³ de Rn-222 en aire

El nivel de actuación en dependencia de la tasa de dosis o concentración de actividad superan los niveles de referencia, se define si se ejecutaran acciones protectoras o reparadoras.

- Se define como acción protectora a la intervención realizada con el fin de evitar o reducir la dosis de los individuos por exposición crónica.
- Una acción reparadora, se realiza cuando se supera un nivel de actuación específico para reducir la dosis de radiación por exposición crónica.

En el anexo II de este documento de seguridad radiológica se presentan las acciones protectoras y reparadoras.

1. Acciones protectoras urgentes [35]

- Dosis evitable por permanencia en edificios es 10 mSv en un periodo no mayor de 2 días.
- Evaluación temporal para dosis evitable de 50 mSv en un periodo no mayor a una semana.

2. Reubicación temporal o Permanente [35]

- Niveles de dosis optimizadas para el comienzo y termino de la reubicación temporal son 30 mSv y 10 mSv en un mes, respectivamente.
- Si se prevé que la dosis acumulada en un mes no desciende por debajo de este nivel en uno o dos años, o si la dosis proyectada rebasa 1 Sv. durante toda la vida, se debe considerar la reubicación permanente.
- Las dosis consideradas para determinar esta intervención son aquellas causadas por todas las vías de exposición que se evitan con la contramedida, excluyendo los alimentos y el agua.

Capítulo 3

Física del Radón

3.1 Propiedades fisicoquímicas del radón

El radón es un gas noble que se encuentra libre en la naturaleza, su existencia se debe a las desintegraciones de átomos de radio presentes en la corteza terrestre. Es el único elemento radiactivo en estado gaseoso a temperatura ambiente, al ser un gas puede transportarse desde su lugar de origen (suelo) a otros medios gaseosos localizados entre grietas y poros del suelo, su densidad es 7,5 veces mayor que la densidad del aire [14].

3.1.1 Propiedades físicas

El radón en estado gaseoso y líquido es incoloro, sin embargo, en estado sólido presenta una tonalidad rojo-naranja debido a defectos cristalinos ocasionados por la desintegración radiactiva de sus átomos [29]. En la Tabla 3.1 se presentan algunas de las propiedades físicas del radón, dos de las propiedades físicas relevantes en relación con su transporte desde la corteza terrestre, son su punto de ebullición y fusión.

Tabla 3.1 Propiedades físicas del radón [14]

Propiedad	Valor
Punto de ebullición	-61,8 °C
Punto de fusión	-71 °C
Temperatura crítica	104 °C
Presión crítica	62 atm
Densidad a temperatura y presión normal	9,96 kgm ⁻³
Volumen de 27,03 pCi a temperatura y presión normal	1,6 × 10 ⁻²⁰ m ³

El punto de ebullición es la temperatura a la cual puede pasar de estado líquido a gaseoso y depende de la presión ejercida al líquido (presión atmosférica normal, 760 mm de Hg), su temperatura de ebullición es -62°C . El punto de fusión es la temperatura a la cual puede pasar de estado sólido a líquido, esto sucede a una temperatura de -71°C [29].

3.1.2 Propiedades químicas

El radón es un gas noble y se define como gas inerte, sin embargo, a pesar de su inercia química se pueden obtener compuestos químicos, como compuestos de Van der Waals, los cuales no suelen ser muy estables (lábil) [29].

3.2 Mecanismos de transporte del radón

Los átomos de Ra-226 y Ra-224 presentes en la corteza terrestre decaen por emisión de partículas alfa en Rn-222 y Rn-220 respectivamente, que luego de transportarse en un medio sólido pueden alcanzar los poros del suelo con contenido gaseoso. A este mecanismo de liberación se le denomina emanación y en la Tabla 3.2 se detallan los factores que influyen en este proceso.

Tabla 3.2 Proceso de emanación de radón y sus factores físicos y experimentales [77]

Proceso de emanación	Factor Físico
Componente directo	Distribución del radio en granos
Retroceso alfa de las superficies exteriores de los granos	Tamaño y forma del grano
Retroceso alfa de las superficies internas de los granos	Contenido de humedad
Difusión en grano	Presión atmosférica
Componente indirecto	Tamaño del poro exterior
Difusión en los poros interiores de los granos	Tamaño del poro interno
Absorción en las superficies internas de los granos	Daño por radiación
Incrustación en un grano adyacente	Densidad sólida (estructura cristalina y elementos)
Liberación basada en función después de la incrustación	
Factor Experimental	
Propiedades del instrumento (calibración, linealidad, etc.)	
Ambiente del instrumento (temperatura, humedad, presión atmosférica, etc.)	
Propiedades de la muestra (fracturamiento, tamizado, estructura de grano único o agregado, etc.)	
Ambiente de la muestra (humedad, temperatura, vacío atmósfera de helio, lixiviación ácida o alcalina, etc.)	
Espesor del embalaje de la muestra	
Definición de emanación de radón	

Los mecanismos de liberación para Rn-222 y Rn-220 a través de los poros del suelo son muy similares la única diferencia es el tiempo en el cual pueden desintegrarse [74]. En la

Fig.3.1se muestra un esquema del mecanismo de transporte del radón, desde su generación en el suelo, su transporte por los poros hasta su ingreso a edificios.

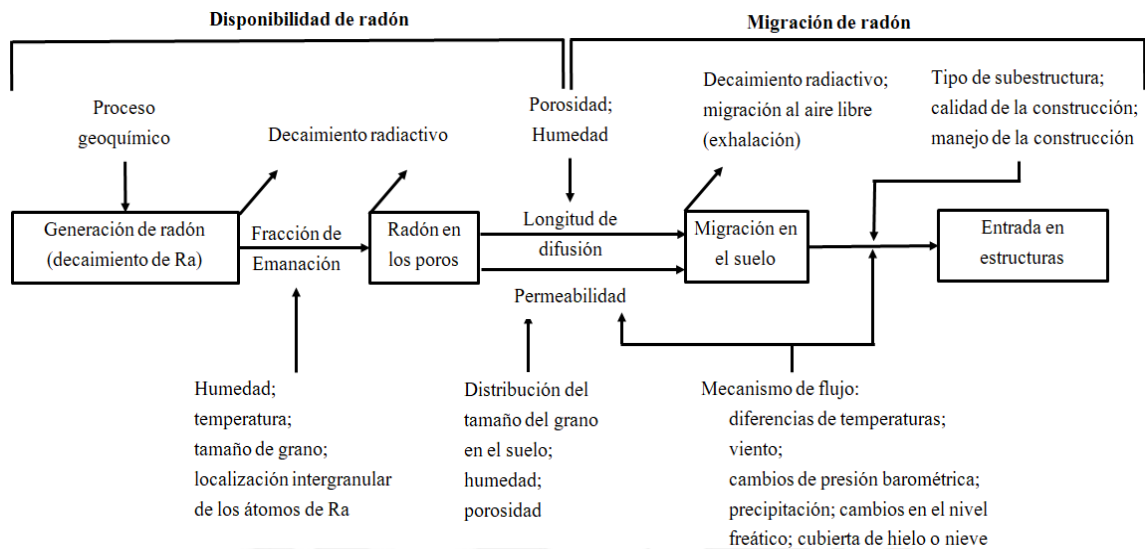


Fig. 3.1 Esquema de la producción y generación de radón en el suelo [61] Representación esquemática de la producción y migración de radón en el suelo y su entrada a una vivienda o edificio

De acuerdo con el esquema de la Fig.3.1 el transporte del radón está relacionado con la porosidad y permeabilidad del suelo. La porosidad del suelo (p), se define como la porción de espacios o cavidades ocupados por compuestos gaseosos o agua en relación con el volumen total. La permeabilidad, es una propiedad de un sistema poroso como el suelo, que permite el paso de un fluido y está definido por el tamaño de los poros y su conectividad (Fig.3.2a).

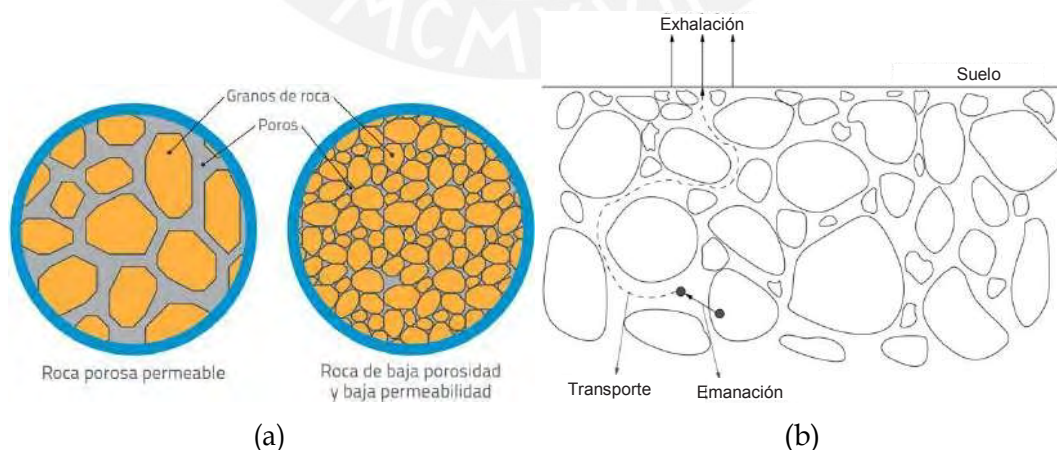


Fig. 3.2 Representación del transporte del radón en suelo
a) Esquema de porosidad y permeabilidad [4]; b) Transporte de radón en el suelo [44]

De acuerdo con [19] si la fuente principal de radón es el suelo se resumen los mecanismos de transporte mediante la Fig.3.2b. Si el radón consigue escapar de los granos del suelo y llega a los poros del suelo se produce el fenómeno de **emanación**. Los átomos del radón que se encuentran en el espacio intersticial son transportados hacia la superficie del suelo mediante **difusión** o **convección** realizando un movimiento tortuoso en tortuoso en el terreno, en dependencia de la porosidad y permeabilidad del suelo. Al llegar a la superficie del suelo, el radón puede ser liberado a la atmósfera, este proceso de liberación de radón se conoce como **exhalación**.

3.2.1 Difusión del radón

El transporte de radón por difusión está gobernado por la primera ley de Fick, ecuación 3.1, la cual relaciona el flujo del fluido a través del área en el medio con su gradiente de concentración [61]. El coeficiente que relaciona estos parámetros se le denomina coeficiente de difusión efectivo, D_e (m^2s^{-1}) su límite superior está establecido por el coeficiente de difusión en el aire libre, D_0 . Según [44] el radón y torón tienen el mismo coeficiente de difusión en aire y agua. En la Tabla 3.3 se presentan los coeficientes de difusión del radón en diferentes medios.

$$\vec{j}_d = -D_e \vec{\nabla} C \quad (3.1)$$

Donde \vec{j}_d es la densidad de flujo difusivo ($\text{Bq m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de actividad de radón por unidad de área, C es la concentración de radón. El signo negativo se debe porque al ser un fluido tiende a transportarse de lugares de mayor a menor concentración, en dirección opuesta a la del gradiente creciente de concentración.

Tabla 3.3 Coeficientes de difusión de radón para varios medios [14]

Medio	Coeficiente de difusión (cm^2s^{-1})	Longitud de difusión (m)
Aire	10^{-1}	2,4
Agua	10^{-5}	
Arena	3×10^{-2}	1,5
Argilita	8×10^{-5}	
Hormigón	2×10^{-5}	0,04-0,26
Minerales cristalinos	$10^{-9} - 10^{-20}$	

El coeficiente de difusión efectivo D_e , se relaciona con la velocidad (ms^{-1}) mediante la ecuación 3.2. Y también se define una magnitud relacionada con la característica difusora

del gas radiactivo, longitud de difusión L (m), mediante la ecuación 3.3. Ambas magnitudes se relacionan con la constante de desintegración radiactiva [29].

$$v = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (3.2)$$

$$L = \sqrt{\frac{D}{\lambda}} \quad (3.3)$$

3.3 Radiactividad del radón

Un átomo está compuesto por electrones con carga negativa que se encuentran en las capas de la nube electrónica que recubre al núcleo. También, tiene protones con carga positiva y neutrones con una carga negativa despreciable, debido a que estos se encuentran en el núcleo se les denomina nucleones. Los átomos se caracterizan por tener un número atómico establecido, número de protones (Z), en el caso de un elemento eléctricamente neutro la cantidad de electrones es igual a la de protones. El número neutrónico es la cantidad de neutrones (N) y a la suma total de nucleones se le denominó número másico (A). Para un elemento X estas cantidades se expresan de la siguiente manera:

$${}^A_Z X; \quad \text{donde } N = A - Z$$

Mediante estas cantidades los átomos se clasifican en: Isótopos, átomos con un mismo número atómico Z ; Isótonos, átomos con un mismo número neutrónico N y en Isóbaros, átomos con un mismo número másico A . En el caso del radón y torón son isotopos con $Z = 86$, y número másico 222 y 220 respectivamente.

Como se ha mencionado anteriormente el radón y el torón son los únicos elementos radiactivos en estado gaseoso a temperatura ambiente, en la Tabla 3.4 se presentan sus principales parámetros radiactivos [44]. Una diferencia fundamental es el parámetro de semivida o periodo de semidesintegración, que está relacionado con el tiempo en el cual decaerá un grupo de átomos. En el caso del torón se encuentra en el orden de segundos, pero para el radón en días. Por lo cual se dificulta la medición directa de torón [14].

La radiactividad es un fenómeno físico mediante el cual los núcleos de algunos elementos, definidos como radiactivos, emiten radiaciones en forma de onda y/o partícula. Las radiaciones ionizantes pueden ser partículas como la radiación alfa " α " (partícula que contiene 2 protones y 2 neutrones), radiación beta " β " (electrones) y neutrones (que se caracterizan por causar ionización indirecta). O también en forma de ondas (fotones) como la radiación gamma (γ) y rayos X (RX), pueden ser RX característicos o RX de frenado. La radiación

Tabla 3.4 Propiedades radiactivas del radón y torón

Parámetro	Símbolo	²²² Rn	²²⁰ Rn
Semivida o Período de semidesintegración	$T_{1/2}$	3,8232 d	55,8 s
Constante de decaimiento	λ	$2,0984 \times 10^{-6}/s$	$1,242 \times 10^{-2}/s$
Energía media de retroceso en la formación	E_r	86 keV	103 keV

gamma y RX son radiaciones electromagnéticas que se diferencian principalmente en su origen, ya que los RX tienen su origen entre las capas atómicas mientras que la radiación gamma es generada por interacciones nucleares. [46]. En este trabajo nos interesa conocer los principales fundamentos relacionados con la interacción entre las radiaciones ionizantes en forma de partícula, radiación alfa, con la materia.

3.3.1 Estabilidad nuclear y decaimiento radiactivo

La unión entre los nucleones se debe a una energía definida como energía de enlace o energía de ligadura, el cociente entre el total de nucleones nos da una idea de su nivel de estabilidad. Se han determinados los valores de las masas del protón ($m_p = 1,007276$ uma), neutrón ($m_n = 1,008665$ uma), electrón ($m_e = 0,000548$ uma) [13] y de todos los isótopos, pudo evidenciarse un fenómeno denominado defecto másico. El defecto másico es un fenómeno que ocurre en los núcleos de los átomos, la suma de las masas de los nucleones por separado da un número mayor a la masa total del núcleo unido se calcula mediante la ecuación 3.4.

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_N \quad (3.4)$$

Donde Δm es el defecto másico (uma), Z es el número de protones, m_p es la masa del protón, N el número de neutrones, m_n es la masa del neutrón y M_N es la masa total del núcleo.

Este fenómeno ocurre debido a que los nucleones para enlazarse transforman una pequeña parte de su masa en energía y así mantenerse unidos [3]. La relación entre la masa y la energía se realiza mediante la ecuación 3.5.

$$E_B = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_N)c^2 \quad (3.5)$$

Donde E_B es la energía de enlace (MeV), es una equivalente energética al defecto másico, usando la ecuación 3.6 se realiza la conversión de unidades [3].

$$E_B = \Delta m \left(\frac{931,5 \text{ MeV}}{1 \text{ uma}} \right) \quad (3.6)$$

A medida que aumenta el tamaño del núcleo la energía de enlace (E_B) necesaria para mantenerlo unido debe ser mayor. Para analizar su estabilidad se utiliza la energía de enlace por nucleón, es la energía en promedio que se le debe entregar al núcleo para poder extraer un nucleón, se calcula dividiendo E_B entre el número total de nucleones A [46]. En la Fig.3.3 se muestra la curva de estabilidad donde los nucleos más estables son el Fe-58 y Ni-62 (metales). En este gráfico puede verse que el radón con un $A = 222$, es más estable que el U-238.

La Fig.3.3, muestra como el U-238 se transforma por emisiones radiactivas en búsqueda de su estabilidad. En la Fig.2.1 se muestran los 14 niveles del decaimiento del U-238 en cada nivel los productos de decaimiento presentan una mayor energía de enlace por nucleón (E_B/A) que se progenitor hasta llegar finalmente a Pb-206 estable.

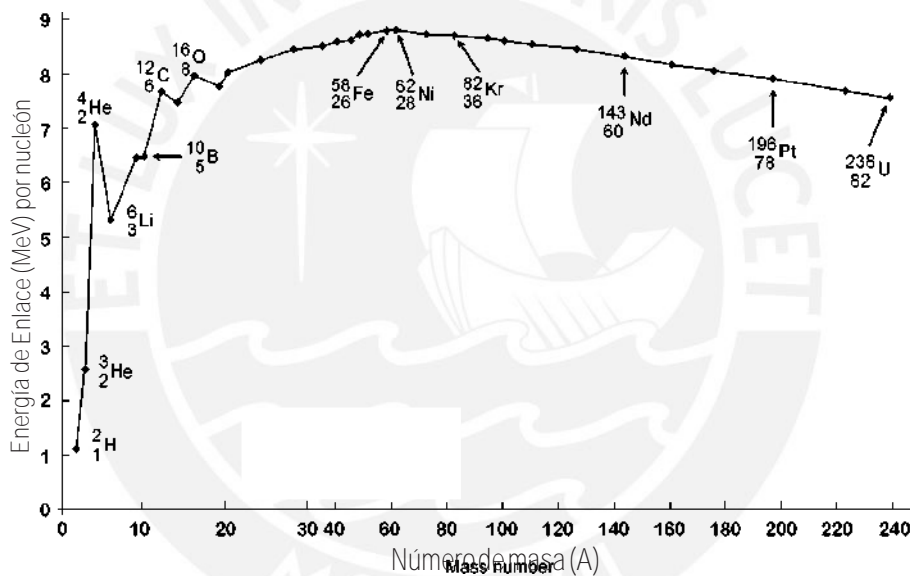


Fig. 3.3 Promedio de energía por nucleón [54]

Dentro del núcleo se producen algunas fuerzas debido a la presencia de los nucleones, como la fuerza de repulsión electrostática o coulombiana y la fuerza nuclear.

- La fuerza repulsiva debido a la interacción entre los protones dentro del núcleo, es ocasionado porque poseen el mismo tipo de carga. Es una fuerza que es considerable aún a grandes distancias ya que es una fuerza de largo alcance.
- La fuerza nuclear es siempre atractiva, es de corto alcance y solo afecta a los neutrones y protones, la fuerza que experimenta un nucleón solo se debe a sus nucleones más cercanos y no a la totalidad de nucleones.

Un núcleo se denomina estable, debido a la estabilidad entre la fuerza nuclear y la fuerza coulombiana. Y un núcleo inestable o radiactiva presenta inestabilidad entre estas fuerzas. Si hay un exceso de protones, la fuerza repulsiva coulombiana es mayor a la fuerza nuclear atractiva lo que produce un núcleo inestable. Si hay un exceso de neutrones produce un desbalance en los niveles de energía internos produciendo inestabilidad [3].

La curva de estabilidad 3.4, en el eje de ordenadas se encuentra el número de protones (Z) y en el de abscisas la cantidad de neutrones (N). Los recuadros negros son los nucleidos estables, se puede ver que cuando los núcleos tienen un número atómico bajo los recuadros negros se encuentran en la recta $Z = N$, estos nucleidos estables tienen igual cantidad de neutrones y de protones. A medida que aumenta el valor de A la curva de estabilidad se aleja de la recta $Z = N$, estos núcleos presentan una mayor cantidad de neutrones. Esta necesidad de tener más neutrones que protones se debe al alto rango de la fuerza coulombiana, cada protón repele a todos los protones del núcleo, mientras que la fuerza nuclear solo interactúa a cortas distancias por lo tanto se necesita una mayor cantidad de neutrones para poder contrarrestar la repulsión coulombiana [46].

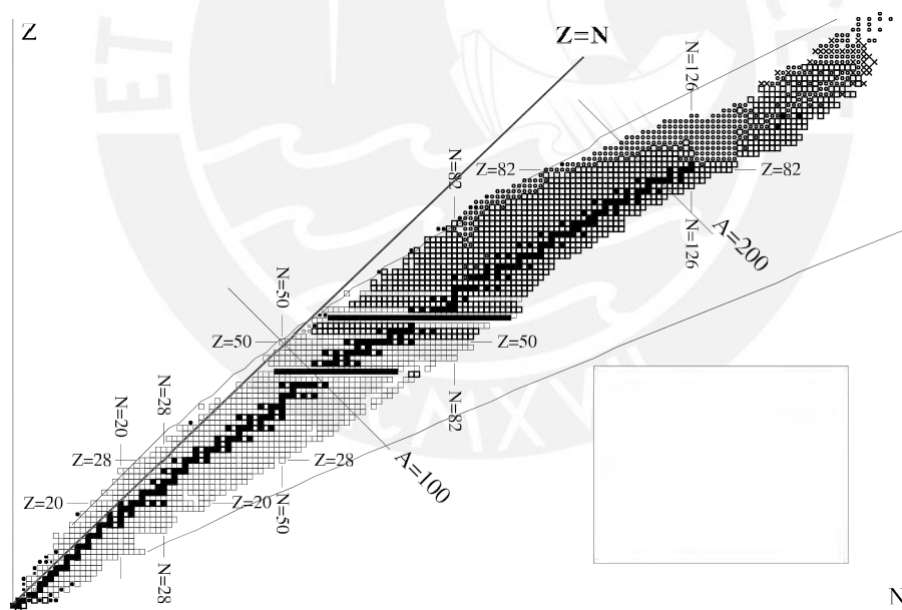


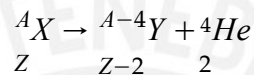
Fig. 3.4 Curva de estabilidad nuclear [7]

Alrededor de la curva de núcleos estables se encuentran los radionucleidos (núcleos inestables), los cuales buscan modificarse para llegar a su estabilidad. Por encima de la curva se tienen los núcleos con exceso de protones, que buscan transformar sus protones en neutrones. Por debajo de la curva se encuentran los núcleos con exceso de neutrones que

intentan convertir neutrones en protones. Estas transformaciones se deben a la búsqueda de su estabilidad. En la parte final de la curva se encuentran los núcleos con exceso de nucleones, que tratarán de emitir partículas o dividirse en dos nucleidos (fisionarse) [7]. Los tipos de decaimiento radiactivo son la radiación alfa, beta (positivo o negativo) y gamma.

Decaimiento alfa

El decaimiento alfa ocurre en núcleos muy pesados frecuentemente en nucleidos con un $Z > 90$, debido a un exceso de nucleones. El núcleo X emite una partícula alfa que está compuesto por dos protones y dos neutrones (es un núcleo de He-4)



Después del decaimiento se conserva la carga total, el núcleo Y puede quedar con una energía mayor (estado excitado) a la del estado de energía mínima (estado fundamental) del nucleido. Entonces puede decaer nuevamente para llegar a su estado fundamental, frecuentemente el decaimiento para llegar desde un estado excitado hasta su estado fundamental se realiza por emisión radiación gamma.

Decaimiento gamma

Es un tipo de radiación electromagnética, que se caracteriza por tener una longitud de onda (λ), la distancia entre los picos (m) de onda; por tener una frecuencia (ν), es el número de ciclos que realiza la onda por unidad de tiempo (s^{-1}). En el espectro electromagnético las radiaciones gamma se clasifican como ondas de alta frecuencia. La energía de la radiación gamma se relaciona con su frecuencia y longitud de onda mediante la ecuación 3.7, donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} \text{Js}$) y c es la velocidad de la luz ($3,8 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) [46].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.7)$$

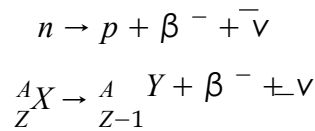
Una característica importante es su comportamiento dual onda-partícula, se le puede considerar como ondas o como un haz de partículas llamados "fotones", estas partículas no tienen masa y viajan a la velocidad de la luz en el medio [3].

Decaimiento beta

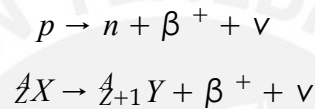
El decaimiento beta es predominante en radionucleidos con un $Z < 90$, puede ser decaimiento beta negativo o positivo. En este decaimiento se emiten partículas denominadas beta ($\beta; \beta^-$)

y partículas elementales, neutrino (ν) y antineutrino ($\bar{\nu}$). De igual manera el núcleo puede quedar en un estado excitado y mediante emisión gamma llegar a su estado fundamental.

Decaimiento beta negativo: Un neutrón se convierte en un protón emitiendo una partícula beta negativo (electrón) y un antineutrino.



Decaimiento beta positivo: Un protón se convierte en un neutrón emitiendo una partícula beta positiva (positrón) y un neutrino.



En la Tabla 3.5 se muestra las principales características radiactivas del Rn-222 y su progenie, los datos han sido recopilados del IAEA.

Tabla 3.5 Energía alfa del radón y su progenie [38]

Padre	T1/2	Decaimiento	Q	Hijo	E alfa (keV)	E beta (keV)
Rn-222	3,8235 d	α (100 %)	$5590,4 \pm 3$	Po-218	$5489,000 \pm 0,300$	-
Po-218	3,098 min	α (99,980 %)	$6114,75 \pm 9$	Pb-214	$6001,140 \pm 0,090$	-
Pb-214	27,06 min	β^{-} (100 %)	1018 ± 11	Bi-214	-	$224,671 \pm 4,742$
Bi-214	19,9 min	β^{-} (99,979 %)	3269 ± 11	Po-214	-	$640,015 \pm 3,297$
Po-214	$164,3 \mu s$	α (100 %)	$7833,54 \pm 6$	Pb-210	$7686,734 \pm 0,070$	-
Pb-210	22,20 a	β^{-} (100 %)	$63,5 \pm 5$	Bi-210	-	$6,080 \pm 0,513$
Bi-210	5,012 d	β^{-} (100 %)	$1161,2 \pm 8$	Po-210	-	$389,000 \pm 0,400$
Po-210	138,376 d	α (100 %)	$5407,53 \pm 7$	Pb-206	$5304,377 \pm 0,070$	-

3.3.2 Ley de desintegración radiactiva

Consideremos una muestra compuesta por una gran cantidad de átomos radiactivos, inicialmente existen una cantidad N_0 de átomos radiactivos, que decaerán por emisiones radiactivas a una cantidad N en un intervalo de tiempo t . Este intervalo de tiempo se dividirá en "n" pequeños intervalos de igual tiempo Δt , con una fracción de desintegraciones por unidad de tiempo, λ . Por lo tanto, para el intervalo de tiempo Δt la fracción de desintegraciones será $\lambda \Delta t$. Luego de un intervalo de tiempo Δt la cantidad de átomos que quedarán será como se muestra en la ecuación 3.8. Para el segundo intervalo de tiempo se consideran los átomos

que quedaron, resultando se muestra en la ecuación 3.9.

$$N_0 - N_0 \lambda \Delta t = N_0(1 - \lambda \Delta t) \quad (3.8)$$

$$N_0 - N_0(1 - \lambda \Delta t) \lambda \Delta t = N_0(1 - \lambda \Delta t)^2 \quad (3.9)$$

Por lo tanto, para "n" intervalos de tiempo la cantidad de átomos que quedarán se muestra en la ecuación 3.10. Este valor se hará más preciso cuanto más pequeño sea Δt , entonces n debería ser infinito 3.11.

$$N_0(1 - \lambda \Delta t)^n = N_0\left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n \quad (3.10)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{\lambda t}{n}\right)^n = e^{-\lambda t} \quad (3.11)$$

Por lo tanto, la cantidad de átomos radiactivos que se tiene luego de un intervalo de tiempo será:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.12)$$

La ecuación 3.12, es conocida como la ley del decaimiento radiactivo. Para un grupo muy grande de átomos radiactivos se define el concepto de un tiempo en el cual quedará la mitad de una cantidad inicial N_0 (ecuación 3.14), conocido como periodo de semidesintegración o semivida ($T_{1/2}$) presentada en la ecuación 3.13 [46].

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (3.13)$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (3.14)$$

La magnitud de actividad está relacionada con la tasa de desintegraciones por segundo 3.15. Mediante la ecuación 3.16 se determina la cantidad de desintegraciones emitidas en función del tiempo emitidas por la desintegración de un grupo inicial de N_0 átomos. La actividad se expresa en unidades de desintegraciones por segundo (*dps*), Becquerel ($1Bq = 3,7 \times 10^{10} dps$) o Curie ($1mCi = 37MBq$) [3].

$$A = \lambda N \quad (3.15)$$

$$A(t) = N_0 \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.16)$$

Transformaciones sucesivas

En una cadena de desintegración los núcleos de elementos radiactivos se desintegran transformándose otros de núcleos hasta llegar a un núcleo estable. Como ejemplo se tiene una cadena de tres elementos, $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, siendo el último el estable. El decaimiento iniciará desde un tiempo $t = 0$, es decir $N_2(0) = N_3(0) = 0$ [26].

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (3.17)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (3.18)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 \quad (3.19)$$

De acuerdo con lo desarrollado en [26], las soluciones de las ecuaciones diferenciales son anteriores son:

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (3.20)$$

$$N_2(t) = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (3.21)$$

$$N_3(t) = N_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} (\lambda_1 e^{-\lambda_2 t} - \lambda_2 e^{-\lambda_1 t}) \right\} \quad (3.22)$$

Debido a su desintegración la cantidad de átomos de la progenie de primer nivel será la expresión de la ecuación 3.21, ya que a medida que se forma por el decaimiento de su núcleo progenitor este también va desintegrándose en N_3 . El número de núcleos hijos pasa por un máximo que se obtiene al hacer $\frac{dN_2}{dt} = 0$ dando lugar a:

$$t_{max} = \frac{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.23)$$

Donde en el instante t_{max} la actividad del padre y de la progenie están equilibrio ideal: $\lambda_2 N_2(t_{max}) = \lambda_1 N_1(t_{max})$. Por lo tanto, para cualquier otro valor de t , utilizando las ecuaciones 3.20 y 3.21, [26] la relación entre la actividad del elemento padre y su progenie queda expresado por la ecuación 3.24. Pudiendo distinguirse tres casos [26]:

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \{1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}\} \quad (3.24)$$

Cuando el " λ " de la progenie es mucho mayor que la del núcleo padre. Como sucede en las cadenas naturales de desintegración este fenómeno se le denomina **equilibrio secular**.

$$\lambda_2 \gg \lambda_1 \quad T_{1/2}^2 \ll T_{1/2}^1$$

Cuando el “ λ ” de la progenie es mayor que la del núcleo padre. Se dice que se alcanza un **equilibrio transitorio**; el cociente de actividades va creciendo lentamente, sin alcanzar una constante como en el primer caso.

$$\lambda_2 > \lambda_1 \quad T_{1/2}^2 < T_{1/2}^1$$

Cuando el “ λ ” de la progenie es menor que la del núcleo padre. El cociente de actividades aumenta en el tiempo mientras que la progenie decae según la ley de desintegración radiactiva. Se considera un **estado donde no hay equilibrio**.

$$\lambda_2 < \lambda_1 \quad T_{1/2}^2 > T_{1/2}^1$$

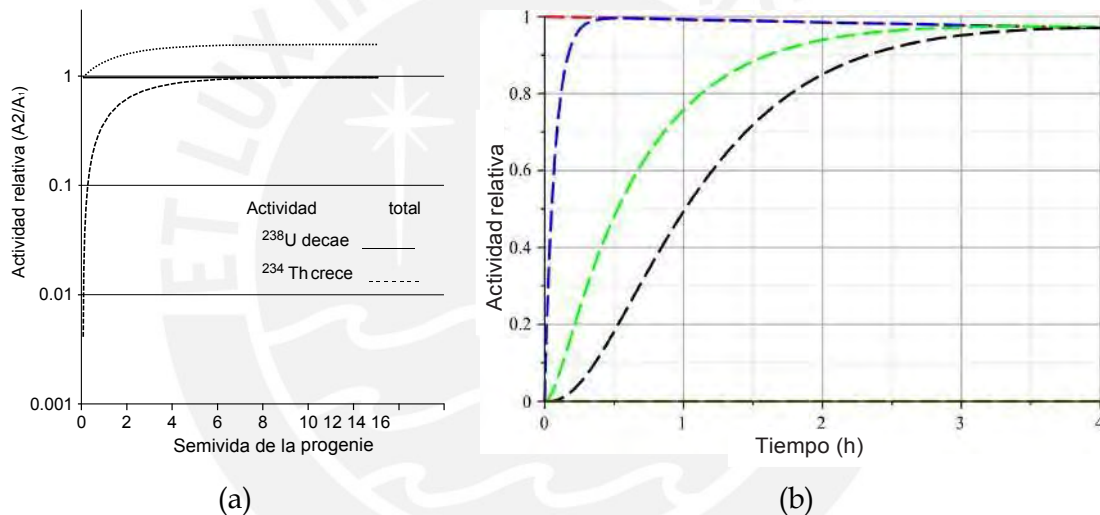


Fig. 3.5 Modelos de equilibrio secular

a) Equilibrio secular entre el U-238 y Th-234 [30]; b) Equilibrio secular de la proporción de actividades de Rn-222 y su progenie [78], Rn-222 (rojo), Po-218 (azul), Pb-214 (verde), Bi-214 y Po-214 (negro), Pb-210 (marrón†)

† Su actividad es aproximadamente cero debido a su tiempo de semivida de 22,2 años

En la Fig.3.5a puede verse que el U-238 y el Th-234 se encuentra en equilibrio secular luego de un tiempo equivalente a 6 vidas medias del Th-234. En la Fig.3.5b, puede verse que para un sistema cerrado con radón y su progenie, el equilibrio secular se establece en aproximadamente 4 horas, excepto para el Pb-210, su actividad se mantiene cerca de 0 para tiempos de muestreo cortos en comparación con su semivida de 22,2 años. Puede verse también que la actividad de Po-214, cuya semivida es de $165 \mu s$, es prácticamente idéntica a la de su progenitor, Bi-214.

3.3.3 Partículas alfa y su interacción con la materia

Poder de frenado

El poder de frenado es un parámetro utilizado para describir de pérdida gradual de energía de la partícula cargada conforme atraviesa un medio. Son partículas con carga positiva debido a los 2 protones que lo conforman y al interactuar con un medio pierden su energía mediante ionizaciones y colisiones [46]. En su interacción con el medio pierden energía debido a ionizaciones hasta detenerse [47]. Esta transferencia de energía debido a su interacción con el medio se estudia mediante la Formula de Bethe-Bloch [3.25], esta fórmula no es válida para partículas de bajas energías, ya que al tener menor energía interactúan con mayor probabilidad con los electrones del medio.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^2 z^2}{m_0 v^2} NZ \left[\ln\left(\frac{2m_0 v^2}{m_I} - \ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2}\right) \right] \quad (3.25)$$

Donde E es la energía cinética de una partícula, Z su número atómico, x es el recorrido de la partícula, e es la carga del electrón y la m_e la masa en reposo del electrón, v su velocidad, NZ número de electrones por unidad de volumen en el material, I es el potencial de ionización del medio y c es la velocidad de la luz en el vacío [47].

Curva de Bragg

A medida que las partículas alfa transfieren su energía al medio que atraviesan, progresivamente disminuye su velocidad. Permite una mayor probabilidad de interacción con los electrones del medio ocasionando que experimente un mayor poder de frenado. Debido a que las partículas alfa son muy masivas, presentan una gran transferencia de energía, causando que sean de corto alcance, inclusive pueden ser detenidas por una hoja de papel. Pueden recorrer unos pocos centímetros en el aire y al no sufrir ninguna perturbación por su interacción con el medio se considera que realizan una trayectoria rectilínea [47].

El poder de frenado en relación con la energía residual de la partícula alfa al atravesar un medio se representa en un gráfico conocido como Curva de Bragg (Fig.3.6). Donde se evidencia el aumento del poder de frenado hasta un punto máximo y luego decae abruptamente debido a que se convierte en un átomo neutro. En esta figura también se puede observar que la curva varía si se trata de un haz de partículas, se debe al fenómeno denominado "straggling".

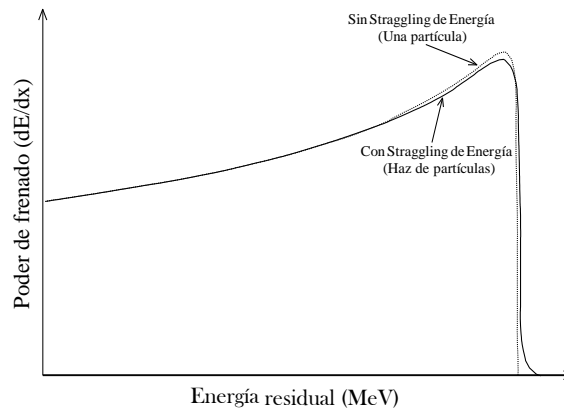


Fig. 3.6 Curva de Bragg con relación a la energía residual [2]

3.3.4 Comportamiento de radón, torón y su progenie en interiores

El Rn-222 ingresa a las viviendas por diferentes vías que facilitan su transporte como pueden verse en la Fig.3.7. Puede transportarse por las grietas en el suelo, grietas en las paredes, uniones de la construcción, mediante las tuberías, cavidades entre las paredes y por los suministros de agua [86]. Mientras que los niveles de Rn-220 en una vivienda dependen principalmente del tipo de material utilizado para la construcción [73].

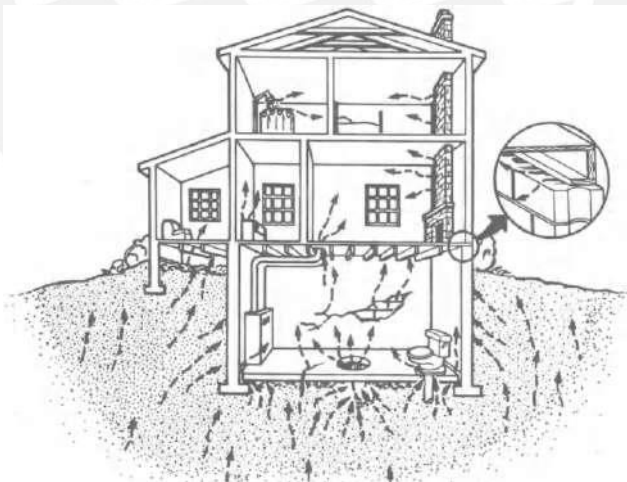


Fig. 3.7 Vías de ingreso de radón en las viviendas [14]

La presencia de radón, torón y sus progenies de vida corta en la atmósfera son los principales contribuyentes en la dosis recibida por la exposición a fuentes naturales. En la Figura 3.8 se muestra la liberación del radón o torón (de color rojo) al aire y como los productos de desintegración se adhieren a las partículas de polvo en el aire. Tanto la progenie

adherida (attached) como las progenies no adheridas (unattached) pueden depositarse en las paredes, techo, piso y muebles dentro de las viviendas [9]. Los productos de desintegración adheridos al aerosol de la atmósfera se generan de dos formas, como puede verse en la Fig.3.8b. Los productos de desintegración del radón recién generados reaccionan muy rápido (<1 s) con gases y vapores de aire convirtiéndose en partículas pequeñas, llamados "clúster" (agrupaciones) o radionúclidos no adheridos con diámetros que van de 0,5 - 500 nm. También pueden formarse "CLUSTER" debido a su unión con partículas de aerosol existentes en la atmósfera en un tiempo entre 1 a 100 s, formando los aerosoles radiactivos [70].

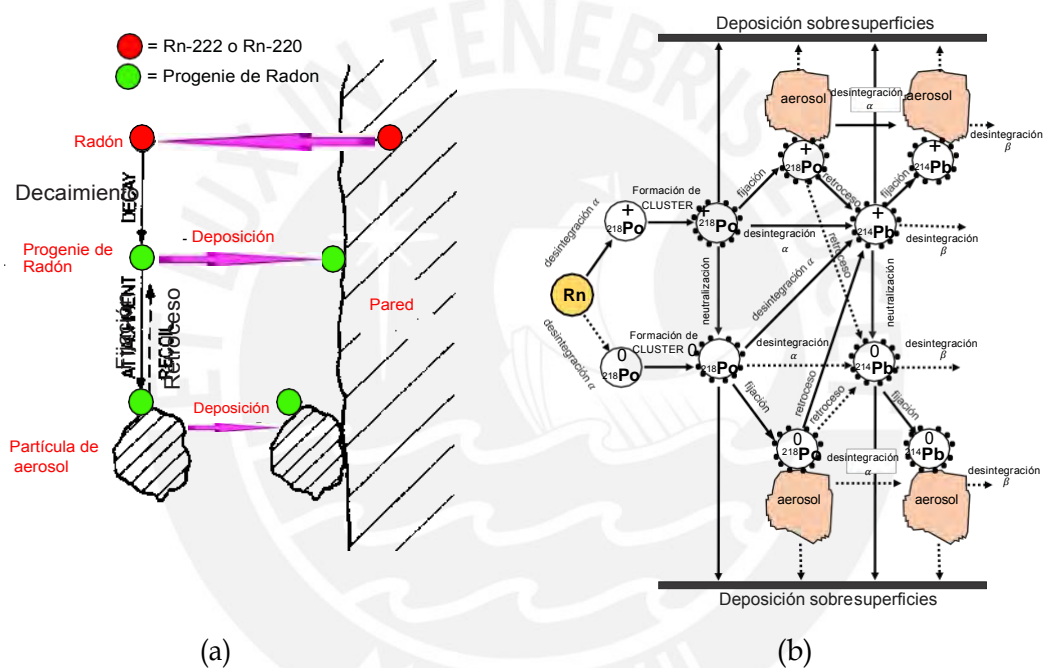


Fig. 3.8 Comportamiento de la progenie del Rn-222 y Rn-220
 a) Procesos básicos del comportamiento de los productos de desintegración en el aire [9]; b) Proceso del Po-218 y Pb-214 en el aire [32]

La concentración de los productos de descomposición de vida corta en el aire se analiza mediante una concentración colectiva que se normaliza a la cantidad de energía alfa debido a una mezcla de los productos de desintegración que estén presentes en el ambiente [84]. Esta cantidad es la Concentración equivalente en equilibrio de productos de desintegración (EEC por sus siglas en inglés). La relación de EEC con la concentración de radón es el factor de equilibrio, que será 1 si el radón y todos sus productos de desintegración están en equilibrio radiactivo, pero para la mayoría de las atmósferas interiores de las viviendas (aire libre) está en el rango de 0,2 - 0,6.

Concentración en energía potencial alfa (PAEC)

La energía potencial alfa para un átomo del descendiente j , E_{pj} (J/átomo), como la suma de energías alfa emitidas durante la desintegración de este átomo hasta alcanzar el Pb-210. La energía potencial alfa por Bq del radionucleido j , de constante de desintegración λ_j , se determina mediante la ecuación 3.26.

$$E_{aj}(J/s^{-1}) = E_{aj}(J/Bq) = E_{pj}/\lambda_j \quad (3.26)$$

Por lo tanto, la concentración en energía potencial alfa (PAEC por siglas en inglés) de una mezcla de concentraciones de descendientes de radón en el aire se expresa en la ecuación 3.27 [82], donde C_j (Bqm^{-3}) es la concentración de progenie j del radón en el aire.

$$PAEC = C_p(J/m^3) = \sum_j C_{pj} = \sum_j E_{aj}C_j \quad (3.27)$$

En el sistema internacional (SI) la unidad de la C_p , es Jm^{-3} . Sin embargo, tradicionalmente se expresa en "Working Level" (WL). Se define un $1 WL = 2,08 \times 10^{-5} Jm^{-3}$ como la concentración en energía potencial alfa de una mezcla de descendientes de radón en el aire que se encuentran en equilibrio con $3700 Bqm^{-3}$ de concentración de radón [61]. De esta manera la relación entre las unidades resulta [82].

$$PAEC(WL) = \frac{C_{eq}(Bq/m^3)}{3700} \quad (3.28)$$

Donde C_{eq} es la concentración equivalente en equilibrio del radón o (EEC).

Concentración equivalente en equilibrio (EEC)

La EEC de una mezcla de descendientes de radón en aire que no están en equilibrio, se define como la concentración en equilibrio radiactivo con sus descendientes que tiene la misma PAEC que la mezcla en desequilibrio. Esta definición lleva a la ecuación 3.29, donde k_{pj} es la contribución en energía potencial alfa del descendiente j .

$$EEC(Jm^{-3}) = C_{eq} = \sum_j k_{pj}C_j \quad (3.29)$$

La EEC para el caso del Rn-222 se muestra en la ecuación 3.30 [84] y para el caso del Rn-220 se presenta la ecuación 3.31 [16], expresada en Bqm^{-3} .

$$EEC(Rn - 222) = 0,105C_{RnA} + 0,515C_{RnB} + 0,380C_{RnC} \quad (3.30)$$

$$EEC(Rn - 220) = 0,913C_{ThA} + 0,087C_{ThB} \quad (3.31)$$

Donde RnA, RnB, RnC, ThA y ThB son las concentraciones de actividad de Po-218, Pb-214, Bi-214, Pb-212 y Bi-212 respectivamente. Los otros productos de decaimiento no se consideran ya que tiene una semivida muy pequeña, como puede verse en la Tabla 3.6 [45].

Tabla 3.6 Datos básicos necesarios para calcular los coeficientes k_j

Nucleido	Index (j)	λ (s ⁻¹)	E _j MeV	E _{pj} MeV	E _{aj} (MeV/s ⁻¹)	k _{pj}
Rn-222	0	2.0997×10^{-6}	5.4895	-	-	-
Po-218	1	3.7880×10^{-3}	6.0024	13.689	3.6139×10^{03}	0.10459
Pb-214	2	4.3110×10^{-4}	-	7.6869	1.7831×10^{04}	0.51604
Bi-214	3	5.8640×10^{-4}	-	7.6869	1.3109×10^{04}	0.37937
Po-214	4	4.2340×10^{-3}	7.6869	7.6869	1.8155×10^{-03}	5.2542×10^{-8}

Los valores de k_{pj} son las contribuciones fraccionarias de cada producto de desintegración a la energía alfa potencial total de la desintegración de la actividad de la unidad del gas. De acuerdo con [84] la *EEC* se puede convertir a *PAEC*, usando las siguientes conversiones.

$$(Rn - 222) 1 Bqm^{-3} = 5,56 \times 10^{-6} mJ m^{-3} = 0,27 mWL$$

$$(Rn - 220) 1 Bqm^{-3} = 7,6 \times 10^{-5} mJ m^{-3} = 3,64 mWL$$

Factor de equilibrio (EF)

El factor de equilibrio (EF por sus siglas en inglés) se define para estimar la exposición en términos de *PAEC* o de *EEC*, basado en las mediciones de la concentración de radón [84]. El *EF* se define como la relación entre *PAEC* real y la *PAEC* que prevalecería si todos los productos de desintegración estuvieran en equilibrio con el Rn-222 [1].

$$EF = \frac{PAEC_{mezcla\ deradonenaire}}{PAEC_{equilibrio}} \quad (3.32)$$

Sin embargo, es más sencillo evaluar este factor en términos de *EEC* por la ecuación 3.33, que puede ser utilizada para el Rn-222 y Rn-220.

$$EF = \frac{EEC}{C_{Rn}} \quad (3.33)$$

Capítulo 4

Técnicas de detección de partículas alfa

4.1 Detectores de trazas nucleares

Existen técnicas pasivas y activas para medir la concentración de radón, torón y sus productos de desintegración en el ambiente. Un método pasivo para medir la concentración de radón en interiores es la técnica de trazas nucleares, la cual consiste en utilizar materiales de estado sólido como detectores (SSNTDs) por sus siglas en inglés) de partículas cargadas. Las partículas causan ionizaciones mientras atraviesan el detector dejando un daño, que puede ser observado luego de un procedimiento de grabado realizado con una solución alcalina. Los SSNTDs más utilizados para la medición de concentraciones de radón son, el polímero LR-115 y el policarbonato CR-39 donde cantidad de daños dejados por las partículas alfa en el detector es proporcional a la concentración de radón del lugar de medición.

4.1.1 Detector polímero LR-115 tipo II

El detector LR-115 (tipo II) es usualmente utilizado para medir las concentraciones de radón en el ambiente. Está compuesto por una base de poliéster de 100 μm de espesor, recubierta con una capa delgada de 12 μm de nitrato de celulosa de color rojo denominado capa activa del detector. Estos detectores registran el paso de las partículas en forma de trazas visibles luego de un procedimiento de grabado y su sensibilidad intrínseca de estos detectores a la radiación depende de los factores ambientales [27].

Una ventaja de este tipo de detector es su modo de almacenamiento, que consiste en cubrir la capa activa con una lámina protectora de manera tal que el espesor de aire entre la capa activa y la lámina sea menor que la distancia mínima necesaria para la detección de partículas alfa. Si las partículas alfa provenientes del radón son emitidas desde distancias muy cercanas a la capa activa del detector, no pueden ser registradas debido a que su energía

no se encuentra dentro de la ventana detectable. Otra ventaja es que se preservan los registros de las mediciones por largos periodos de tiempo bajo condiciones extremas de presión y temperatura [28].

Los detectores LR-115 detectan partículas alfa con energías dentro de un intervalo o ventana (entre 0.8 y 4.5 MeV para condiciones de revelado tiempo de grabado 90 min en una solución alcalina a 10% a una temperatura de 60°C [31]) como puede verse en la Fig.4.1a. Si las partículas inciden con un ángulo mayor que el ángulo crítico [28]. Las trazas reveladas en los detectores LR-115 se observan a través de un microscopio óptico de transmisión como puntos brillantes (si penetran totalmente el detector) por lo que se distinguen más fácilmente de defectos superficiales (daños mecánicos), trazas generadas por partículas alfa con energías fuera de la ventana o con ángulos de incidencia menor que el crítico. Esta condición facilita el procesamiento de lectura de los detectores.

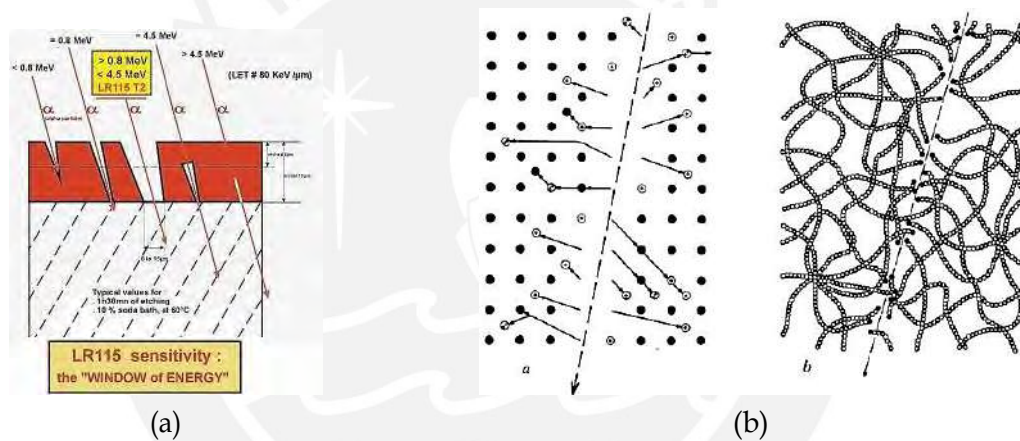


Fig. 4.1 Ventana de Energía del LR-115 y modelo del daño por la partícula alfa
a) Ventana de energía de detección del LR-115 [31], b) Modelo de la punta de explosión iónica [28];

4.1.2 Formación de la traza latente

Se le denomina traza latente a la ruptura de enlaces debido a la trayectoria que realiza la partícula alfa en el detector, causadas por las ionizaciones, el tamaño de la traza latente se encuentra en el orden de Angstrom. Uno de los modelos más aceptados de su formación es el modelo de punta de explosión iónica, que consiste en el desplazamiento atómico en el detector causado por las ionizaciones producto del paso de la partícula alfa. Además, se considera la posibilidad de un reordenamiento electrostático a lo largo de la trayectoria, repeliendo los iones desde sus posiciones originales hacia los intersticios de la red producto de fuerzas coulombianas (Fig.4.1b) [27]. Este modelo explica mejor la formación de la traza

para sólidos cristalinos, pero en el caso de polímeros no considera los efectos de rayos delta o electrones secundarios. Sin embargo, en el caso de los materiales amorfos son de mucha importancia, algunos estudios les atribuyen a los rayos delta un aumento en el diámetro de la traza [52]. Se ha determinado que para el detector LR-115 grabado con NaOH a 2.5N o 10% a una temperatura de 60 °C, establecida mediante un sistema termostatizado, el valor de la velocidad de grabado volumétrico (V_b) es $3,27 \pm 0.08 \mu\text{m}/\text{h}$ [62]. Investigaciones han demostrado que las condiciones de grabado tienen una gran influencia en el espesor residual de los detectores LR-115 [87].

4.1.3 Formación de la traza revelada

Luego de la exposición de los detectores a las partículas alfas se realiza un procedimiento de grabado químico con una solución alcalina (etching), para aumentar el tamaño de las trazas latentes. La solución realizará un desgaste en las superficies del detector, siendo la capa activa la más sensible a este procedimiento. En el detector hay regiones que estarán debilitadas debido a las ionizaciones de las partículas alfa, ocasionado que su desgaste se realice con mayor facilidad que en las regiones donde no ha interactuado la partícula alfa [27]. Los estudios con relación al procedimiento de grabado de detectores de trazas nucleares establecieron los conceptos de velocidad de grabado másico o volumétrico (bulk etching velocity: V_b) y la velocidad de grabado a lo largo de la traza latente (track etching velocity: V_t), los cuales que dependen de las condiciones de grabado.

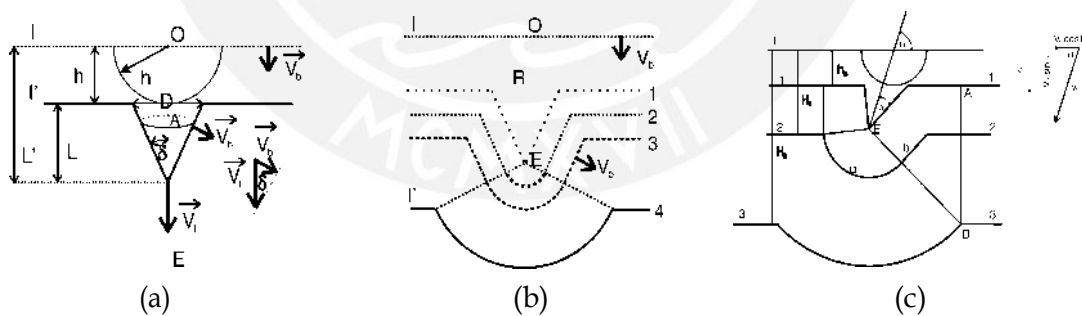


Fig. 4.2 Modelo y Fases de la formación de la traza para V_t constante [63]
 a) Modelo geométrico de la formación de la traza revelada, b) Incidencia perpendicular de la partícula alfa; b) Incidencia oblicua de la partícula alfa

En la Fig.4.2 se muestra un caso ideal en el que impacta una partícula alfa de manera perpendicular en la superficie del detector. Donde **I** es la superficie inicial del detector, **I'** es la superficie después del grabado químico, **O** es punto de ingreso de la partícula, **E** es el punto final del recorrido de la partícula, **D** es diámetro de la traza formada después del

grabado químico, L es la profundidad de la huella latente, L' es la profundidad de la traza grabada después del ataque químico, la distancia OE es el rango recorrido por la partícula en el detector y la distancia h entre I y I' es el espesor residual de la capa de activa.

En la Fig.4.2b se presenta las fases del revelado de la traza para una incidencia perpendicular, iniciando en una fase cónica (curva 1), luego pasa a la fase de transición (curva 2 y 3) donde se forma una esfera alrededor del punto E , punto final de la traza latente, debido a que las velocidades de revelado se igualan y la fase esférica (curva 4). En la incidencia oblicua (Fig.4.2c), la primera fase se forma en el contorno de la superficie una elipse (curva 1), luego la fase de transición (curva 2) y la fase esférica (curva 3), en la cual la abertura es totalmente circular [28]. Diferentes autores tienen propuestas similares respecto a las ecuaciones que describen la morfología de la traza revelada, las cuales presentan algunas constantes que están relacionadas con el sistema y método de grabado [27].

4.2 Método de lectura del detector

Para conocer el número de partículas alfa registradas por el detector, luego de haber pasado por un proceso de grabado, se utiliza un microscopio. Estas trazas se observan como pequeños orificios luminosos, con diámetros de mayores a $1\ \mu\text{m}$, ubicadas donde impactó la partícula alfa. Permitiendo contarlas y, por lo tanto, cuantificarlas con precisión [31] como puede verse en la Fig.4.3. El color rojo se debe al color de la capa activa del detector, existen métodos de lectura semiautomáticos para el procesamiento de imágenes, los cuales realizan ajustes para realizar una mejor identificación. Así mismo, existen equipos automáticos de lectura que realizan el conteo de las trazas mediante la conversión a una imagen en escala de grises, estos equipos permiten realizar lecturas en varios campos del detector en un menor tiempo.



Fig. 4.3 Imagen de trazas en el detector LR-115 (Imagen propia del autor)

Se define el concepto de densidad de trazas, es el número de orificios o trazas registradas en un área de lectura (el tamaño de esta dependerá del instrumento). Por lo tanto, la densidad de trazas de un detector se determina mediante la ecuación 4.1.

$$\rho = \frac{1}{NA} \sum_{i=1}^N T_i = \frac{T}{NA} \quad (4.1)$$

Donde ρ es la densidad de trazas del detector (trazascm⁻²), T_i es la cantidad de trazas registradas en el i -ésimo campo, A es el tamaño del campo de lectura definida por el instrumento (cm²), N el número de campo observados y T es el número total de trazas contabilizadas.

La incertidumbre de la densidad de trazas se calcula mediante la ecuación 4.2, donde $\sigma(T)$ es la desviación estándar del total de trazas contabilizadas,

$$u(\rho) = \frac{\sigma(T)}{A \sqrt{N}} \quad (4.2)$$

El número de campos de lectura se determina basado en el error relativo ε_r requerido. Se considera que la distribución de las trazas en un detector debe cumplir con una distribución de Poisson [90], debido al carácter estadístico de los fenómenos radiactivos. El número de campos se determina mediante la ecuación 4.3, donde \bar{T} es el promedio de trazas contadas en 10 campos de visión.

$$N = \frac{1}{\varepsilon_r^2 \bar{T}} \quad (4.3)$$

4.3 LR-115 en modo descubierto

Este método consiste en utilizar un detector SSNTD (ej. LR-115) expuesto directamente a la atmósfera del lugar de medición. En este método se detectan las partículas alfa del decaimiento del Rn-222, Rn-220 y sus progenies. El Rn-222 y su progenie en el aire se relacionan mediante un parámetro, denominado Factor de equilibrio (EF) y su valor se encuentra entre 0,3 a 0,6 (estudios han demostrado que para el detector LR-115 de la marca Kodalpha el factor de equilibrio en promedio tiene un valor de 0,4). Al igual que los dosímetros de tipo cerrado, también los resultados de los dosímetros de tipo descubierto determinan la concentración promedio de radón (Bqm^{-3}) [31].

Para el caso del detector LR-115 en modo abierto expuesto a la atmósfera registra trazas debido a las partículas alfa del Rn-222, Rn-220 y sus progenies. Estudios realizados [20] establecen regiones de influencia para las partículas alfa del Rn-222 y su progenie (Fig. 4.4a) y Rn-220 y su progenie (Fig. 4.4b), denominadas como superficies efectivas. Los cuales son regiones donde deben encontrarse los átomos para poder ser registradas por el detector.

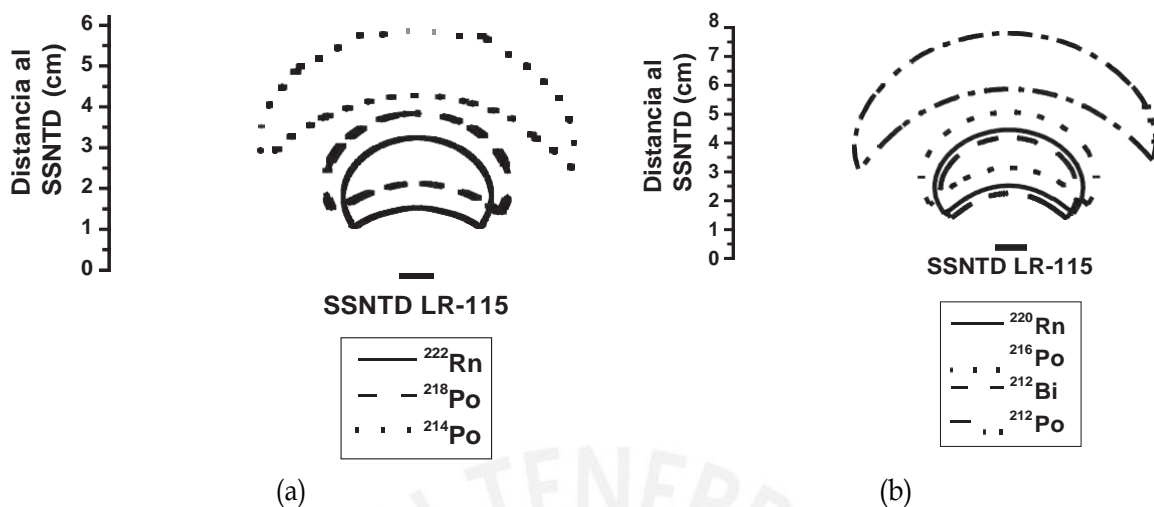


Fig. 4.4 Superficies efectivas para el Rn-222, Rn-220 y sus progenies [20]
 a) Superficies efectivas para el Rn-222 y su progenie; b) Superficies efectivas para el Rn-220 y su progenie

El factor de equilibrio (EF) se puede determinar de manera experimental, mediante mediciones simultaneas (en paralelo) utilizando las concentraciones de radón medidas con un detector tipo descubierto (LR-115) y un monitor tipo cerrado (LR-115 monitor). El factor de equilibrio (EF) se puede estimar usando la Fig.4.5, la cual es un esquema que corresponde a las especificaciones técnicas del detector LR-115 marca Kodalpha [31].

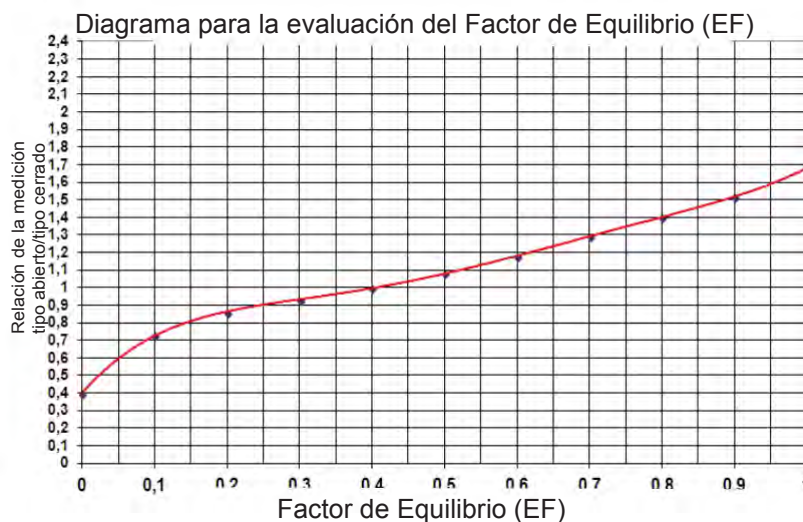


Fig. 4.5 Esquema de evaluación para el Factor de equilibrio [31]

El factor de calibración para el caso de un detector descubierto se determina mediante la ecuación 4.4, en la cual se ve influenciado por todos los átomos radiactivos presentes en

el ambiente. Donde, ρ_{Bi} (trazascm^{-2}) es la densidad del i -ésimo detector LR-115 en modo descubierto expuesto a una concentración de radón, ρ_{Bbi} (trazascm^{-2}) es la densidad de trazas del i -ésimo detector de testigo (detector no expuesto) y C_i (Bqm^{-3}) es la concentración de los i -ésimo átomo radiactivo presente en el ambiente (Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Rn-220, Po-212, Bi-212). Utilizando la expresión que relaciona y t (h) es el tiempo de exposición

$$F_{C-B} = \frac{\sum_i \rho_{Bi} - \sum_i \rho_{Bbi}}{\sum_i C_i t} \quad (4.4)$$

Considerando que las concentraciones de los átomos radiactivos de estado sólido se originan por las concentraciones de sus progenitores (Rn-222 y Rn-220) en el ambiente y utilizando la definición del Factor de equilibrio (EF), el factor de calibración para un detector en modo descubierto se determina por la ecuación 4.5 ([20], [88]).

$$F_{C-B} = \frac{\bar{\rho}_B - \bar{\rho}_{B_b}}{[C_{Rn-222}(1 + 2EF_{Rn-222}) + C_{Rn-220}(1 + 2EF_{Rn-220})]t} \quad (4.5)$$

Debido a que la concentración de Rn-220 se debe únicamente a la contribución de los materiales de construcción y que en comparación con el Rn-222 es cantidad menor, se discriminará la influencia del Rn-222 y su progenie, como antecedentes se tiene los estudios realizados por [88], [52], [83]. La ecuación que describe el factor de calibración ($\text{trazascm}^2/Bqm^{-3}h$) para el detector en modo descubierto quedaría de la siguiente forma:

$$F_{C-B} = \frac{\bar{\rho}_B - \bar{\rho}_{B_b}}{C_{Rn-222} t (1 + 2EF_{Rn-222})} \quad (4.6)$$

4.4 LR-115 en cámara de difusión

Una cámara para medición de Rn-222 es un dispositivo que lleva dentro un SSNTD, este dispositivo permite que el Rn-222 presente en el ambiente donde se encuentre colocado ingrese y se almacene en su interior. El paso del Rn-222 al interior del dispositivo se realiza por el mecanismo de difusión, ya que al encontrarse en un ambiente con una concentración de Rn-222 este gas buscará ingresar al interior del dispositivo, por eso se le denomina cámara de difusión.

Mediante este método las trazas registradas por el detector solo se deberán al decaimiento del Rn-222 y a su progenie que se encuentre dentro. La concentración de Rn-222 en un ambiente está relacionada proporcionalmente con el número de trazas registradas, dando como resultado un valor promedio de la concentración de radón en el ambiente estudiado,

debido a que este dispositivo realiza una medición de la concentración de Rn-222 integrada, es decir las fluctuaciones de la concentración de Rn-222 no pueden ser registrados método.

Existen cámaras de difusión que cuentan con un filtro, en dependencia del tipo de filtro puede permitir el ingreso solo el Rn-222 y Rn-220, pero no de la progenie radiactiva que al ser sólidos quedarán en la superficie del filtro. O puede solo permitir el ingreso de Rn-222 y no del Rn-220. También existen cámaras de orificio o "Pinhole", que consiste en una cámara de plástico cilíndrica con un orificio que permiten el paso del Rn-222, basado en el corto tiempo de semivida del Rn-220 y en el bajo coeficiente de difusión en el aire de la progenie de vida corta.

En 2004, Eappen diseñó un sistema que contaba con dos cámaras, una cámara de tipo filtro, en el interior contaba con un filtro de fibra de vidrio y las trazas formadas se debían a los gases de radón y torón. Una cámara de tipo orificio o "pinhole" permitiendo el paso solo del Rn-222, discriminación del Rn-220. Y un detector tipo descubierto fuera del sistema (Fig.4.6). Logrando las mediciones de las concentraciones de Rn-222, Rn-220 y la contribución de sus progenies de vida corta [20].

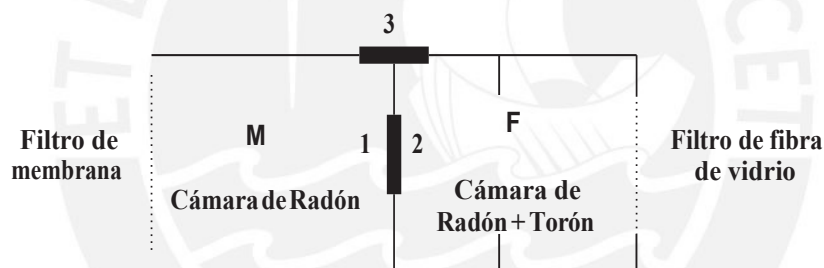


Fig. 4.6 Sistema de detección con cámaras de difusión [20]

Los números 1, 2, 3 corresponden a las ubicaciones de los detectores LR-115

Según [43], la concentración promedio de actividad de radón (Bqm^{-3}) medida utilizando una cámara de difusión se determina mediante la ecuación 4.7, donde ρ es la densidad de trazas del detector expuesto a una concentración de radón, $\bar{\rho}_b$ densidad de trazas de detectores no expuestos, F_C ($trazasc m^2/Bqm^{-3} h$) es el factor de calibración.

$$\bar{C}_{Rn-222} (Bqm^{-3}) = \frac{\rho - \bar{\rho}_b}{t F_C} = \frac{\rho_{neto}}{t F_C} \quad (4.7)$$

La incertidumbre de la concentración de Rn-222 se determina utilizando los conceptos de propagación de errores [68], discriminando la incertidumbre debido al factor de tiempo. Finalmente queda expresando en la ecuación 4.9.

$$u(\bar{C}_{Rn-222}) = \frac{\partial \bar{C}_{Rn-222}}{\partial \rho_{neto}} u(\rho_{neto}) + \frac{\partial \bar{C}_{Rn-222}}{\partial F_C} u(F_C) \quad (4.8)$$

$$u(\bar{C}_{Rn-222}) = \frac{u(\rho_{neto})}{t F_C} + \frac{\rho_{neto}}{t F_C^2} u(F_C) \quad (4.9)$$

4.4.1 Umbral de decisión

El umbral de decisión (C^*) de una medida cuantifica si el valor medido se debió al fenómeno físico de estudio. Es un valor que excedido por un valor determinado C , permite llegar a la conclusión que el resultado obtenido se debió al fenómeno físico y si esto no sucede entonces el efecto físico no ha ocurrido [71].

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, aunque se concluya que no se presentó el fenómeno físico de interés siempre habrá una probabilidad α de que se haya tomado una decisión incorrecta y que el fenómeno físico si pudo haberse dado.

Como puede verse en la Fig.4.7 el umbral de decisión (C^*) y el límite de detección ($C^\#$) se definen como la parte derecha de $1 - \alpha$ y la izquierda de $1 - \beta$ de los cuantiles de la función de probabilidad, derivada de la teoría Bayesiana de la decisión, para un $\bar{C} = 0$ y $\bar{C} = C^\#$ [71].

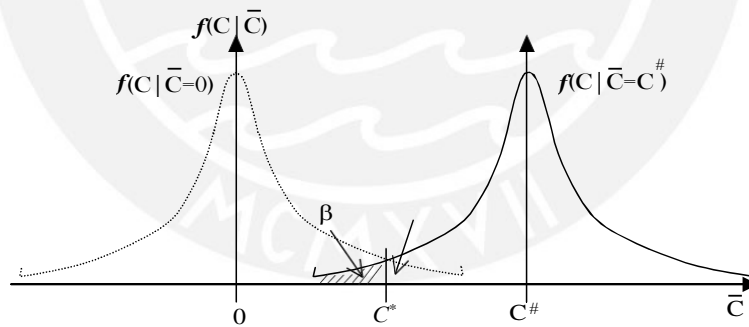


Fig. 4.7 Umbral de decisión y Límite de detección (Elaboración propia)

Si C es el resultado de la determinación primaria de una medida, este valor será significativo solo si el valor de la medición es mayor de cero ($\bar{C} > 0$). El resultado de la determinación primaria de una medida C debe ser mayor que el umbral de decisión (C^*) y se define mediante la ecuación 4.10 [71].

$$C^* = k_{1-\alpha} \bar{u}(0) \quad (4.10)$$

El umbral de decisión de la concentración promedio de Rn-222 (\bar{C}_{Rn-222}^*) para una $C_{Rn-222} = 0$ medida con cámara de difusión se determinará mediante la ecuación (evaluación de los detectores no expuestos, testigos o de fondo) 4.11 [43].

$$\bar{C}_{Rn-222}^* = k_{1-\alpha} u(\bar{C}_{Rn-222} = 0) = k_{1-\alpha} \omega \frac{\bar{\eta}_b}{1 + \frac{1}{n}} \quad (4.11)$$

$$\omega = \frac{1}{t F_C S_{SSNTD}} \quad (4.12)$$

Donde $\bar{\eta}_b$ (trazas) es el promedio de total de trazas contabilizadas de n detectores no expuestos ($\bar{\eta}_b = \sum \eta_{bi}/n$), t (h) es el tiempo, S_{SSNTD} (cm^2) es el área total de lectura del detector SSNTD y F_C (trazas $cm^{-2}/Bqhm^{-3}$) es el factor de calibración de la cámara de difusión.

4.4.2 Límite de detección

El límite de detección, $C^\#$, es el valor más pequeño de las mediciones en el cual la probabilidad de asumir que el fenómeno físico no ocurrió de manera errónea no excede una probabilidad β (aplicando las reglas de decisión) [71].

De acuerdo con [43] el límite de detección ($\bar{C}^\#$) es el menor valor que puede ser detectable por el dispositivo, se calcula mediante la ecuación 4.13.

$$\bar{C}_{Rn-222}^\# = \bar{C}_{Rn-222}^* + k_{1-\beta} \bar{u}(C^\#) \quad (4.13)$$

$$\bar{C}_{Rn-222}^\# = \bar{C}_{Rn-222}^* + k_{1-\beta} \frac{\bar{C}_{Rn-222}^\#}{\omega} + \eta_b \frac{1}{1 + \frac{1}{n}} \omega^2 + \bar{C}_{Rn-222}^{\#2} u_{rel}^2(\omega) \quad (4.14)$$

Sin embargo, el límite de detección ($C^\#$) también se puede determinar con una aproximación ($\bar{C}_{Rn-222}^\# = 2\bar{C}_{Rn-222}^*$) quedando en términos de la parte derecha de la ecuación 4.14.

Considerando que $k_{1-\alpha} = k_{q-\beta} = k$, la ecuación del límite de detección quedaría de la siguiente forma:

$$C_{Rn-222}^\# = \frac{2\bar{C}_{Rn-222}^* + k^2 \omega}{1 - k^2 u_{rel}^2(\omega)} \quad (4.15)$$

4.5 Discriminación por método de pinhole

En este trabajo se ha utilizado una cámara de difusión, consiste en un cilíndrico con una tapa tipo rosca, que permite el ingreso de Rn-222 a través de la rosca. De acuerdo con [75],

una cámara de tipo orificio o "pinhole" consiste en un cilindro cerrado que tiene un agujero del grosor de un alfiler de radio a y longitud d en una cara (Fig.4.8), permitiendo que el gas ingrese al volumen interno en donde se encuentra un SSNTD mediante el proceso de difusión. La ecuación de estado no estacionario para una concentración promedio (C) de un gas (Rn-222 o Rn-220) en un volumen V (de la cámara) en el momento t , se explica mediante la ecuación 4.16, donde J es el flujo de transmisión a través del orificio de área (A) y λ es la constante de desintegración del gas.

$$V \frac{\partial C(t)}{\partial t} = JA - \lambda C(t)V \quad (4.16)$$

Donde el flujo J está relacionado con la diferencia entre la concentración del gas en el exterior y el interior, se describe mediante la primera ley de Fick que al utilizarla en la ecuación anterior se determina la variación temporal de la concentración del gas mediante la ecuación 4.17. Donde C_0 es la concentración del gas en el aire exterior en la cara de entrada, D es el coeficiente de difusión del gas en el aire (movimiento del gas por el orificio).

$$\frac{\partial C(t)}{\partial t} = \lambda_p C_0 - \lambda_e C(t) \quad (4.17)$$

Donde:

$$\lambda_p = \frac{AD}{Vd} \quad (4.18)$$

$$\lambda_e = \lambda + \lambda_p \quad (4.19)$$

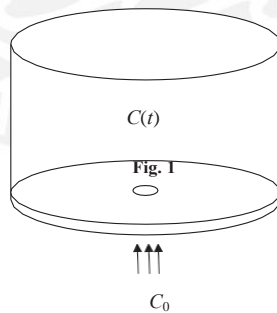


Fig. 4.8 Esquema de un sistema de cámara tipo orificio [75]

La solución de la ecuación diferencial 4.17, para la condición inicial $C(t=0) = 0$, la concentración inicial dentro de la cámara.

$$C(t) = C_0 \frac{\lambda_p}{\lambda_e} \left(1 - e^{-\lambda_e t} \right) \quad (4.20)$$

Si para un tiempo $t = 3/\lambda_e$, la $C(t)$ es aproximadamente igual al 95% $C_0 (\lambda_T/\lambda_e)$, se define el concepto de tiempo de transmisión (T_{95}). Y para un tiempo más largo $t = 6/\lambda_e$, la concentración alcanza un estado estable (C_s) en la cámara de orificio, se define el concepto de factor de transición (F).

Tiempo de transmisión

El tiempo de transmisión (T_{95}) se define como el tiempo requerido por el Rn-222 o Rn-220 para alcanzar el 95% de su concentración de estado estacionario final (C_s) en la cámara de difusión de tipo orificio. Se puede determinar mediante la ecuación 4.21 [75].

$$T_{95} = \frac{3Vd}{\lambda Vd + AD} \quad (4.21)$$

Factor de transmisión

El factor de transmisión (F) se define como la relación entre la concentración final en estado estacionario de Rn-222 o Rn-220 en la cámara de difusión de tipo orificio y su concentración fuera de la cara de entrada de la cámara ($F = C_s/C_0$) y puede expresarse mediante la ecuación 4.23.

$$C_s = C_0 \frac{\lambda_T}{\lambda_e} \quad (4.22)$$

$$F = \frac{AD}{AD + \lambda Vd} \quad (4.23)$$

Estudios realizados con este tipo de dispositivo han determinado los valores T_{95} y F para cámaras de diferentes dimensiones y con varios números de orificios de diferentes tamaños. Por ejemplo, un solo orificio de 1 mm de diámetro sería igual que tener 4 orificios de 0,5 mm de diámetro cada uno. Los resultados determinaron que este tipo de dispositivo puede permitir el ingreso de más del 95% de Rn-222 y hasta un 4% del Rn-220 del aire exterior [75].

Capítulo 5

Metodología

5.1 Lugar de medición de concentraciones de radón

El muestro de concentraciones de radón en interiores se realizó en la provincia de Lima Metropolitana, que se ubica dentro del departamento de Lima. El 2015 el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) reportó que la densidad poblacional del departamento de Lima era mayor a 282,7 habitantes por km² siendo la de mayor valor en comparación con los otros departamentos del Perú [34].

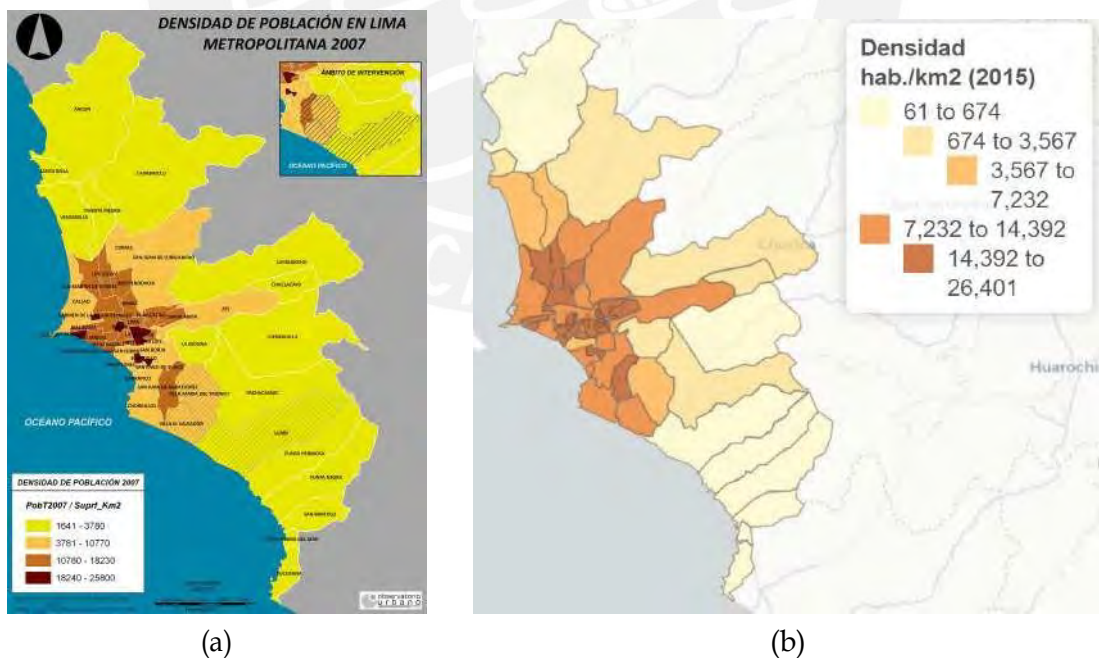


Fig. 5.1 Mapas de la densidad poblacional de los distritos de Lima Metropolitana a) Densidad poblacional el año 2007 [64]; b) Densidad poblacional el año 2015 [53]

La ubicación de los lugares de medición se basó en la densidad poblacional de los distritos de Lima Metropolitana, en la Fig.5.1 se presentan los mapas densidad población de los distritos en los años 2007 y 2015, se basan en los datos presentados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y en los Censos de población. Como puede verse la densidad poblacional a aumentado en el tiempo, sin embargo, en ambos mapas se puede observar que los mayores valores se presentan en la zona de Lima Centro y sus distritos más cercanos y los menores valores en los distritos más alejados de Lima Norte (Ancón), Lima Este (Cieneguilla) y Lima Sur (Lurín, Punta Hermosa, Punta Negra, San Bartolo, Santa María del Mar y Pucusana). Debido a la poca población en estos distritos posibilidad de encontrar voluntarios para la medición de radón es menor.

La distribución de los detectores y monitores (con detector LR-115 en su interior) se realizó a estudiantes y profesores de la PUCP, los voluntarios fueron registrados dando información sobre el lugar de ubicación de los detectores, realizando una distribución aleatoria de los detectores [17]. A cada voluntario se le entrego tres monitores de radón, cámara de difusión G2 (Fig.5.2a) del grupo GITHUNU, cámara negra de difusión modelo DPR2 de la marca Algade (Fig.5.2b) del Programa Nacional PER-9024 y un par de detectores en modo descubierto LR-115 (tipo II) (Fig.5.2c) del grupo GITHUNU con sus respectivas indicaciones de uso mediante folletos, presentados en el anexo A. Hubo algunas excepciones en donde se entregaron a los voluntarios solo los detectores correspondientes al grupo GITHUNU debido a la cantidad de muestras por zonas.

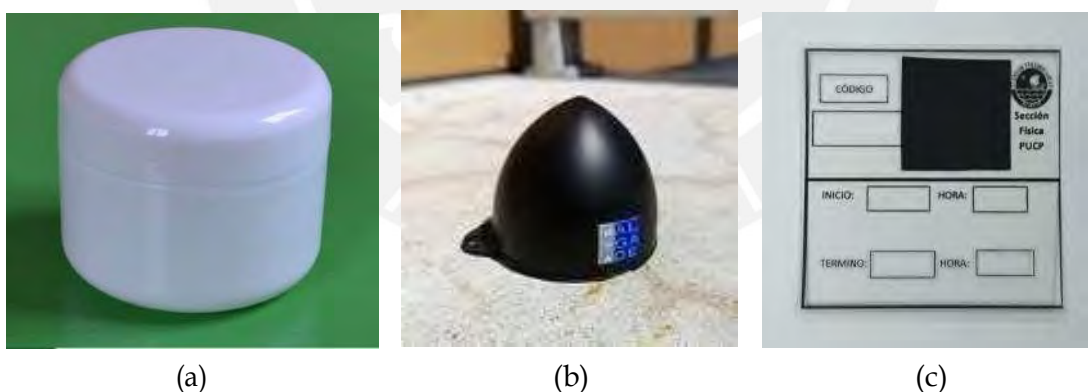


Fig. 5.2 Detectores para la medición de concentración de Rn-222

a) Monitor G2-PUCP, b) Monitor DPR2 Algade, c) LR-115 modo descubierto (bare mode)

Las mediciones se realizaron durante los años 2017 y 2018 en tres periodos de medición, el primer periodo se realizó durante los meses de agosto a diciembre de 2017, el segundo periodo de medición se realizó durante los meses de marzo a julio del 2018 y el tercer periodo durante los meses de agosto a diciembre del 2018. Los detectores se colocaron en los primeros pisos de las viviendas seleccionadas y durante un tiempo de aproximadamente

90 días, posteriormente fueron devueltos al laboratorio de Huellas Nucleares de la facultad de Física para su análisis.

Luego del retorno de los detectores expuestos en las viviendas al laboratorio de Huellas Nucleares de la Facultad de Física, fueron debidamente guardados y almacenados para su posterior análisis. Los detectores correspondientes al Proyecto Nacional PER9024 fueron almacenados en posición "OFF" (Fig.5.3) para luego ser enviados al Laboratorio de Medio Ambiente y Dosimetría de ALGADE (Francia) para su lectura.

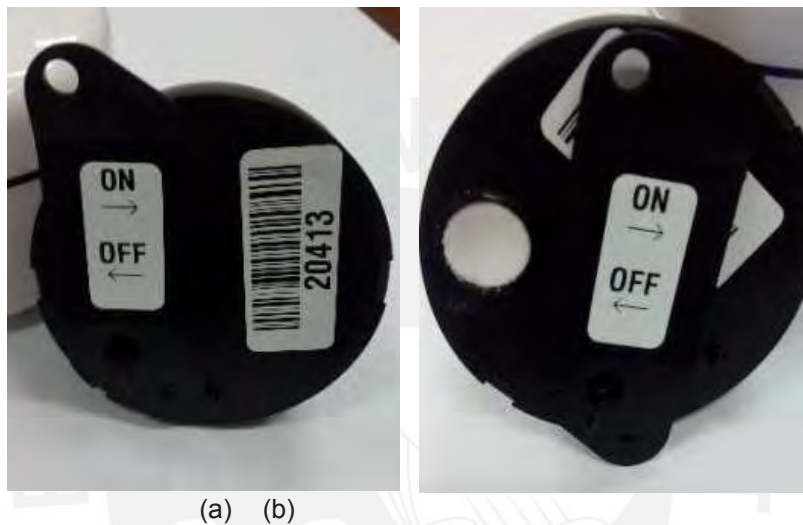


Fig. 5.3 Posiciones ON y OFF del monitor DPR2 ALGADE
a) Posición OFF, b) Posición ON

Los detectores correspondientes al grupo GITHUNU se almacenaron de manera adecuada en el laboratorio de Huellas Nucleares siendo debidamente codificados. Como se ha mencionado anteriormente el detector que se utiliza en este estudio es el polímero de nitrato de celulosa (LR-115 tipo II) y encuentran colocados en el interior de los monitores y son usados en modo descubierto. Para el caso del monitor G2, utilizando guantes se debe retirar cuidadosamente el detector LR-115 de 1,5 x 1,5 cm ubicado en el centro de la tapa interna del monitor (Fig.5.4), luego anotar su código, las fechas inicial y final de medición en un sobre y guardar en el interior el detector. Del mismo modo se debe retirar el detector LR-115 de 2 x 2 cm colocado en la mica para medir exposición en modo descubierto (bare mode). Estos detectores pueden ser almacenados un largo tiempo para su posterior proceso de grabado, sin alterar las mediciones de trazas registradas.

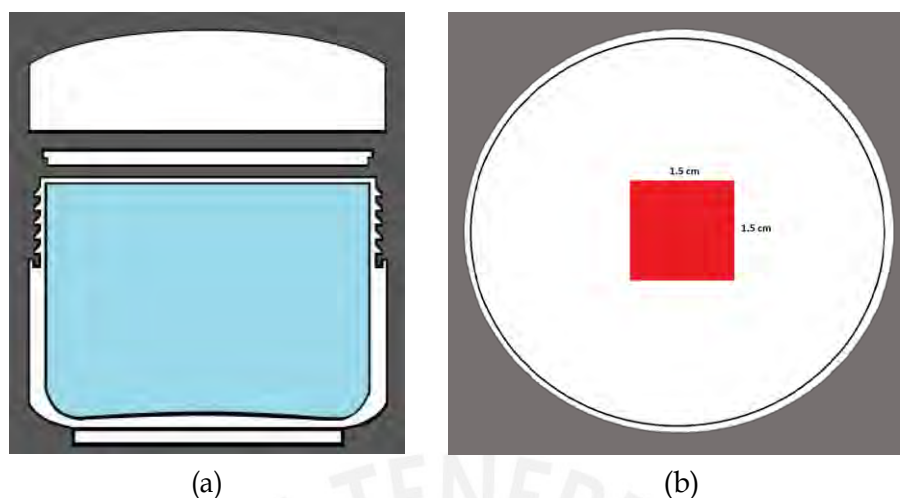


Fig. 5.4 Esquema del monitor G2 de la PUCP (Elaboración propia)

a) Estructura del monitor de radón G2 está compuesto por tres partes el recipiente donde ingresará el aire con átomos de Rn-222, una tapa interna delgada en donde se colocará el detector LR-115 y una tapa grande tipo rosca para cerrar en recipiente b) Tapa interna de cámara con el detector LR-115

5.2 Procedimiento de grabado de detectores

El procedimiento de grabado de los detectores LR-115 se realizará en un sistema termostático a una temperatura de 60 °C, por 90 min en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 2,5 N o 10% ([18], [79], [57]).

5.2.1 Preparación de la solución alcalina

Los pellets de NaOH al entrar en contacto con el agua destilada producen una reacción exotérmica, convirtiéndose en una solución corrosiva por lo cual el proceso de preparación y manipulación debe realizarse con implementos de seguridad (guantes, lentes, mascarilla y mandil sintético). El procedimiento de preparación en este trabajo está establecido en el "Protocolo de trabajo para la medición de la concentración de la actividad de radón en interiores" del Laboratorio de Huellas Nucleares de la PUCP y se resumen en los siguientes pasos:

Procedimiento de preparación de NaOH a 2,5 N

Paso 1: Pesar 100 gr del hidróxido de sodio (NaOH) con una balanza digital y un vaso de vidrio PYREX de 120 ml.

Paso 2: Medir 1 L de agua destilada en un vaso de vidrio PYREX de 1 L.

Paso 3: En otro vaso de vidrio PIREX de 1 L verter 700 ml de agua destilada y colocarlo en un recipiente con agua fría.

Paso 4: Agregar los 100 gr de NaOH y mover con una varilla de vidrio hasta disolver los restos sólidos.

Paso 5: Agregar los 300 ml de agua destilada restantes y agitar hasta tener una solución transparente.

Paso 6: Almacenar en un recipiente cuidadosamente debidamente etiquetada (NaOH 2.5N y la fecha de preparación).

5.2.2 Sistemas de grabado de detectores

En este trabajo se han utilizado los dos sistemas de baños termostatzados del Laboratorio de Huellas Nucleares, el primero es un sistema marca RELES cuenta con 6 unidades individuales de grabado, como puede verse en la Fig.5.5a, donde se pueden colocar 5 detectores por unidad permitiendo procesar un total de 30 detectores por proceso de grabado. El segundo es un sistema OVANTHERM MULTIMIX marca OVAN que está compuesto por un Termostato de inmersión, un tanque de acero inoxidable de 20 litros, una bomba para homogeneizar la temperatura y un sistema con agitadores magnéticos [65], el cual fue acondicionado como puede verse en la Fig.5.5b con unos contenedores de acero inoxidable que en su interior tienen un sistema de colocación y aseguramiento de los detectores diseño por el grupo GITHUNU, permitiendo procesar hasta 40 detectores por contenedor dando un total de 120 detectores por proceso de grabado.

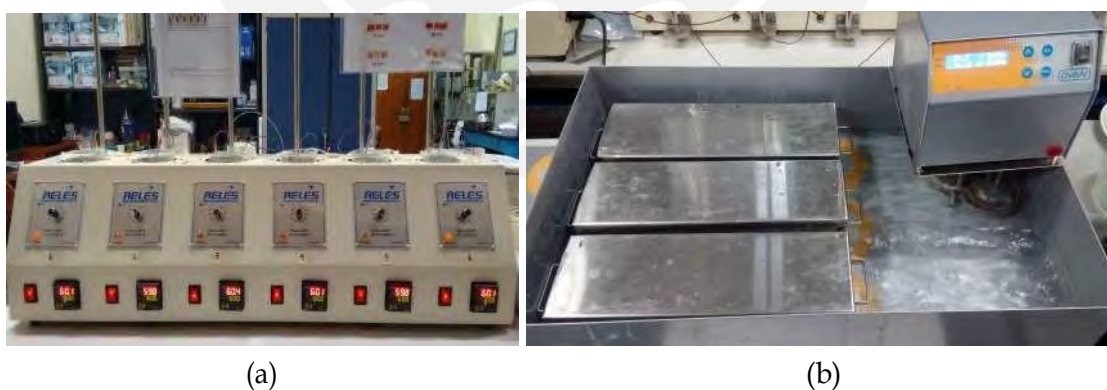


Fig. 5.5 Sistemas de grabado de detectores del Laboratorio de Huellas Nucleares
a) Sistema de grabado de detectores tipo abierto b) Sistema de grabado de detectores tipo cerrado

Procedimiento para el sistema de grabado marca RELES

Paso 1: Estabilizar la temperatura del laboratorio a 20°C con puertas y ventanas cerradas, para evitar la variación de la temperatura del sistema durante el proceso de grabado.

Paso 2: En un vaso de vidrio PYREX de 500 ml colocar 200 ml de agua del caño.

Paso 3: En un vaso de vidrio PYREX de 150 ml colocar 110 ml de la solución de NaOH a 2,5 N y luego colocarla dentro del recipiente que contiene agua del caño.

Paso 4: Colocar dentro del envase con agua de caño el termómetro del sistema de grabado.

Paso 5: Colocar todo el recipiente con el termómetro y la solución dentro del sistema de grabado, establecer en el equipo una temperatura de 60°C a una potencia del 40%.

Paso 6: Luego de 1 hora y media el sistema se estabiliza a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

Paso 7: Alistar los detectores debidamente codificados deben colocarse dentro de la solución de NaOH durante 90 min.

Paso 8: Retirar los detectores y almacenar la solución NaOH como desecho (Fig.5.6a)

Paso 9: El primer enjuague se realizará con 400 ml agua destilada durante 20 min en un vaso de vidrio PYREX de 500 ml, colocado en el sistema de agitación magnética en un sistema con agitador magnético a 300 rpm, colocar en el interior el imán de agitación.

Paso 10: Cambiar el agua destilada y realizar un segundo enjuague en las mismas condiciones (Fig.5.6b).

Paso 11: Finalmente retirar los detectores y colocarlos para que sequen a condiciones ambientales normales (Fig.5.6c).

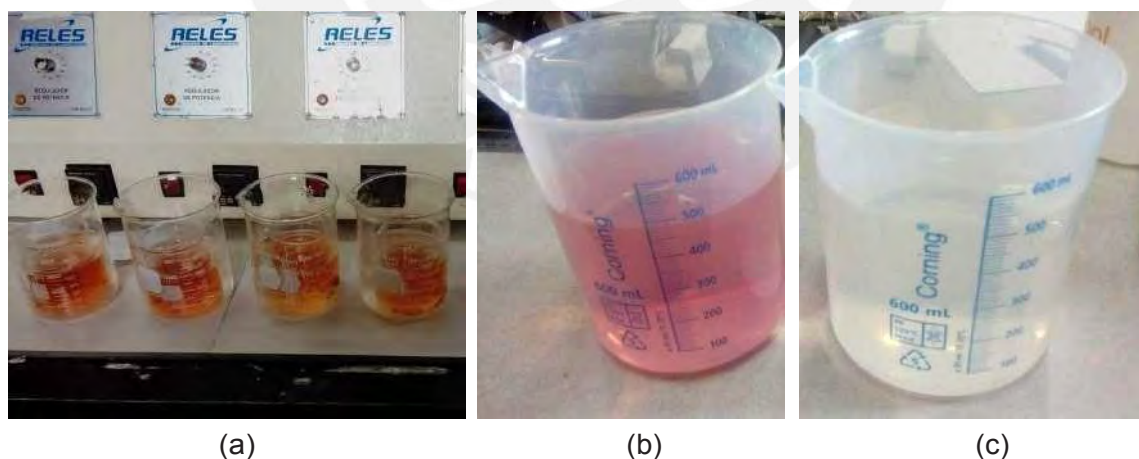


Fig. 5.6 Proceso de grabado de LR-115 en sistema abierto de grabado
a) Recipiente de vidrio con solución NaOH 2.5 N después de 90 min, b) Agua destilada luego del primer enjuague de los detectores, c) Agua destilada del segundo enjuague de los detectores

Procedimiento para el sistema de grabado marca OVAN

Paso 1: Estabilizar la temperatura del laboratorio a 20°C con puertas y ventanas cerradas.

Paso 2: Colocar 1 litro de solución NaOH a 2,5 N en cada contenedor de acero inoxidable.

Paso 3: El tanque de acero se debe llenar con 10 litros de agua (superar la altura del termostato), encender la bomba de agitación y el termostato a una temperatura de 61.1°C.

Paso 4: Colocar los contenedores dentro del tanque, poner los termómetros del sistema RELES y cerrarlos con sus respectivas tapas. Deben colocarse tal como en la Fig.5.5b.

Paso 5: Colocar la tapa de acrílico del tanque para evitar la evaporación del agua. La estabilización en 60°C debe de registrarse con los termómetros (2 horas y media después).

Paso 6: Registrar la ubicación de cada detector en el sistema de resortes (Fig.5.7a).

Paso 7: Verificar que se haya llegado a los 60°C, luego retirar los termómetros, colocar el arreglo de resortes con los detectores y cerrar por un tiempo de 90 min (Fig.5.7b).

Paso 8: Retirar los contenedores de acero separar la solución como desecho y realizar un enjuague rápido con 1 litro de agua con el objetivo de limpiar Los contenedores.

Paso 9: Para el primer enjuague, colocar en los contenedores 1 litro de agua destilada, luego posicionarlos en el sistema de agitación magnética con tres imanes en cada uno. Luego colocar el arreglo de resortes con los detectores durante 30 min a 700 rpm (Fig.5.7c).

Paso 10: Cambiar el agua destilada y realizar un segundo enjuague en las mismas condiciones (Fig.5.6a).

Paso 11: Finalmente retirar el arreglo de resortes con los detectores y colocarlos para que sequen a condiciones ambientales normales.

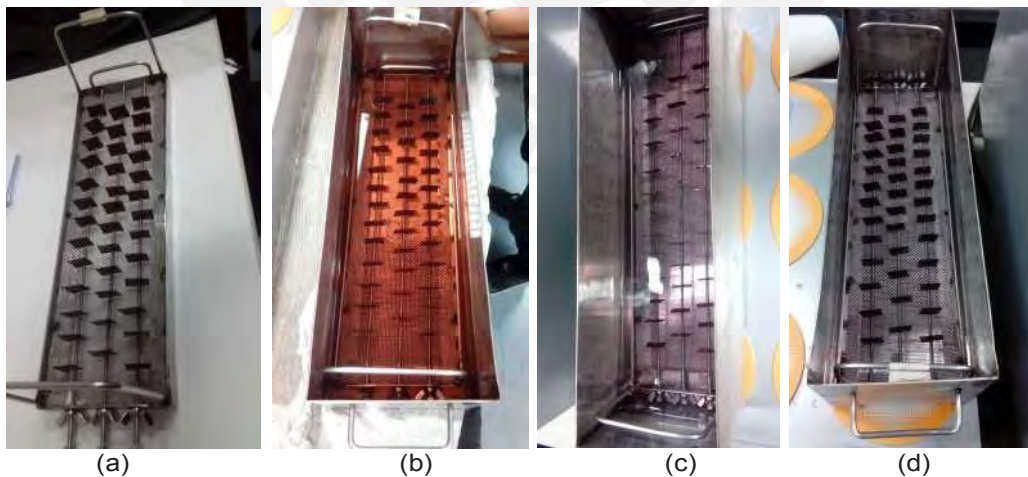


Fig. 5.7 Proceso de grabado de LR-115 en sistema cerrado de grabado
a) Sistema de resortes con detectores, b) Contenedor con solución NaOH 2.5 N después de 90 min, c) Primer enjuague de los detectores, d) Segundo enjuague de los detectores

5.3 Procedimiento de lectura de detectores

Luego del proceso de grabado y secado de los detectores, se realizará el análisis de medición de trazas registradas por el detector LR-115. El procedimiento de lectura de los detectores se realizará mediante el equipo "Politrack". Este equipo es un sistema automático para la detección de trazas en detectores LR-115 causadas para la medición de radón. La PUCP cuenta con este equipo desde el año 2016 como parte del Proyecto 120-PNICP-IAP-2015 siendo el único en todo el Perú (Fig.5.8).



Fig. 5.8 Equipo Politrack para la lectura de SSNTD de la PUCP

El equipo "Politrack" viene equipado con una cámara, dispositivo de carga acoplada (CCD por sus siglas en inglés), que escanea la superficie del SSNTD. Para el análisis de trazas por radón en LR115, el microscopio tiene un aumento 4x + pinhole. También cuenta con un microscopio acoplado directamente a la cámara CCD que contiene un detector monocromático de 1/3 CCD de 8 bits, con resolución de 1280 x 960 píxeles. Las imágenes captadas por la cámara son transmitidas a la PC. La configuración para radón en LR-115 presenta un área de lectura de aproximadamente 0,6 mm². Este sistema permite la posibilidad de escanear un solo detector o varios detectores en secuencia. El software controla el escaneo XY, realiza el enfoque automáticamente, de ese modo detecta las trazas en cada campo de lectura. Al finalizar se pueden guardar los datos de las lecturas y ser revisados en la plantilla personalizada de Excel [56]. También almacena archivos "trk" en los cuales se almacenan los parámetros geométricos de las trazas (diámetro mayor (μm), diámetro menor (μm), área

(μm^2) y redondez de la traza), su ubicación XY en el detector y su correspondiente campo de lectura.

Si bien este equipo puede dar los resultados de concentración de radón de cada detector en relación con la densidad de trazas y otros parámetros propios del sistema (Etching parameter, factor beta), en este trabajo no se determinará la concentración por ese método. La teoría del método de cálculo de concentración de radón del "Politrack" ha sido desarrollada por [10] y [11].

Procedimiento de lectura de LR-115 con Politrack

Paso 1: Utilizando guantes colocar los detectores LR-115 sobre la base de vidrio con una separación de 2 a 3 mm entre detector (Fig.5.9a).

Paso 2: Colocar la parte superior de vidrio para fijar la ubicación de los detectores.

Paso 3: Hacer una leve presión para evitar que se muevan los detectores y colocarlo sobre la base deslizable de escaneo.

Paso 4: Calibrar el desplazamiento de los ejes XYZ, con el botón "Axis calibration" en la página 2 del programa.

Paso 5: Con el botón "Home" de la página 2 del programa, la cámara CCD se posicionará en el punto ($x=0$, $y=0$).

Paso 6: Colocar la cámara CCD en el centro del primer detector, ubicar algunas trazas y realizar un enfoque. En la pestaña "Action" seleccionar "Autofocus", la cámara CCD realizará un desplazamiento en Z (Fig.5.9b).

Paso 7: Verificar que la imagen está correctamente enfocada y la intensidad de luz es adecuada (Fig.5.9c).

Paso 8: Ver el histograma de escala de grises en la página "Camera control", el nivel de gris objetivo para el detector LR-115 de encontrarse en el rango de 40 y 50 (un valor promedio utilizado por este sistema para LR-115 es de 45).

Paso 9: Ejecutando "Adjust gain" el sistema regulará la intensidad de la luz tratando de llegar al nivel promedio objetivo de grises.

Paso 10: Luego de verificar que los parámetros de análisis de lectura sean adecuados, se debe establecer una medición de 100 campos de lecturas.

Paso 11: Escoger entre dos tipos de lectura, "Single scan" se medirán las trazas de un solo detector o "Multiple scan" que realizará una medición de varios detectores.

Paso 12: Luego del escaneo retirar los detectores de la base deslizable y almacenarlas en un sobre.

Paso 13: Identificar los archivos trk que corresponden a cada detector, para evaluar las mediciones obtenidas.

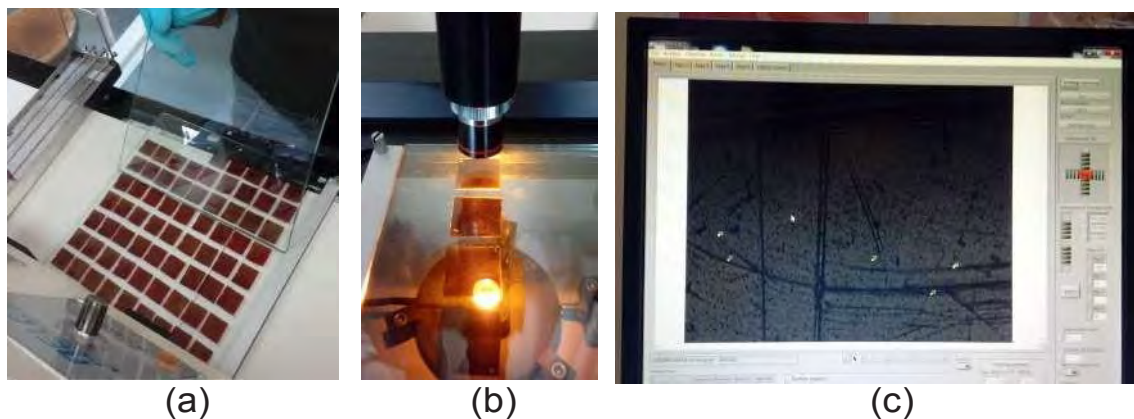


Fig. 5.9 Proceso de lectura de LR-115 con el equipo Politrack
 a) Colocación de detectores, b) Lectura del detector con cámara CCD, c) Imagen adquirida de un campo de lectura en el detector

5.4 Tratamiento estadístico de los resultados

En este estudio para determinar la densidad de trazas de cada detector se utilizarán los datos recopilados de las lecturas automáticas realizadas por el Politrack. Se medirán el número de trazas por cada campo de lectura de cada detector, para una mejor estadística se estableció realizar la medición de 100 campos de visión.

Como se ha tratado en capítulos anteriores el fenómeno del decaimiento radiactivo cumple con la estadística de Poisson [47] y de acuerdo con [56] la distribución de las trazas en detector debe cumplir también con la misma distribución.

La forma de cuantificar la bondad de un ajuste para una distribución de Poisson se realiza mediante la prueba estadística del Chi cuadrado χ^2 ("chi-square test"). Esta prueba permite medir la discrepancia entre una distribución de datos medidos experimentales y otra distribución teórica en la cual se conocen los parámetros característicos [47].

El Politrack luego de finalizar las lecturas emite su documento de salida y dan los valores de densidad de trazas (trazas cm^{-2}), el valor de Chi cuadrado reducido χ_r^2 relacionada con la distribución de las trazas en el detector [56] y el nombre del archivo donde se encuentran los parámetros morfológicos de las trazas.

5.4.1 Test de Chi cuadrado en SSNTD

La prueba de distribución espacial de las trazas (χ^2) para un SSNTD se define por la ecuación 5.1, donde Tr_i es el número de trazas contadas en el i -ésimo campo de lectura, \overline{Tr} es el promedio de trazas en n campos de escaneo ($\overline{Tr} = \sum Tr_i / n$) [56].

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Tr_i - \overline{Tr})^2}{Tr} \quad (5.1)$$

Cuando a partir de una muestra de n mediciones se determina uno o más parámetros de la muestra, debe compararse el valor de χ^2 con los grados de libertad. El número de grados de libertad se define como $\nu = n - l$ donde l es la número de ecuaciones de ligaduras [68]. El Chi cuadrado reducido (χ^2_ν) se define en la ecuación 5.2.

$$\chi^2_\nu = \frac{\chi^2}{\nu} \quad (5.2)$$

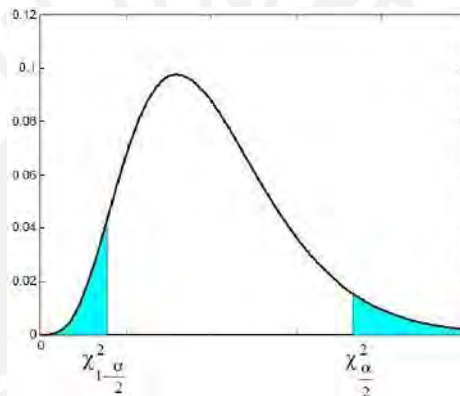


Fig. 5.10 Distribución de chi cuadrado y sus límites [12]

En la Tabla B.1 se muestran los valores de χ^2_ν para diferentes cantidades de campos evaluados, con un intervalo de confianza del 90%. Si el χ^2_ν medido es mayor que el límite superior de acuerdo con la Fig. 5.10 ($\chi^2_{\alpha/2} = \chi^2_{\nu,0.05}$), posiblemente el detector presente daños y algunos campos tengan un número de trazas demasiado cerca. En estos casos se debe excluir esos campos y recalcularse la densidad de trazas [56].

5.4.2 Detección de campos anómalos en SSNTD

Utilizando los archivos con los datos de las trazas registradas de cada detector por el Politrack se puede calcular el número de trazas en los 100 campos evaluados en el detector y conocer su distribución espacial. En la Fig. 5.11a se presenta la distribución de las trazas para un detector con una densidad de trazas de 220 Tr cm^{-2} y en la Fig. 5.11b para un detector de 1222 Tr cm^{-2} ambos detectores presentaron un valor de $\chi^2 = 1$.

Pero algunos detectores pueden presentar una distribución no uniforme como en la Fig. 5.11o tener algunos daños mecánicos causando una lectura errónea.

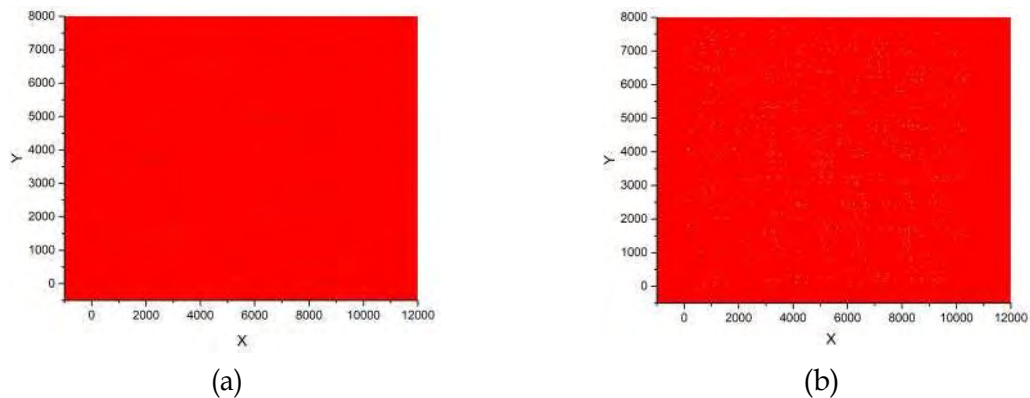


Fig. 5.11 Distribución de trazas en un detector con Chi-2 igual a 1 (Elaboración propia) Detectores LR-115 expuestos a diferentes concentraciones de radón que presentaron un $\chi^2_V = 1$ a) Detector con 156 trazas en 100 campos, b) Detector con 843 trazas en 100 campos

Debido que las trazas en el detector deben cumplir con una distribución de Poisson, evaluada por la prueba de chi cuadrado, en este trabajo la detección y evaluación de valores atípicos (outliers) en la cantidad de trazas por campo de lectura se realizará mediante el método de diagrama de cajas (boxplot) [42].

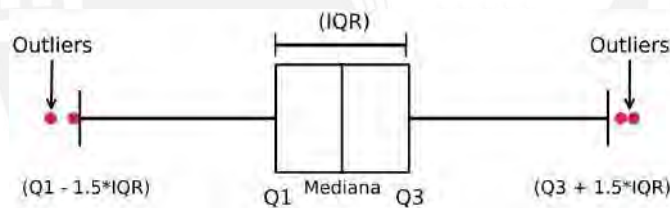


Fig. 5.12 Esquema de un diagrama de cajas (Elaboración propia)

Es una técnica de análisis desarrollada con el objetivo de investigar un conjunto de datos y se basa en cinco parámetros de la estadística descriptiva del conjunto de datos. El mínimo, primer cuartil (Q_1 , 25% de datos), mediana (Q_2 , 50% de datos), tercer cuartil (Q_3 , 75% de datos) y valor máximo. Cada uno de estos cinco parámetros proporciona información sobre la dispersión y el sesgo de los conjuntos de datos. Los valores anómalos (outliers) de un conjunto de datos pueden ser detectados en un diagrama de caja (Fig.5.12) desarrollada por John Tukey, que resulta muy útil para mostrar la posición central y la distribución del

conjunto de datos. Las barreras superior e inferior del gráfico de caja se definen como:

$$barrerainferior = Q_1 - k(Q_3 - Q_1) \quad (5.3)$$

$$Barrerasuperior = Q_1 + k(Q_3 - Q_1) \quad (5.4)$$

Donde k son constantes, según Tukey los datos fuera de las barreras superior e inferior con $k=1,5$ se consideran valores anormales sospechosos y los datos fuera de la barrera con $k=3$ como valores anormales extremos [42].

Este método puede aplicarse a los valores de trazas por campo de lectura de los detectores, permitiendo identificar y discriminar de los cálculos los campos con una cantidad de trazas anómala. En la Fig.5.13 se presenta el diagrama de cajas de las trazas por campo en 10 detectores expuestos a una misma concentración de radón, la mayoría de detectores presento una mediana de 8 trazas por campo. Puede verse que algunos detectores presentaron valores anómalos sospechosos (Fig.5.13a) y solo un detector presento anómalos extremos (Fig.5.13b).

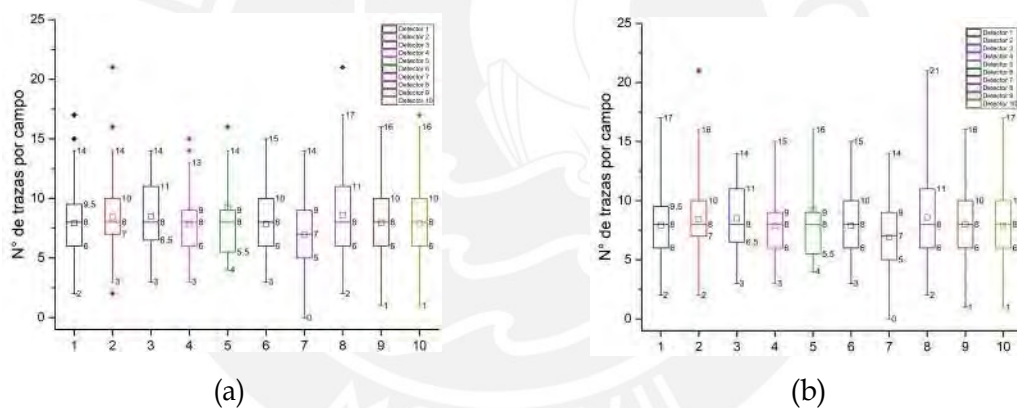


Fig. 5.13 Diagrama de caja de la lectura de SSNTD (Elaboración propia)
a) Diagrama de cajas para $k=1,5$ b) Diagrama de cajas para $k=3$

Aplicando este método de detección de outliers en las lecturas de trazas pueden solucionarse problemas como la presencia de una distribución no uniforme de trazas en los detectores. En la Fig.5.14 se muestra la distribución de trazas (color amarillo) de un detector con $\rho = 403 \text{ Trcm}^{-2}$ con un $\chi^2_{\nu} = 3,28$ (272 trazas en 100 campos), puede verse que en la parte superior hay un grupo de trazas muy juntas marcadas en un recuadro. Luego de aplicar este método se eliminaron 5 campos de lecturas y recalculando se obtuvo una $\rho = 314 \text{ Trcm}^{-2}$ con un $\chi^2_{\nu} = 1,13$ (211 trazas en 95 campos) siendo menor que su valor límite de $\chi^2_{0,95} = 1,25$.

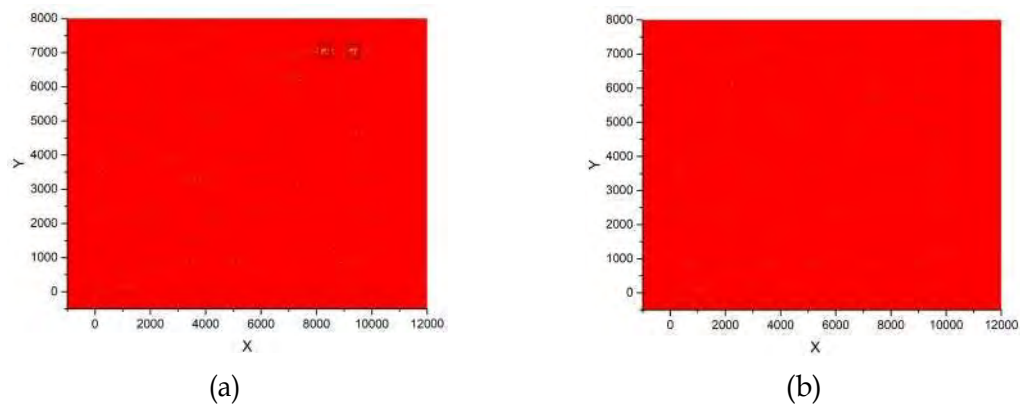


Fig. 5.14 Distribución no uniforme de un SSNTD (Elaboración propia)
 a) Detector con $\rho = 403 \text{ Trcm}^{-2}$, $\chi^2_{\nu} = 3,28$; b) Detector con $\rho = 314 \text{ Trcm}^{-2}$, $\chi^2_{\nu} = 1,13$



También permite discriminar posibles daños mecánicos en los detectores como puede verse en la Fig.5.15a, este gráfico presenta la distribución de trazas en un detector con una $\rho = 1171 \text{ Trcm}^{-2}$ y $\chi^2_{\nu} = 141,29$ (793 trazas en 100 campos) donde puede observarse una línea de color amarillo. Luego de aplicar los criterios anteriores los valores recalculados fueron $\rho = 57 \text{ Trcm}^{-2}$ y $\chi^2_{\nu} = 0,91$ (35 trazas en 91 campos). Aunque se hayan eliminado 9 campos de lectura debido a un posible daño mecánico en esa región del detector, los valores determinados cumplen con una buena estadística ($\varepsilon_r < 2\%$) y no supera su límite superior de $\chi^2_{91} = 1,2557$, como puede verse en la Fig.5.15b el detector presenta una distribución uniforme. Pueden utilizarse los valores recalculados en ambos casos para la medición final de concentración de radón.

5.5 Proceso de calibración de los detectores G2

El proceso de calibración de los detectores usados al interior de las cámaras de difusión G2 (en adelante detectores G2) se realizó en la temporada de enero de 2019, con monitores G2 que fueron enviados al Laboratorio de Radiación Natural para la calibración y prueba de instrumentos y detectores para la medición de la radiación natural de MetroRADON, Salamanca, España que se encuentra localizada en una antigua mina de uranio.

La exposición de los detectores G2 se realizó durante el proceso de intercomparación de radón en interiores y emanaciones de radón geogénico en condiciones de campo (Fig.5.16), organizado por la Universidad de Cantabria con el apoyo del Centro común de investigación (Joint Research Centre), durante las primeras semanas del mes de noviembre en la sala del laboratorio de Radiación Natural [55].

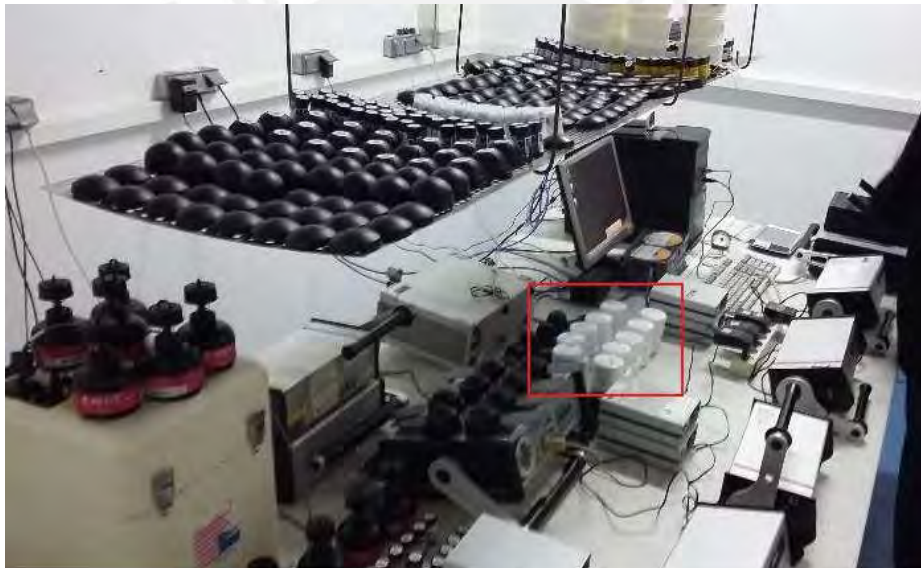


Fig. 5.16 Imagen del proceso de intercomparación de MetroRADON [55]

Se realizaron dos exposiciones teniendo en cuenta la evolución temporal del radón. Se colocaron 20 monitores G2 en la sala el 5 de noviembre (12:00 h), la primera exposición se realizó hasta 6 de noviembre (13:00) retirando 10 monitores G2. Los últimos 10 monitores se retiraron el 8 de noviembre de 2018 (10:00). En paralelo se dejaron 10 monitores G2 como testigos.

Las ecuaciones para determinar la densidad promedio de trazas en los monitores de testigos ($\bar{\rho}_b^G$) se realizará mediante la ecuación 5.5 y mediante la teoría de propagación de errores se determina $u_{\bar{\rho}_b^G}$.

$$\bar{\rho}_b^G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_{bi}^G \quad (5.5)$$

$$u(\bar{\rho}_b^G) = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \rho_{bi}^G{}^2} \quad (5.6)$$

Para determinar la densidad de trazas neto ρ_{neto}^G de un monitor se le debe restar la contribución del fondo (ecuación 5.7) y su error mediante (ecuación 5.8).

$$\rho_{neto}^G = \rho^G - \bar{\rho}_b^G \quad (5.7)$$

$$u(\rho_{neto}^G) = \sqrt{u(\rho^G)^2 + u(\bar{\rho}_b^G)^2}$$

Para determinar el factor de calibración de los detectores FC_G , deben calcularse los factores de calibración de cada detector expuesto ($FC_G - i$). Siendo un factor de calibración promedio calculado con la ecuación 5.9 con su respectivo error (ecuación 5.10).

$$FC_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{neto-i}^G}{E_i} \quad (5.9)$$

$$u(FC_G) = \frac{1}{E} \sqrt{u(\rho_{neto}^G)^2 + \left(\frac{\rho_{neto}^G}{E^2}\right)^2 u(E)^2} \quad (5.10)$$

De acuerdo, con [80], el $u(FC_G)$ puede considerarse por el error estándar de la media (ecuación 5.11), que es igual a la desviación estándar de la muestra de FC entre la raíz cuadrada del tamaño de la muestra.

$$u_s(FC_G) = \frac{\sigma(FC_G)}{\sqrt{N}} \quad (5.11)$$

Capítulo 6

Resultados

6.1 Caracterización del monitor G2

6.1.1 Discriminación de torón de la cámara G2

La cámara G2 fue seleccionada utilizando las bases del método de pinhole. Se han determinado las magnitudes de tiempo de transmisión (T_{95}) y factor de transmisión (F) de Rn-222 y Rn-220, utilizando las dimensiones de la cámara (Fig.6.1).

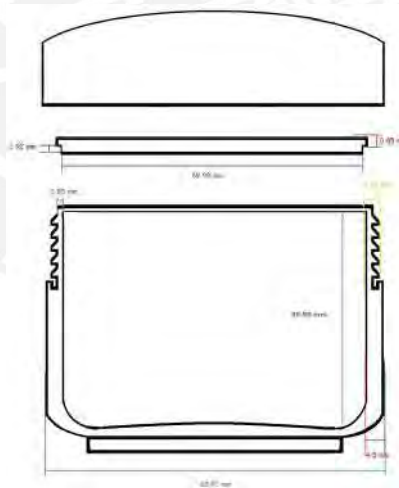


Fig. 6.1 Dimensiones de la cámara G2 (Elaboración propia)

La medición de las dimensiones se realizó con un vernier digital de 0,01 mm de resolución (error instrumental de $\pm 0,02$ mm)

El volumen interno de la cámara es de 113 cm^3 (4 cm de altura y 6 cm de diámetro). El ingreso del gas se realiza por la rosca, con un área de ingreso total de $0,108 \text{ cm}^2$ (6,9 cm

diámetro externo (d_{ext}), 0,05 mm de espacio de entrada (ϵ), el recorrido que debe realizar el gas hasta llegar al volumen interno es de 2,46 cm aproximadamente.

En la Tabla 6.1 se muestran los valores de tiempo de transmisión T_{95} (ecuación 4.21) y factor de transmisión F (ecuación 4.23) calculados utilizando los parámetros de área y recorrido del orificio de ingreso, el volumen interno de la cámara, el coeficiente de difusión en aire (Tabla 3.3) y las constantes de decaimiento λ (Tabla 3.4) del Rn-222 y Rn-220.

Tabla 6.1 Resultado de discriminación de Rn-220

Área ($2\pi(d_{ext}/2)\epsilon$) (cm^2)	Recorrido (cm)	Volumen interno Cámara G2 (cm^3)	Tiempo de transmisión T_{95} (min)		Porcentaje de transmisión F (%)	
			Rn-222	Rn-220	Rn-222	Rn-220
0,108	2,46	113	1221	4,1	94,8	0,3

La cámara G2 presentó una fracción de transmisión de Rn-222 y Rn-220 del 95% y menor al 1% respectivamente. Por lo tanto, las trazas registradas por el detector G2 se deben solo al Rn-222 y puede considerarse a la cámara G2 un monitor de radón.

6.1.2 Calibración de los detectores G2

La cámara de difusión G2 de radón 222, en adelante monitor G2, fue utilizada durante el proceso de intercomparación de MetroRADON en España, para la calibración de los detectores G2 como fue explicado en la sección 5.5.

En la Tabla 6.2 se presentan los resultados de los 10 detectores de testigos, con su valor de densidad de trazas ρ_b (ecuación 4.1), su incertidumbre $u(\rho_b)$ (ecuación 4.2) y su valor de χ^2_v (ecuación 5.2). Se obtuvo una densidad promedio de trazas de fondo de $51,8 \pm 2,8 \text{ Trcm}^{-2}$ (aplicando las ecuaciones 5.5 y 5.6).

Tabla 6.2 Detectores utilizados como testigos

Código	ρ_b Trcm^{-2}	$u(\rho_b)$ Trcm^{-2}	χ^2_v	Nº campos
G-CAL-F06	24,26	6,65	1,22	98
G-CAL-F03	25,52	5,64	0,84	99
G-CAL-F04	41,61	7,64	0,94	100
G-CAL-F02	47,56	8,15	0,94	100
G-CAL-F01	49,04	7,92	0,86	100
G-CAL-F08	56,11	9,22	1,01	98
G-CAL-F05	59,45	10,13	1,16	100
G-CAL-F09	65,39	9,75	0,98	100
G-CAL-F10	71,80	11,25	1,13	89
G-CAL-F07	77,28	10,87	1,03	100

En la Tabla 6.3, se presentan los resultados de los detectores utilizados en el proceso de calibración, la primera exposición (E) fue de $356 \pm 71 \text{ kBqhm}^{-3}$ durante 25 horas, y la segunda exposición fue de $1014 \pm 101 \text{ kBqhm}^{-3}$ durante 69 horas.

Tabla 6.3 Resultados de las lecturas de los detectores de calibración

kBqhm^{-3}	kBqhm^{-3}	Código	Trcm^{-2}	Trcm^{-2}	χ^2_V	Nº campos	Trcm^{-2}	$\text{u(Trcm}^{-2})$	Trcm^{-2}	FCBqhm^{-3}
356,00	71,00	G-CAL-05	355,77	22,53	0,94	99	303,97	25,34	0,85	
356,00	71,00	G-CAL-04	394,80	23,42	0,91	99	343,00	26,23	0,96	
356,00	71,00	G-CAL-10	407,20	23,96	0,95	100	355,40	26,77	1,00	
356,00	71,00	G-CAL-09	416,12	22,75	0,84	100	364,32	25,56	1,02	
356,00	71,00	G-CAL-01	442,74	25,42	0,86	96	390,94	28,23	1,10	
356,00	71,00	G-CAL-20	453,42	24,09	0,80	98	401,62	26,90	1,13	
356,00	71,00	G-CAL-11	469,62	23,49	0,79	100	417,82	26,30	1,17	
356,00	71,00	G-CAL-03	476,17	25,52	0,86	98	424,37	28,33	1,19	
356,00	71,00	G-CAL-18	549,87	28,61	1,00	100	498,07	31,42	1,40	
356,00	71,00	G-CAL-02	571,47	30,55	0,98	97	519,67	33,36	1,46	
1014,00	101,00	G-CAL-15	1029,89	38,56	0,97	100	978,09	41,37	0,96	
1014,00	101,00	G-CAL-06	1120,07	46,52	0,85	95	1068,27	49,33	1,05	
1014,00	101,00	G-CAL-13	1135,83	39,95	0,79	98	1084,03	42,76	1,07	
1014,00	101,00	G-CAL-12	1155,88	37,59	0,74	99	1104,08	40,40	1,09	
1014,00	101,00	G-CAL-19	1157,38	43,37	1,01	99	1105,58	46,18	1,09	
1014,00	101,00	G-CAL-14	1166,61	41,20	0,98	100	1114,81	44,01	1,10	
1014,00	101,00	G-CAL-07	1222,26	41,80	0,80	98	1170,46	44,61	1,15	
1014,00	101,00	G-CAL-17	1243,89	42,80	0,99	100	1192,09	45,61	1,18	
1014,00	101,00	G-CAL-16	1257,95	47,70	1,13	99	1206,15	50,51	1,19	
1014,00	101,00	G-CAL-08	1260,24	39,60	0,84	100	1208,44	42,41	1,19	
									1,12	

En base a lo realizado por [80] se utilizando las ecuaciones 5.9 y 5.10 para determinar el factor de calibración promedio y su incertidumbre de los detectores G2. Por lo tanto, el factor de calibración de los detectores G2 será:

$$\overline{FC}_{G2} = 1,12 \pm 0,04 \text{ Trcm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3} \quad (6.1)$$

6.1.3 Límite de detección del monitor G2

El umbral de decisión (C_{Rn-222}^*) y límite de detección ($C_{Rn-222}^\#$) del monitor G2 se han determinado usando las ecuaciones 4.11 y 4.15. En la Tabla 6.4 se presentan los resultados del umbral de decisión y límite de detección de 6 monitores G2 almacenados como fondo en bolsas selladas.

Donde η_b número de trazas del detector, S_{SSNTD} es el área total de lectura en el detector (NA), A es el área de visión de la cámara CCD de $0,0067289 \text{ cm}^2$ y FC_{G2} es el factor de calibración de la cámara G2 es $0,00112 \text{ Trcm}^{-2} / \text{Bqhm}^{-3}$.

Tabla 6.4 Resultados del umbral de decisión y límite de detección del monitor G2

Código	η_b	Nº	Tiempo	SSNTD	ω	C_{Rn-222}^*	$C_{Rn-222}^\#$
	Trazas	Campos	h	cm ²	Bqm ⁻³	Bqm ⁻³	Bqm ⁻³
F-G2-CC04	14	98	1152	0,66	1,18	10,26	23,72
F-G2-CC05	9	99	1152	0,67	1,16	8,14	19,46
F-G2-CC06	4	100	1152	0,67	1,15	5,38	13,89
F-G2-SC02	8	96	1152	0,65	1,20	7,92	19,10
F-G2-SC03	30	100	1152	0,67	1,15	14,72	32,58
F-G2-SC04	17	96	1152	0,65	1,20	11,54	26,35
						9,66	22,52

Los monitores G2 presentaron un umbral de decisión ($C_{G2}^*(Rn - 222)$) y un límite de detección ($C_{G2}^\#(Rn - 222)$) de:

$$C_{G2}^*(Rn - 222) = 9,7 \pm 1,7 Bqm^{-3} \quad (6.2)$$

$$C_{G2}^\#(Rn - 222) = 22,5 \pm 2,7 Bqm^{-3} \quad (6.3)$$

6.2 Análisis de las mediciones con el monitor G2

6.2.1 Distribución de detectores en Lima Metropolitana

La cantidad de total de puntos de estudios en las cuatro zonas de Lima Metropolitana de los tres periodos de muestreo se presentan en la Fig.6.2. En las zonas Centro, Este y Norte se pudieron encontrar una cantidad parecida de puntos de medición, pero en la zona Sur se ubicó una cantidad menor, debido a la dificultad de encontrar voluntarios en esa zona.

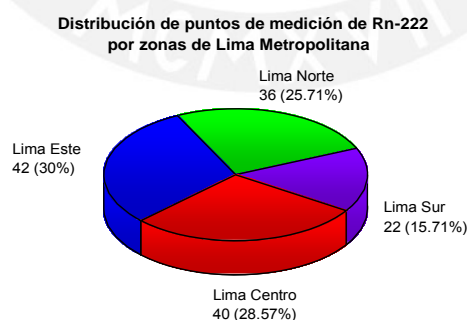


Fig. 6.2 Distribución de los puntos de medición por zonas de Lima Metropolitana

En la Fig.6.3, se presenta la distribución de los puntos de medición en cada distrito de Lima Metropolitana, como puede verse hubo distritos donde no se cuenta con puntos de estudio debido a que no se encontraron voluntarios o se produjo una pérdida.

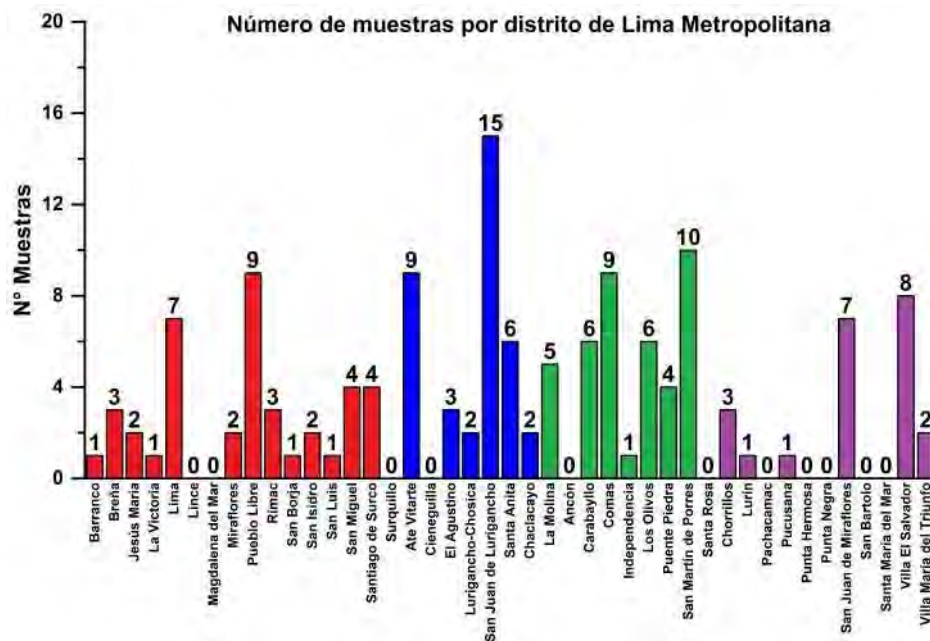


Fig. 6.3 Número de muestras de Rn-222 por distrito de Lima Metropolitana. Distritos de Lima Centro (rojo), Lima Este (azul), Lima Norte (verde) y Lima Sur (morado)

En la Fig. 6.4, se presentan la distribución de los puntos de estudio en los tres periodos de muestreo. Como se puede ver en la primera temporada se ubicaron más puntos de medición en comparación con las dos últimas temporadas de muestreo.

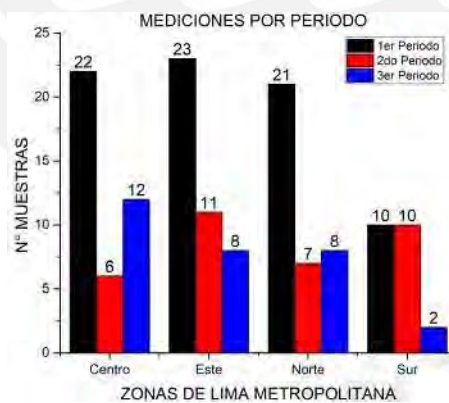


Fig. 6.4 Distribución de detectores por periodo en las zonas de Lima Metropolitana

Al finalizar este estudio se han registrado en el primer periodo un total de 76 puntos de estudios, en el segundo periodo 34 puntos de estudios y en el tercer periodo 30 puntos de estudio, dando un total de puntos de mediciones de 140 mediciones con monitores G2 y los detectores en modo descubierto. La distribución de los monitores DPR2 se realizaron en los tres periodos

de estudios pero solo se presentarán los resultados de los dos primeros periodos debido que a la fecha todavía se encuentran en proceso de lectura.

6.2.2 Evaluación temporal del fondo del monitor G2

Se ha realizado una evaluación de la densidad de trazas registrada por detectores G2 que no han sido expuestos (detectores G2 de fondo). Estos detectores G2 fueron almacenados dentro de bolsas selladas por diferentes intervalos de tiempos. Se determinó la tasa de densidad de trazas, $\dot{\rho}_b$ ($\text{Tr cm}^{-2} \text{h}^{-1}$), de los detectores G2 de fondo.

Se utilizaron 6 monitores G2 como testigos, 3 fueron almacenados por un tiempo de 48 días y los otros 3 por un tiempo de 326 días, estos detectores G2 también fueron tratados siguiendo el mismo procedimiento de grabado y lectura. Los resultados de densidad de trazas y su incertidumbre presentados en la Tabla 6.5 se obtuvieron utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente. Y con las ecuaciones 5.5 y 5.6 se calculó la tasa de densidad de trazas y su incertidumbre de cada detector G2 de fondo.

Tabla 6.5 Relación de detectores para la evaluación del fondo

Código	Fecha inicial	Fecha Final	Tiempo (h)	ρ_b Tr cm^{-2}	$u(\rho_b)$ Tr cm^{-2}	χ^2_v	$\dot{\rho}_b$ $\text{Tr cm}^{-2} \text{h}$
F-G2-CC01	13/02/2018	5/01/2019	7824	52,01	10	1,29	0,0066
F-G2-CC02	13/02/2018	5/01/2019	7824	70,48	10,67	1,06	0,0090
F-G2-CC03	13/02/2018	5/01/2019	7824	31,21	6,00	0,80	0,0040
				51,23	11,34		
F-G2-CC04	30/11/2018	17/01/2019	1152	21,23	4,90	0,87	0,0184
F-G2-CC05	30/11/2018	17/01/2019	1152	12,01	3,96	0,93	0,0104
F-G2-CC06	30/11/2018	17/01/2019	1152	5,94	2,93	0,97	0,0052
				13,06	4,44		0,0089

Por lo tanto, tomando el promedio de la tasa de densidad de trazas de fondo ($\dot{\rho}_b$) de los detectores G2 almacenados, Se obtuvo un valor de:

$$\overline{\dot{\rho}_b} = 0,009 \pm 0,002 \text{ Tr cm}^{-2} \text{ h}^{-1} \quad (6.4)$$

Utilizando el tiempo de exposición de cada detector (tiempo de medición en una vivienda), se puede determinar el fondo que le corresponde a cada uno de los 140 detectores G2.

6.2.3 Análisis de las concentraciones de radón

Para determinar la concentración de Rn-222 por el monitor G2, se debe realizar la diferencia entre la lectura del detector expuesto y su correspondiente fondo. Las 140 muestras han estado expuestas a diferentes tiempos, en promedio 87 días. Para determinar el fondo que debe restarse a cada detector se ha utilizado la tasa de densidad de trazas (ecuación 6.4) y el tiempo de exposición (en horas) de cada detector, se obtuvo un valor de fondo en promedio de 19 Tr cm^{-2} y una concentración de radón en promedio de 8 Bqm^{-3} como fondo (Tabla 6.6).

Tabla 6.6 Estimación de los valores de fondo durante el muestreo

t_{promedio} días	ρ_b Tr cm^{-2}	C_b Bqm^{-3}
87	$18,8 \pm 4,2$	$8,0 \pm 1,8$

En la Fig. 6.5, se muestra la densidad de trazas de cada detector y su estimación de densidad de trazas de fondo mediante la ecuación 6.4 y su tiempo de exposición. Se muestran los resultados de los 140 monitores G2 acomodados de manera descendente. Se puede ver que algunos detectores presentaron una densidad de trazas menor o igual que su correspondiente fondo.

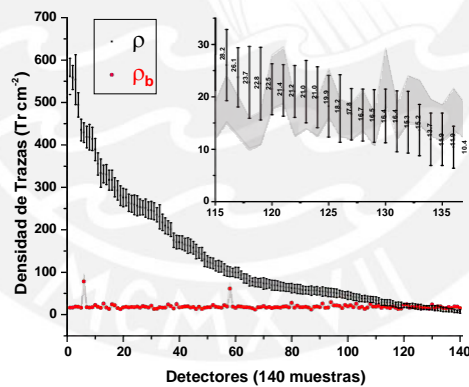


Fig. 6.5 Densidad de trazas y su fondo estimado
Imagen de las densidades de trazas medidas ρ (negro) con su correspondiente fondo ρ_b (rojo) estimado por la tasa de densidad de trazas

Inicialmente se establece una densidad de trazas calculada ($\rho_{\text{calc.}}$), como la diferencia entre ρ y ρ_b . Inicialmente se utilizó el criterio: si la diferencia entre la densidad de trazas calculada y el fondo estimado es menor que cero ($\rho_{\text{calc.}} < 0$), se debe conservar el valor de la densidad de trazas del detector (ρ) en evaluación, como puede verse en la Fig. 6.6a. Sin embargo, puede verse también que algunos valores de $\rho_{\text{calc.}}$ están por debajo del fondo estimado y su valor es muy cercano a cero alcanzando posiblemente valores negativos.

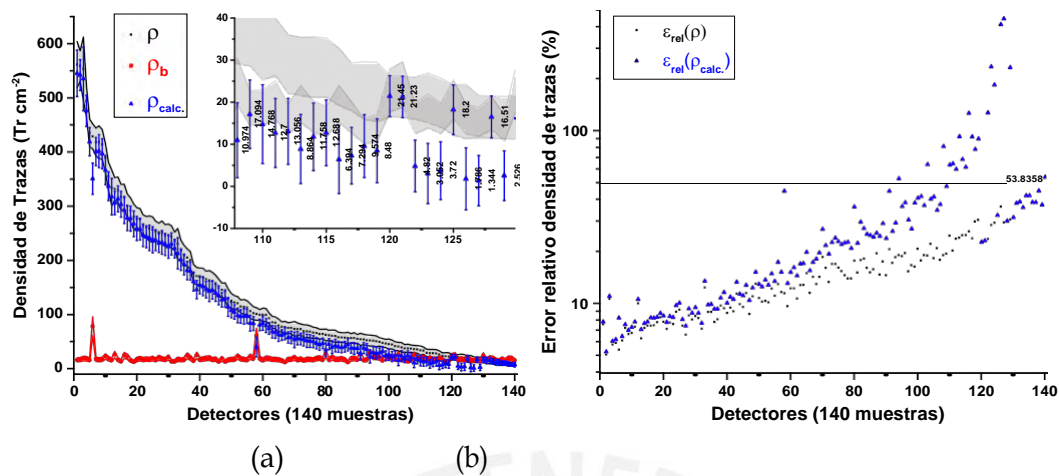


Fig. 6.6 Comparación de densidades de trazas de los detectores G2
 a) Comparación de las densidades de trazas y su fondo, b) Comparación del error relativo de densidades de trazas

Si se realiza una comparación del error relativo de la densidad de trazas del detector G2 (ρ) y su correspondiente densidad de trazas calculada ($\rho_{calc.}$), podemos ver en la Fig. 6.6b que a medida que el valor de la densidad de trazas es menor, el error relativo (ϵ_{rel}) aumenta. Podemos ver que para nuestro procesamiento del detector G2 para la menor de densidad de trazas se tiene un error relativo del 54% como máximo. Sin embargo, para los valores de $\rho_{calc.}$ en algunos casos son mayores del 100%.

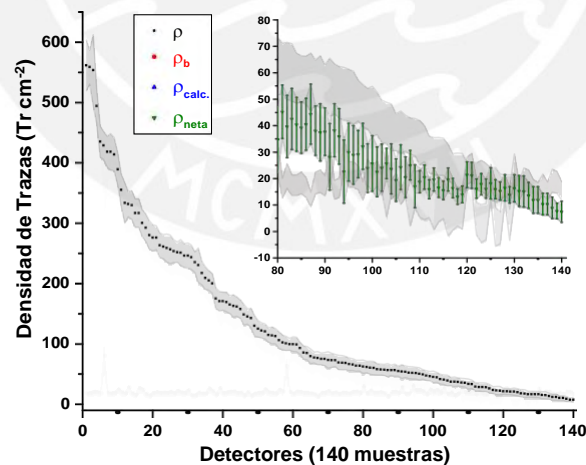


Fig. 6.7 Densidad de trazas neta con los monitores G2
 Densidad de trazas neta ρ_{neta} (verde) en comparación con la densidad de trazas medida ρ (negro), calculada $\rho_{calc.}$ (azul) y de fondo ρ_b (rojo)

Por esa razón se estable un nuevo criterio: Si el error relativo de la densidad de trazas calculada ($\epsilon(\rho_{calc.}) > 54\%$) se tomará el valor de la densidad de trazas de fondo estimado

ρ_b , debido que el valor $\rho_{calc.}$ es menor que ρ y aproximadamente igual a su correspondiente valor de fondo ($\rho_{calc.} > \rho$, $\rho_{calc.} \approx \rho_b$) como puede verse en la Fig.6.6a. Finalmente se determina la densidad de trazas neta (ρ_{neta}) de los detectores G2 en la Fig.6.7 de color verde, los cuales se utilizarán para determinar la concentración de radón C(Rn-222) de los detectores G2.

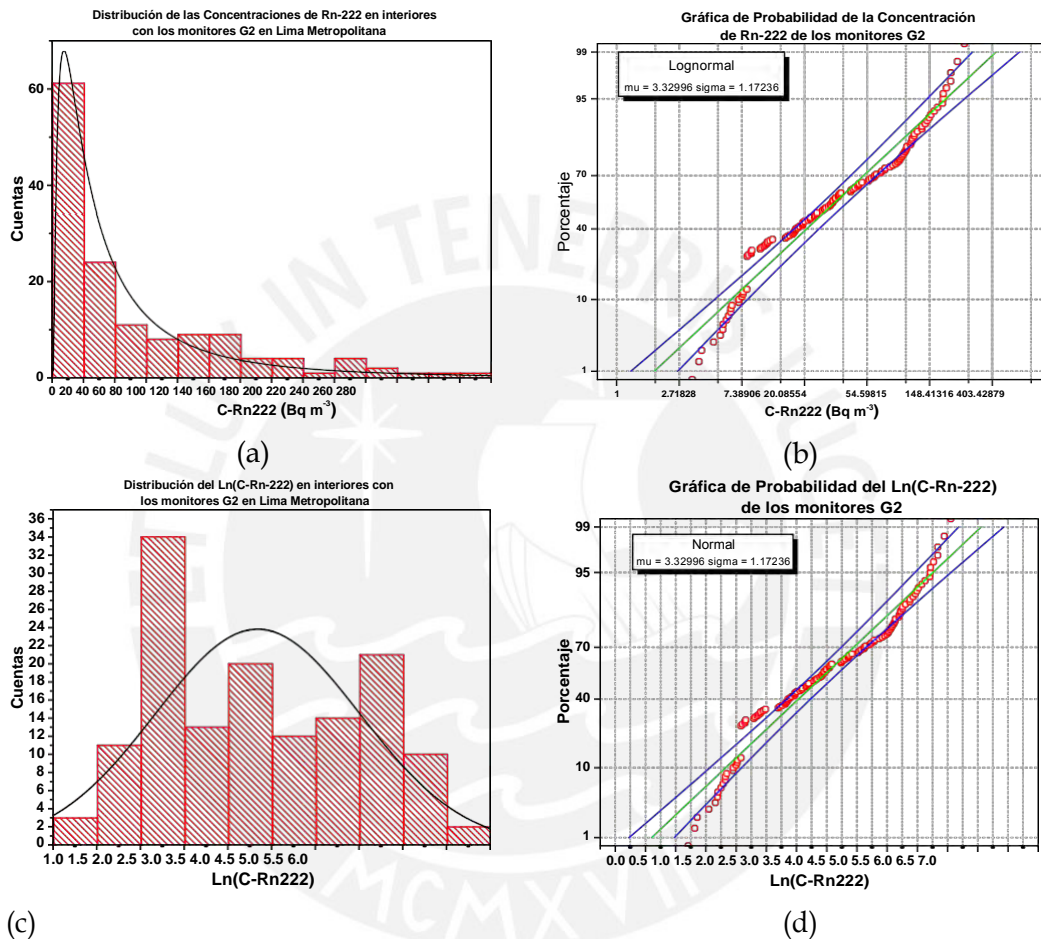


Fig. 6.8 Distribución de las concentraciones de Rn-222 medidas con los monitores G2
 a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución Log-normal; c) Distribución del Ln(C-Rn222); d) Gráfica de probabilidad de Ln(C-Rn222) para una distribución Normal

La distribución de las concentraciones de Rn-222 determinadas con los monitores G2 en los interiores de las viviendas de Lima Metropolitana se presentan en la Fig.6.8. En la Fig.6.8a y Fig.6.8b se presenta el histograma de las concentraciones de radón (C-Rn222) y la gráfica de probabilidad de cumplir con una distribución Log Normal respectivamente. En la Fig.6.8c y Fig.6.8d se presenta el histograma del Ln(C-Rn222) y la gráfica de probabilidad de cumplir con una distribución Normal.

Puede verse en las gráficas, tanto las de concentraciones de radón como sus transformaciones logarítmicas no cumplen con una distribución Log-normal y Normal respectivamente (de acuerdo con pruebas estadísticas). Debido a los valores bajos de concentraciones obtenidos y al número reducido de puntos de muestreo. Sin embargo, como puede verse en la Fig.6.9, no se han determinado valores anómalos en este muestreo aleatorio de medición de radón en los distritos de Lima Metropolitana.

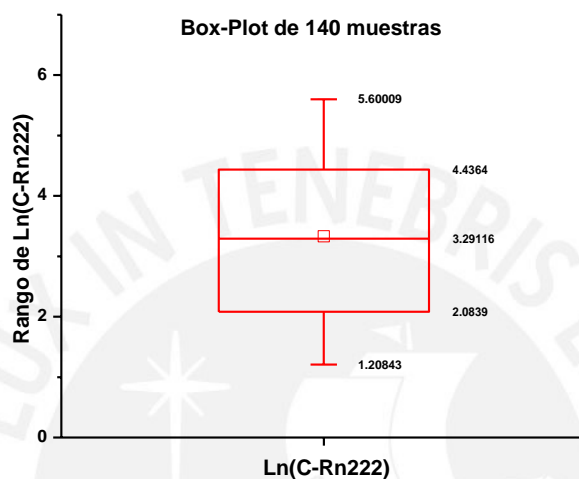


Fig. 6.9 Diagrama de cajas del Logaritmo natural de las concentraciones de radón
Diagrama de cajas del $\text{Ln}(C\text{-Rn}222)$ de las mediciones con los monitores G2

6.2.4 Mapa de radón de Lima Metropolitana

Si bien se ha establecido la importancia conocer sobre los niveles de radón en interiores por el riesgo que representa para las personas, también es importante representar gráficamente los resultados de las concentraciones de radón. A continuación, se presentan algunas gráficas relacionadas con la distribución espacial de los puntos de medición y su valor determinado mediante los monitores de radón G2 de la PUCP, finalmente se presenta el mapa de radón de Lima Metropolitana elaborado con los 140 puntos de medición de este trabajo.

En la Fig.6.10 se muestra la distribución espacial de los puntos de medición en los distritos de Lima Metropolitana los cuales han sido ubicados por sus coordenadas GPS, como se ha mencionado no se pudo ubicar puntos de medición en algunos distritos durante estos periodos de estudio. En la Fig.6.10 se muestran los puntos de medición en escala de colores de azul a rojo para niveles de concentración de 0 a 280 Bqm^{-3} respectivamente. En la Fig.6.10b se presentan los puntos de medición diferenciados por superar el nivel de referencia adoptado por el país (200 Bqm^{-3}), como puede verse de los 140 puntos de muestreo solo 5 superaron los 200 Bqm^{-3} (en color rojo).

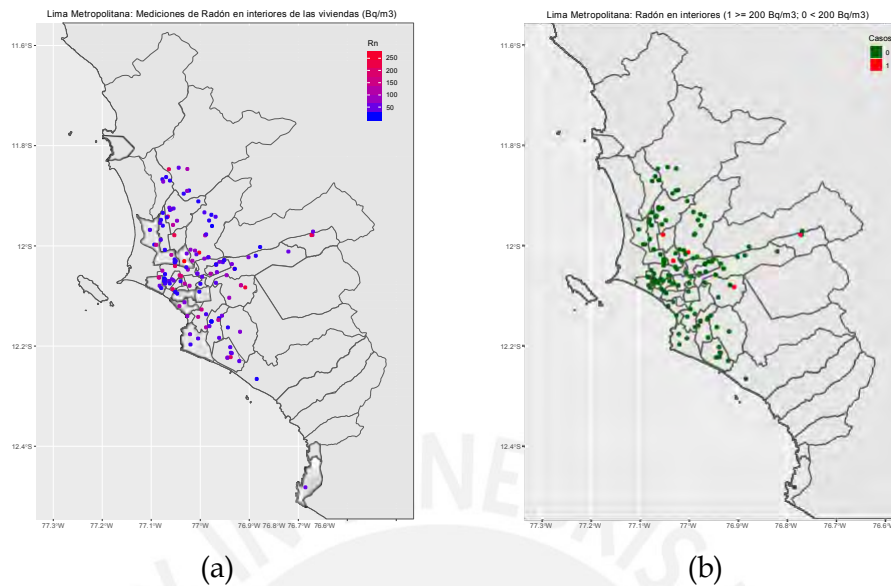


Fig. 6.10 Distribución espacial de los lugares de medición en Lima Metropolitana
 a) Puntos de medición en escala de colores por su valor de concentración de radón, b) Puntos de medición diferenciados por superar el nivel de referencia de 200 Bq/m³

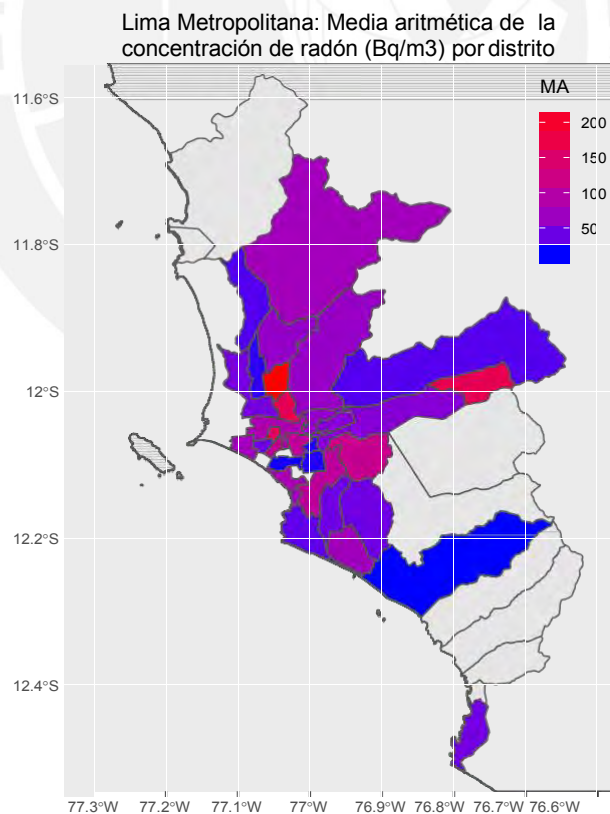


Fig. 6.11 Mapa del promedio de radón en Lima Metropolitana

Finalmente en la Fig.6.11 se presentan los niveles de radón por distritos en Lima Metropolitana en una escala de azul a rojo, este valor de concentración de radón se ha determinado por la media aritmética de las mediciones con los monitores G2 de cada de distrito durante los 3 periodos de medición.

6.3 Mediciones de radón con monitores DPR2 en Lima

6.3.1 Mediciones en Lima

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto PER9024, se presentan los resultados de las concentraciones de radón medidos con los monitores modelo DPR2 de la marca Algade. Durante los tres periodos de estudios se han utilizado 106 detectores DPR2, aproximadamente el 95% de los resultados han sido reportados como valores por debajo del límite de detección ($\leq LD$). Se han utilizado los valores máximos de los valores reportados para la evaluación de las concentraciones de radón en interiores, en la Fig.6.12a y Fig.6.12b se presenta el histograma de las concentraciones de radón medidos con los monitores DPR2 y la gráfica de probabilidad de cumplir con una distribución Log Normal respectivamente.

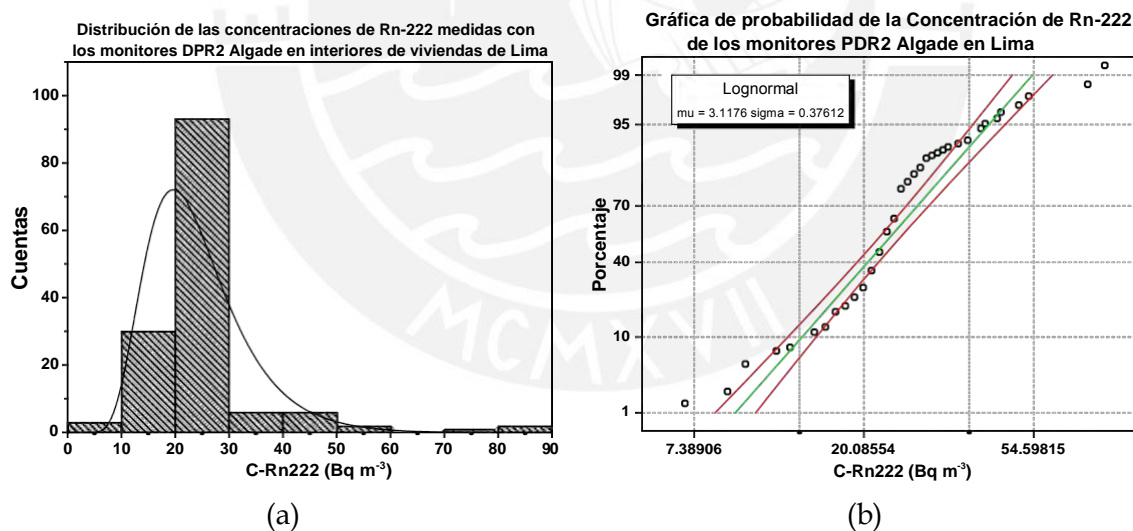


Fig. 6.12 Distribución de las concentraciones de Rn-222 con monitores DPR2 en Lima
a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución Log Normal

6.3.2 Comparación de resultados con diferentes monitores

Se ha realizado una comparación de las mediciones simultáneas de radón con los monitores G2 y DPR2 (Fig.6.13). En la Fig.6.13a que las mediciones con los monitores DPR2 midieron concentraciones de radón muy bajas en comparación a los monitores G2. En la Fig.6.13b se comparó la medición de los detectores que superaron su valor de Límite de detección de Exposición (42 kBqhm^{-3}).

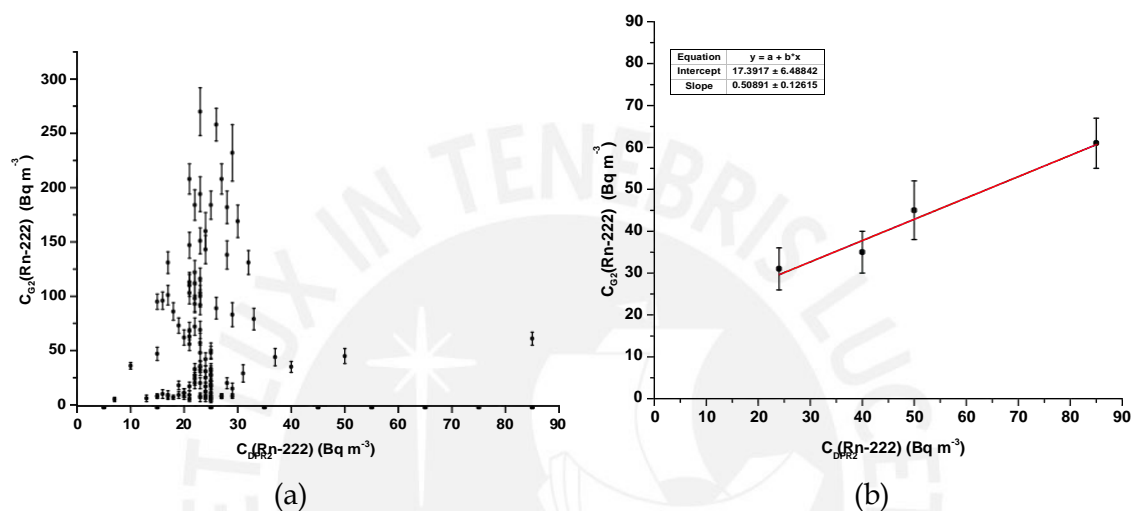


Fig. 6.13 Comparación de concentraciones de radón con monitores G2 y DPR2
a) Comparación de concentraciones de radón de 106 puntos de medición simultánea; b)
Comparación con monitores DPR2 que superaron su Límite de detección

Se pudo encontrar la siguiente relación entre las mediciones de concentración de radón (Bq m^{-3}) de ambos monitores:

$$C_{G2}(Rn - 222) = 0,5C_{DPR2}(Rn - 222) + 17,4 \quad (6.5)$$

Esta ecuación se relaciona con las características de medición de los monitores. Se ha estimado como límite de detección de los monitores G2 el valor de $22,5 \pm 2,7 \text{ Bq m}^{-3}$, con detectores almacenados 1152 horas. Expresado en unidades de exposición para su comparación con el límite de detección del monitor DPR2 (42 kBqhm^{-3}), da un valor de $25,9 \pm 3,1 \text{ Bq m}^{-3}$ para los monitores G2. Por lo tanto, puede verse que los monitores G2 miden un poco más de la mitad de la concentración de radón medida con los monitores DPR2 por hora.

6.4 Análisis de las mediciones en modo descubierto

6.4.1 Fondo para medición en modo descubierto

El fondo de medición para esta técnica se determinó utilizando 10 detectores almacenados en un sobre de manera que no se produzcan trazas por emisiones alfa. En la Tabla 6.7 se presentan los resultados de los 10 detectores utilizados para determinar el fondo, resultando un fondo de $7,47 \pm 0,63 \text{ Trcm}^{-2}$.

Tabla 6.7 Detectores LR-115 de fondo para modo descubierto

Código	ρ Trcm ⁻²	$u(\rho)$ Trcm ⁻²	χ^2_{ν}	N° campos
Bare-01	7,43	3,26	0,96	100
Bare-02	9,10	4,17	1,29	98
Bare-03	8,92	4,13	1,29	100
Bare-04	7,43	3,88	1,36	100
Bare-05	10,40	3,81	0,94	100
Bare-06	5,94	3,61	1,47	100
Bare-07	7,58	3,92	1,36	98
Bare-08	8,92	4,13	1,29	100
Bare-09	4,46	2,55	0,98	100
Bare-10	4,50	2,56	0,98	99
	7,47			

6.4.2 Análisis de las concentraciones de radón

Se han utilizado dos detectores LR-115 en modo descubierto para determinar la concentración de Rn-222 en interiores de viviendas. La Concentración de radón se determinó mediante la ecuación 6.6, utilizando el Factor de calibración parcial determinado por K.P. Eappen y Y.S. Mayya [20], F_{C-B} igual a $0,833 \text{ Trcm}^{-2} / \text{kBqhm}^{-3}$ ($0,02 \text{ Trcm}^{-2} / \text{kBqdm}^{-3}$). Y el Factor de equilibrio (EF) recomendado de 0,4 en [31], determinado por estudios realizados con detectores en modo abierto y cerrado.

$$C_{Rn-222} = \frac{\bar{\rho}_B - \bar{\rho}_{B_b}}{[F_{C-B}(1 + 2 EF_{Rn-222})]t} \quad (6.6)$$

La distribución de las concentraciones de Rn-222 en viviendas de Lima Metropolitana con detectores en modo descubierto se presentan en la Fig. 6.14. En la Fig. 6.14a y Fig. 6.14b se presenta el histograma de las concentraciones de radón (C – Rn222) y la gráfica de probabilidad de cumplir con una distribución Log-normal respectivamente. En la Fig. 6.14c y Fig. 6.14d se presenta el histograma del Ln(C – Rn222) y la gráfica de probabilidad de cumplir con una distribución Normal.

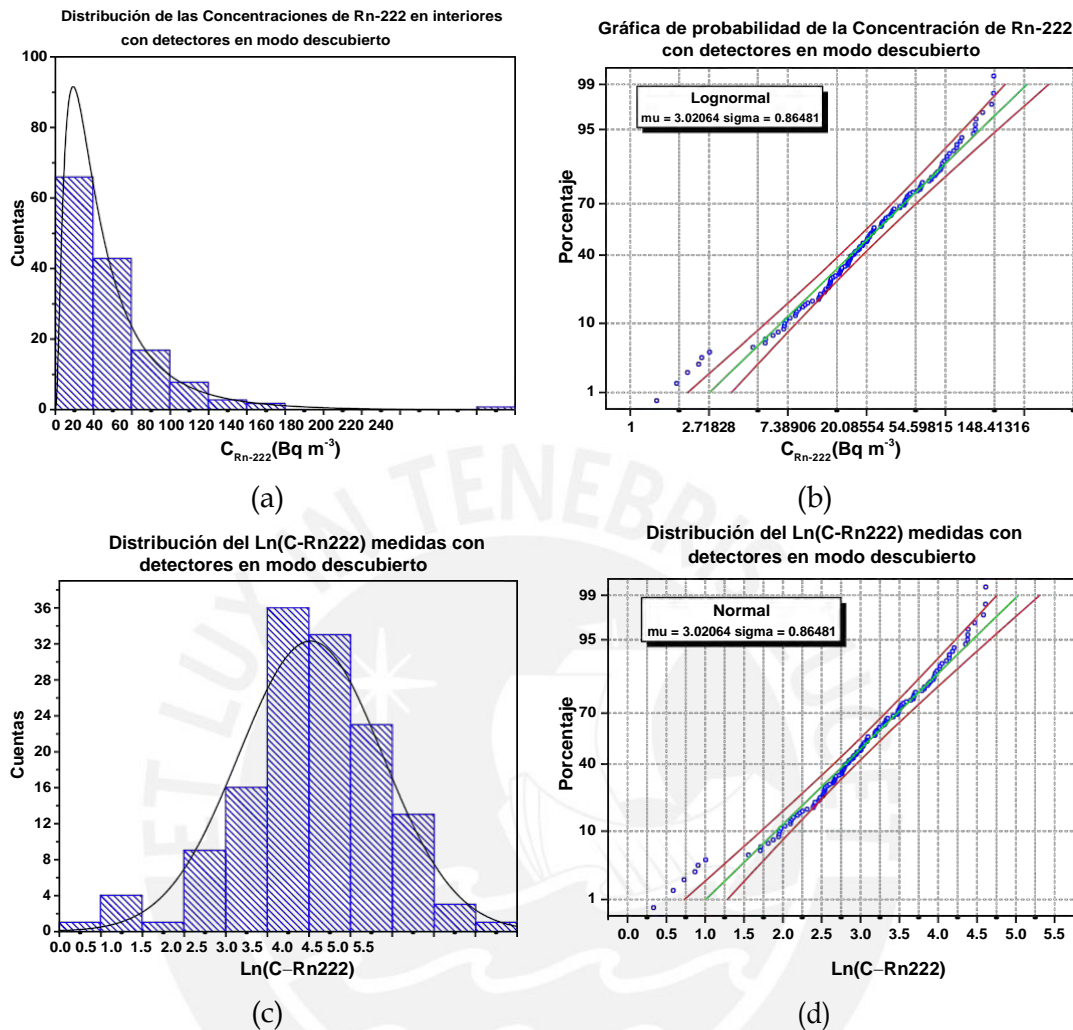


Fig. 6.14 Distribución de las concentraciones de Rn-222 en interiores por detectores LR-1115 en modo descubierto

a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución Log Normal; c) Distribución del Ln(C-Rn222); d) Gráfica de probabilidad de Ln(C-Rn222) para una distribución Normal

Puede verse en las gráficas, tanto las de concentraciones de radón como sus transformaciones logarítmicas, no cumplen con una distribución Log-normal y Normal respectivamente (de acuerdo con pruebas estadísticas). Puede verse en la Fig. 6.15, se han determinado algunos valores anómalos de medición de concentraciones de radón en interiores de viviendas de los distritos de Lima Metropolitana con detectores en modo descubierto.

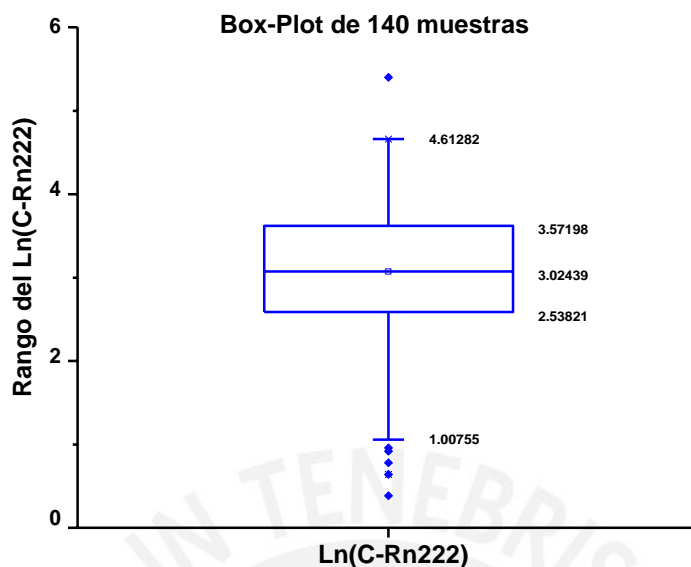


Fig. 6.15 Diagrama de cajas del Logaritmo natural de las concentraciones de alfa total Diagrama de cajas del $\text{Ln}(\text{C-Rn222})$ de las mediciones con detectores LR-115 en modo descubierto

6.4.3 Estimación del Factor de Equilibrio

Se han utilizado las concentraciones de Rn-222 mediante detectores en modo descubierto (medición modo abierto) y con detectores G2 (medición en modo cerrado) de los 140 puntos de muestreo. Mediante una comparación de las mediciones ($C_{\text{Rn22}}(\text{Bare})$) entre $C_{\text{Rn22}}(\text{G2})$ y el diagrama presentado en la Fig.4.5 se determinaron los Factores de equilibrio de los diferentes lugares de medición (EF_{Exp}).

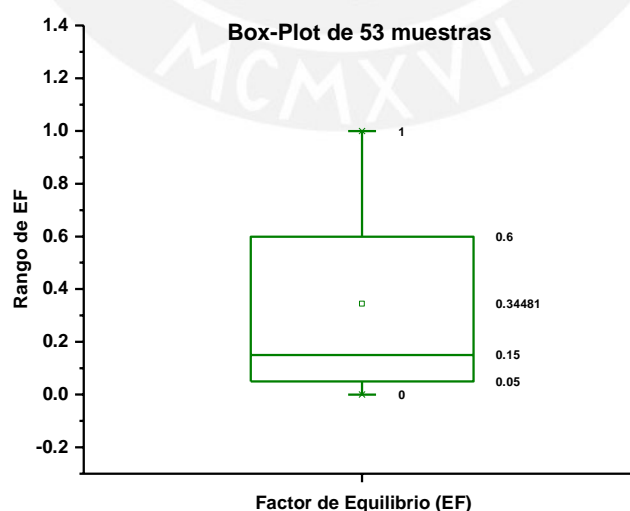


Fig. 6.16 Diagrama de cajas del Factor de equilibrio

De acuerdo con la Fig.6.16 en un total de 53 muestras el Factor de equilibrio los lugares de medición se encontraron entre 0 y 1, resultando un valor en promedio de $0,35 \pm 0,04$. Utilizando este valor de factor de equilibrio pudo estimarse un Factor de calibración para este tipo de medición de $1,4 \pm 0,04 \text{ Trcm}^{-2}/\text{kBqhm}^{-3}$. Sin embargo la dispersión de los datos en el factor de equilibrio representada por su desviación estándar estuvo en el orden de 0,26. Por lo tanto, se puede ver por este estudio que para la medición de Rn-222 por detectores descubiertos necesariamente se debe de conocer el Factor de equilibrio del lugar de medición.

6.4.4 Estimación del PAEC con detectores descubiertos

Se ha estimado la concentración en energía potencial alfa (PAEC por sus siglas en ingles) de los lugares de medición mediante la ecuación 6.7, en unidades de nivel de trabajo (WL por sus siglas en ingles) según [33]. La PAEC se expresa comúnmente en unidades de mWL, se ha utilizado un factor K_{WL} de $442 \text{ Trcm}^{-2}/\text{WLd}$ ($18,42 \text{ Trcm}^{-2}/\text{WLh}$) para medición en modo descubierto con detectores LR-115 (tipo II) para las mismas condiciones de revelado de este trabajo.

$$PAEC = \frac{Q_{Bare}}{K_{WL}t} \quad (6.7)$$

Utilizando las densidades de trazas de los detectores en modo descubierto (Trcm^{-2}) y su tiempo de exposición (horas), se determinó la PAEC. Estos valores se encontraron entre 0,1 a 18,0 mWL como puede verse en la Fig.6.17, que es una unidad histórica de concentración de productos de desintegración radiactiva del radón. El valor promedio de este parámetro en este estudio fue de $2,3 \pm 0,2 \text{ mWL}$.

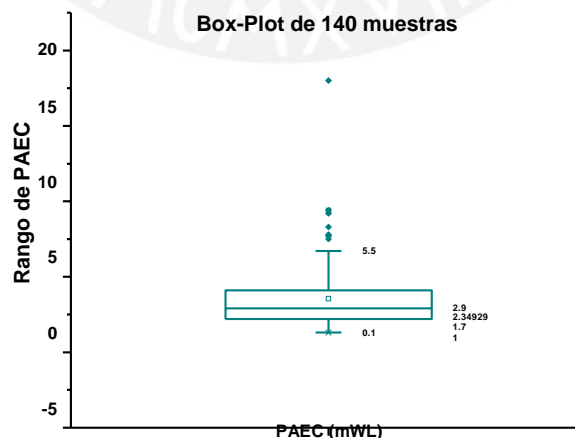


Fig. 6.17 Diagrama de cajas de PAEC

Capítulo 7

Conclusiones

Se estableció el uso de un nuevo monitor de radón usando el detector LR-115, con un factor de transmisión (F) de 94,8% y 0,3% para Rn-222 y Rn-220 respectivamente. El monitor G2 ha sido calibrado para medición de radón en interiores, con un factor de calibración (FC) de $1,12 \pm 0,03 \text{ Trcm}^{-2} \text{ kBqhm}^{-3}$. Y se ha estimado el umbral de decisión y límite de detección del monitor G2 con valores de $9,7 \pm 1,7 \text{ Bqm}^{-3}$ y $22,5 \pm 2,7 \text{ Bqm}^{-3}$ respectivamente.

Se realizó el primer muestreo de radón en interiores de las viviendas de Lima Metropolitana con un monitor de radón, monitor G2 (PUCP). El muestreo realizado durante los meses de septiembre del 2017 y diciembre del 2018 se ha determinado que en promedio la concentración de radón en Lima Metropolitana es de $53 \pm 5 \text{ Bqm}^{-3}$, el 50% de los puntos estudiados presentan valores menores de 27 Bqm^{-3} y el 3,6% de los lugares estudiados presentaron valores que superaron el nivel de referencia de 200 Bqm^{-3} . Utilizando las mediciones de radón por el monitor G2 se ha elaborado un mapa de radón en interiores de las viviendas en los distritos de Lima Metropolitana.

En relación con las mediciones de radón en interiores con detectores LR-115 en modo descubierto se obtuvo un valor promedio de $29 \pm 2 \text{ Bqm}^{-3}$ en el interior de las viviendas de Lima Metropolitana. Se ha determinado el factor de calibración para este método, con un valor de $1,4 \pm 0,1 \text{ Trcm}^{-2} \text{ kBqhm}^{-3}$. Se utilizó el Factor de equilibrio medido experimentalmente, $0,34 \pm 0,04$, se encuentra dentro del rango establecido por estudios relacionados al tema. Se estimó la concentración en energía potencial alfa (PAEC) de los lugares de estudio en el rango de 0,1 a 18 mWL, siendo el valor promedio de $2,3 \pm 0,2 \text{ mWL}$. La dispersión de los resultados con estos detectores muestran la importancia de conocer el Factor de equilibrio del lugar en estudio.

Utilizando las mediciones simultáneas de monitores G2 y DPR2 se ha realizado una comparación de las concentraciones de radón medidas, pudo verse que los monitores G2

miden aproximadamente la mitad de concentración de radón por hora mediante los monitores DPR2.

Gracias a los detectores del Proyecto PER-9024 se ha determinado las concentraciones de radón en interiores de las viviendas de Lima, Arequipa, Cusco y Puno. El valor promedio de los resultados de Lima fue de $38 \pm 3 \text{Bqm}^{-3}$, el 75% de los resultados se encuentran por debajo de 45Bqm^{-3} y el máximo valor de concentración de radón registrado por este monitor fue de 85Bqm^{-3} , por lo tanto ningún valor supero el nivel de referencia adoptado por el país. Presentando un valor mayor al de las otras regiones del país, la concentración de radón promedio en Arequipa fue $21 \pm 1 \text{Bqm}^{-3}$, en Cusco fue $20 \pm 1 \text{Bqm}^{-3}$ y en Puno fue de $20 \pm 1 \text{Bqm}^{-3}$, los resultados se presentan el anexo C.



Bibliografía

- [1] Abdalla, A., Ismail, A., and I. Al-Naggar, T. (2017). *Radon*, chapter 8, pages 125–145. IntechOpen, London. <https://www.intechopen.com/books/radon>.
- [2] Ahmed, S. N. (2007). *Physics and Engineering of Radiation Detection*. Elsevier, San Diego.
- [3] Alonso, M. and Finn, E. (1968). *Physics, Volume III, Quantum and Statistical Physics*. Addison-Wesley, Massachusetts.
- [4] Asociación Colombiana del Petróleo (2018). ¿Qué son los hidrocarburos en reservorios no convencionales? [Fecha de acceso: 05 de febrero de 2019] <http://acp.com.co/web2017/es/fracking/que-son-los-hidrocarburos-en-reservorios-no-convencionales>.
- [5] Ball, T. K., Cameron, D. G., Colman, T. B., and Roberts, P. D. (1991). Behaviour of radon in the geological environment: a review. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24(2):169–182.
- [6] Barazza, F. (2016). Radon Map of Switzerland, Experience in Switzerland (Regional Workshop on Radon in Workplaces).
- [7] Basdevant, J.-L., Rich, J., and Spiro, M. (2005). *Fundamentals in Nuclear Physics*. Springer, New York.
- [8] Becquerel, H. (1896). Sur les radiations émises par phosphorescent. *Comptes Rendus*, 122:420–421.
- [9] Biophysics and Medical Physics Group - BMF Group (2016). *Radon, lung cancer and the LNT model*. University of Oslo, Oslo.
- [10] Caresana, M., Campi, F., and Ferrarini, M. (2005). Evaluation of etching correction factor for Ir115 cellulose nitrate films from track parameters. *Radiation Protection Dosimetry*, 113(4):354–358.
- [11] Caresana, M. and Ferrarini, M. (2010). Performance evaluation of a new reading technique of Ir115 cellulose nitrate track detectors. *Radiation Measurements*, 45(8):911 – 915.
- [12] Catelani, M., Zanobini, A., and Ciani, L. (2010). Uncertainty Interval Evaluation Using the Chi-Square and Fisher Distributions in the Measurement Process. *Metrology and Measurement Systems*, (2):195–204.

- [13] Cember, H. and Johnson, T. (1976). *Introduction to Health Physics*. Mc Graw-Hill Company, Inc., New York.
- [14] Cothorn, C. and Smith, J. (1992). *Environmental Radon*. Springer, New York.
- [15] Darby, S et al (2005). Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 european case-control studies. *BMJ*, 330(7485):223.
- [16] De With, G. and De Jong, P. (2011). Simulation of thoron and thoron progeny concentrations in the indoor environment. *Journal of Building Physics*, 35(2):101 – 127.
- [17] Dowdall, A., Fenton, D., Flynn, S., Murphy, P., Murray, M., Polard, D., and Rafferty, B. (2017). *Updating Irelands national average indoor radon concentration using a new survey protocol*. The Environmental Protection Agency-EPA, Wexford.
- [18] Duggal, V., Mehra, R., and Rani, A. (2015). An investigation of factors influencing indoor radon concentrations in dwellings of northern rajasthan, india. *Journal of Geological Society of India*, 86.10.1007/s12594-015-0296-2.
- [19] Durrani, S. and Ilić, R. (1997). *Radon Measurements by Etched Tracks Detectors*. World Scientific, Singapore.
- [20] Eappen, K. and Mayya, Y. (2004). Calibration factors for Ir-115 (type-ii) based radon thoron discriminating dosimeter. *Radiation Measurements*, 38(1):5 – 17.
- [21] Edwards, R. (2005). *Handbook of Domestic Ventilation*. Elsevier, Oxford.
- [22] Eguilior, S., Hurtado, A., and Recreo, F. (2014). Riesgos asociados a la radioactividad natural en los proyectos de extracción de gas no convencional.
- [23] Elío, J. and Crowley, Q. and Scanlon, R. (2017). Logistic regression model for detecting radon prone areas in Ireland. *Science of the Total Environment*, 599-600:1317–1329.
- [24] Federal Office of Public Health (2018). Radon map of Switzerland. [Fecha de acceso: 17 de octubre de 2018] <https://www.bag.admin.ch/bag/en/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivitaet-schall/radon/radongebiete-ch.html>.
- [25] Fennell, S. G., Mackin, G. M., Madden, J. S., McGarry, J. A., Duffy, J. T., O'Colmain, M., Colgan, P. A., and Pollard, T. (2002). Radon in Dwellings: The Irish National Radon Survey.
- [26] Ferrer, A. (2006). *Física nuclear y de partículas*. Universidad de València, Valencia.
- [27] Fleischer, R., Buford, P., and Walker, R. (1975). *Nuclear Tracks in Solids, Principles and Applications*. University of California Press, California.
- [28] Garcia, V. (2016). Parámetros geométricos de trazas reveladas en detectores LR-115 irradiados con partículas alfa. Tesis de Grado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas.
- [29] Garzón, L. (1992). *El radón y sus riesgos*. Universidad de Oviedo, Asturias.
- [30] Gilmore, G. (2008). *Practical Gamma-Ray Spectrometry*. John Wiley and Sons, Warrington.

- [31] GT Analytic (2019). Kodalpha Radon-Dosimeters and LR155 SSNTD Specifications. [Fecha de acceso: 01 de enero de 2019]http://www.gt-analytic.at/downloads_en/Kod_tech_det.pdf.
- [32] Guo, S.-L., Chen, B.-L., and Durrani, S. (2012). Chapter 4 - solid-state nuclear track detectors. In L'Annunziata, M. F., editor, *Handbook of Radioactivity Analysis*, pages 233 – 298. Academic Press, Amsterdam, third edition edition.
- [33] Gupta, M., K Mahur, A., Sonkawade, R., and Verma, k. d. (2019). Monitoring of indoor radon and its progeny in dwellings of delhi using ssntds. *Advances in Applied Science Research*, 2(5):421–426.
- [34] Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015). Día internacional de la población 2015. Technical report, INEI.https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1251/Libro.pdf.
- [35] Instituto Peruano de Energía Nuclear (1997). Reglamento de Seguridad Radiológica.http://www.ipen.gob.pe/transparencia/regulacion/leyes_normatividad.htm. [Fecha de acceso: 10 de junio de 2018].
- [36] International Atomic Energy Agency (2011). *Naturally Occurring Radioactive Material*. IAEA Proceedings series, Vienna.
- [37] International Atomic Energy Agency (2013). *National and Regional Surveys of Radon Concentration in Dwellings*. IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 33, Vienna.
- [38] International Atomic Energy Agency (2019). Live Chart of Nuclides. [Fecha de acceso: 01 de enero de 2019]<http://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
- [39] International Commission on Radiological Protection (1977). *Publication 26: 1977 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP.
- [40] International Commission on Radiological Protection (1991). *Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP.
- [41] International Commission on Radiological Protection (2007). *Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Annals of the ICRP.
- [42] International Organization for Standardization, editor (2010). *Statistical interpretation of data – Part 4: Detection and treatment of outliers*. ISO 16269-4.<https://www.iso.org/standard/44396.html>.
- [43] International Organization for Standardization, editor (2012). *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 11665-4.<https://www.iso.org/standard/52190.html>.

- [44] Ishiromi, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y., and Phaneuf, M. (2013). *Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues*. IAEA Technical Reports Series No. 474, Vienna.
- [45] Jamil, K., ur Rehman, F., Ali, S., and Khan, H. (1997). Determination of equilibrium factor between radon and its progeny using surface barrier detector for various shapes of passive radon dosimeters. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 388(1):267 – 272.
- [46] Kaplan, I. (1962). *Física Nuclear*. Aguilar, Madrid.
- [47] Knoll, G. (2000). *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley and Sons, New York.
- [48] Kropat, G., Bochud, F., Jaboyedoff, M., Laedermann, J., Murith, C., Palacios, M., and Baechler, S. (2014). Major influencing factors of indoor radon concentrations in switzerland. *Journal of environmental radioactivity*, 129:7–22.
- [49] L'Annunziata, M. F. (2007). Radioactivity Hall of Fame-Part I". In L'Annunziata, M. F., editor, *Radioactivity*, pages 47 – 70. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- [50] Leigh, J. (1997). *Occupational Health and Safety in uranium mining and milling*, pages 59–110.
- [51] Levy, J. (2009). *Radon*. Rosen Central, New York.
- [52] Liza, R. (2017). Mapeo de los Niveles de Radón 222 en el distrito de San Martín de Porres (Lim-Perú) en el periodo 2015-2016. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- [53] Lucía Málaga-Sabogal (2015). Densidad poblacional en los distritos de Lima 2015. <http://lamalaga.com/esp/vivir-en-lima-distribucion-y-edad-de-los-limenes-por-distrito/>.
- [54] Martin, J. (2013). *Physics for Radiation Protection*. Wiley, Weinheim.
- [55] Metrology for Radon monitoring-MetroRadón (2019). *Intercomparison of indoor radon and geogenic radon measurements under field conditions*. MetroRadon, Salamanca.
- [56] Mi.am (2016). *Politrack User manual Radon LR115*. mi.am srl, Rivergaro, lr. 6.4 edition.
- [57] Mireles, F., Dávila, J., García, M., Pinedo, J., and López, H. (2010). Evaluation of Efficiency Calibration Parameters of the LR-115 Radon Detector. *Health Physics*, 98(2):S63–S68.
- [58] Mohamed, A. (2004). Influence of radioactive aerosol and biological parameters of inhaled radon progeny on human lung dose. *Radiation Protection Dosimetry*, 113(1):115–122.
- [59] Murith, C., Barazza, F., Ryf, S., and Palacios, M. (2014). Implementation of the new international standards in swiss legislation on radon protection in dwellings. *Radiation Protection Dosimetry*, 164(1-2):28–29.

- [60] National Research Council (US) Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water (1999). *Risk Assessment of Radon in Drinking Water*. National Academies Press, Washington.
- [61] Nazaroff, W. and Nero, A. (1988). *Radon and its decay products in indoor air*. Wiley-Interscience, New York.
- [62] Nikezic, D. and Janicijevic, A. (2002). Bulk etching rate of Ir115 detectors. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 57:275–8.
- [63] Nikezic, D. and Yu, K. (2004). Formation and growth of tracks in nuclear track materials. *Materials Science and Engineering*, 46(3):51–123.
- [64] Observatorio Urbano - Desco (2007). Densidad poblacional Lima 2007. <http://observatoriourbano.org.pe/project/densidad-poblacional-lima/>.
- [65] OVAN Laboratory Equipment (2018). *Bath OvanTherm MultiMix*. OVAN. [Fecha de acceso: 30 de diciembre de 2018] https://www.ovan.es/sites/default/files/datasheet_bath_ovantherm_multimix.pdf.
- [66] Panchbhai, A. (2015). Wilhelm Conrad Röntgen and the discovery of X-rays: Revisited after centennial. *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*, 27(1):90–95.
- [67] Pereyra, P., López, M., and Vilcapoma, L. (2015). Concentration measurements of Radon 222 Indoors in Lima-Peru. *International Journal of Physics*, 3(4):165–169.
- [68] Philip Bevington, D. Robinson (2003). *Data Reduction and Error Analysis*. McGraw Hill, New York.
- [69] Poncela, L. Q., Fernandez, P., and Soto, J. (1991). National survey on indoor radon in Spain. *Environment International*, 17:449–453.
- [70] Porstendorfer, J. and Reineking, A. (1992). Indoor behaviour and characteristics of radon progeny. *Radiation Protection Dosimetry*, 45(1/4):303–311.
- [71] Pérez, C., Gascó, C., and López, M. (2010). Umbral de Decisión y Límite de Detección en Medidas Espectrométricas. Parte 1: Aplicación a la Espectrometría Gamma. Technical report, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas-CIEMAT, Madrid.
- [72] Radvanyi, P. and Villain, J. (2017). The discovery of radioactivity. *Comptes Rendus Physique*, 18(9):544–550. Science in the making: The Comptes rendus de l'Académie des sciences throughout history.
- [73] Ramachandran, V. and Sahoo, B. (2009). Thoron (220rn) in the indoor environment and work places. *Indian Journal of Physics*, 83:1079 – 1098.
- [74] S. D. Schery (1990). Thoron in the environment. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 40(4):493–497.

- [75] Sahoo, B., Sapra, B., Kanse, S., Gaware, J., and Mayya, Y. (2013). A new pin-hole discriminated $^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$ passive measurement device with single entry face. *Radiation Measurements*, 58:52 – 60.
- [76] Sainz-Fernandez, C., Fernandez-Villar, A., Fuente-Merino, I., Gutierrez-Villanueva, J. L., Martin-Matarranz, J. L., Garcia-Talavera, M., Casal-Ordas, S., and Quindós-Poncela, L. S. (2014). The spanish indoor radon mapping strategy. *Radiation Protection Dosimetry*, 162(1-2):58–62.
- [77] Sakoda, A., Ishimori, Y., and Yamaoka, K. (2011). A comprehensive review of radon emanation measurements for mineral, rock, soil, mill tailing and fly ash. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10):1422 – 1435.
- [78] Silverman, M. (2016). Method to measure indoor radon concentration in an open volume with geiger-mueller counters: Analysis from first principles. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 06:232–260.
- [79] Singh, P., Singh, P., Singh, S., Sahoo, B., Sapra, B., and Bajwa, B. (2015). A study of indoor radon, thoron and their progeny measurement in Tosham region Haryana, India. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 8(2):226 – 233.
- [80] Subba Ramu, M.C. and Muraleedharan, T.S. and Ramachandran, T.V. (1988). Calibration of a solid state nuclear track detector for the measurement of indoor levels of radon and its daughters. *The Science of the total environment*, 73:245–55.
- [81] The International Commission on Radiation Units and Measurements (2015). *Measurement and Reporting of Radon Exposures*. ICRU Report 88, New York.
- [82] The International Commission on Radiological Protection (1993). *Protection Against radon-222 at Home and at Work*. ICRP Publication 65, Gloucester.
- [83] Torres, S. (2017). Mapeo de Radón 222 en interiores en el Distrito de Los Olivos (Lima-Perú) del 2015-2016. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- [84] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report, Volume I*. UNSCEAR, New York.
- [85] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2010). *Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report, Volume I*. UNSCEAR, New York.
- [86] United States Environmental Protection Agency (2011). *A Citizen's Guide to Radon*. EPA.
- [87] Varshney, R., Sonkawade, R., Gupta, M., Chauhan, R. P., Mahur, A., Kant, K., Parveen, A., and Chakarvarti, P. (2011). Bulk etch rate estimation of LR-115 SSNTD using PHOENIX interface. *Radiation Measurements*, 46:461–463.

- [88] Vega, B. (2017). Monitoreo de la concentración de la actividad de Rn-222 en el distrito de San Luis-Lima durante los años 2015-2016. Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- [89] World Health Organization (2009). *WHO Handbook on Indoor Radon*. WHO Press, Geneva.
- [90] Zhukovsky, M., Onishchenko, A., and Bastrikov, V. (2009). Radon measurements-discussion of error estimates for selected methods. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine*, 68:816-20.



Anexo A

Instructivos de uso de detectores

¿CÓMO USARLO?

¡Agradecemos su participación en el monitoreo de radón en Lima!

Ahora que tiene los detectores, colocarlos es muy fácil. Solo siga las siguientes instrucciones:

- Un medidor de Rn222
- Cinta adhesiva
- Un lápiz o lapicero

- 1** AL COLOCAR EL ADHESIVO, ASEGÚRESE DE QUE LA PARTE SENSIBLE ESTÉ HACIA AFUERA
- 2** COLOQUE EL DETECTOR EN LA PARED, A LA ALTURA DE SUS OJOS
- 3** ESCRIBA FECHA Y HORA EN LA MICA TRANSPARENTE O EN EL SOBRE
- 4** LUEGO DE 8 SEMANAS, RETIRE EL DETECTOR, GUÁRDELO EN EL SOBRE Y CONTACTE A GITHUNU

Para cualquier consulta, favor de comunicarse al 626 0000 anexo 4112
Facebook: GITHUNU-Radón ** Correo: grupo.githunu@pucp.pe

Fig. A.1 Indicaciones de uso de los detectores LR-115 en modo descubierto

INSTRUCCIÓN PARA LA COLOCACIÓN DE MEDIDORES DE RADÓN 222





Se te están entregando 4 medidores de Radón 222: 2 cámaras de difusión y en el sobre dos plaquitas que sostienen 2 detectores. Todos **deben ser colocados en una habitación del primer piso**, de preferencia un lugar **poco ventilado, alejado de fuentes de calor y NO colocarlos en cocinas o baños**. Las instrucciones para colocar los detectores del sobre, se encuentran en el documento anexo.

Para las cámaras de difusión, retirarlas de la bolsa plástica. Ambas cámaras deben ser colocadas próximas entre sí. Sobre una mesa o repisa, en un lugar seguro, donde no sean removidas durante la medición.

La cámara blanca debe ser colocada sin abrirla, anotar la fecha de inicio de la medición y luego se anotará la fecha de retiro. La cámara negra debe colocarse en posición ON, girando levemente la lengüeta de la parte plana.

Luego de un mínimo de 80 días, colocar los detectores desnudos en el sobre (o envolverlos en papel). **La cámara negra se coloca en posición OFF**. Se colocan ambas cámaras en la bolsa, anotando la fecha de retiro en la cámara blanca.



DETECTOR OFF



DETECTOR ON

Fig. A.2 Indicaciones de uso de los monitores de Rn-222

Anexo B

Tabla de Chi cuadrado reducido

Valores del chi-cuadrado reducido $\chi_v^2 = \chi^2/v$ correspondientes a la probabilidad $P_\chi(\chi^2;v)$ de exceder χ^2 frente al número de grados de libertad v .

Tabla B.1 Tabla de Chi cuadrado reducido-Parte I

k	P														
	0.9950	0.9900	0.9750	0.9500	0.9000	0.7500	0.5000	0.2500	0.1000	0.0500	0.0250	0.0100	0.0050	0.0020	0.0010
1	0.0000	0.0002	0.0010	0.0039	0.0157	0.1020	0.4550	1.3230	2.7060	3.8410	5.0240	6.6350	7.8790	9.5500	10.8280
10	0.2156	0.2558	0.3247	0.3940	0.4865	0.6737	0.9342	1.2549	1.5987	1.8307	2.0483	2.3209	2.5188	2.7722	2.9588
11	0.2366	0.2775	0.3469	0.4159	0.5071	0.6895	0.9401	1.2455	1.5705	1.7886	1.9927	2.2477	2.4325	2.6685	2.8422
12	0.2562	0.2976	0.3670	0.4355	0.5253	0.7032	0.9450	1.2371	1.5458	1.7522	1.9448	2.1848	2.3583	2.5798	2.7424
13	0.2742	0.3159	0.3853	0.4532	0.5417	0.7153	0.9492	1.2295	1.5240	1.7202	1.9028	2.1298	2.2938	2.5027	2.6560
14	0.2911	0.3329	0.4021	0.4694	0.5564	0.7261	0.9528	1.2226	1.5046	1.6918	1.8656	2.0815	2.2371	2.4351	2.5802
15	0.3067	0.3486	0.4175	0.4841	0.5698	0.7358	0.9559	1.2163	1.4871	1.6664	1.8325	2.0385	2.1867	2.3752	2.5131
16	0.3214	0.3633	0.4318	0.4976	0.5820	0.7445	0.9586	1.2106	1.4714	1.6435	1.8028	2.0000	2.1417	2.3216	2.4533
17	0.3351	0.3769	0.4449	0.5101	0.5932	0.7525	0.9611	1.2052	1.4570	1.6228	1.7759	1.9652	2.1011	2.2734	2.3994
18	0.3481	0.3897	0.4573	0.5217	0.6036	0.7597	0.9632	1.2003	1.4438	1.6038	1.7514	1.9336	2.0642	2.2298	2.3507
19	0.3602	0.4017	0.4688	0.5325	0.6132	0.7664	0.9652	1.1957	1.4318	1.5865	1.7291	1.9048	2.0306	2.1900	2.3063
20	0.3717	0.4130	0.4796	0.5426	0.6222	0.7726	0.9669	1.1914	1.4206	1.5705	1.7085	1.8783	1.9999	2.1536	2.2658
21	0.3826	0.4237	0.4897	0.5520	0.6305	0.7783	0.9684	1.1874	1.4102	1.5558	1.6895	1.8539	1.9715	2.1201	2.2284
22	0.3929	0.4337	0.4992	0.5608	0.6382	0.7836	0.9699	1.1836	1.4006	1.5420	1.6719	1.8313	1.9453	2.0892	2.1940
23	0.4026	0.4433	0.5082	0.5692	0.6456	0.7886	0.9712	1.1800	1.3916	1.5292	1.6555	1.8103	1.9209	2.0605	2.1621
24	0.4119	0.4523	0.5167	0.5770	0.6525	0.7932	0.9724	1.1767	1.3832	1.5173	1.6402	1.7908	1.8983	2.0338	2.1325
25	0.4208	0.4610	0.5248	0.5844	0.6589	0.7976	0.9735	1.1736	1.3753	1.5061	1.6258	1.7726	1.8771	2.0089	2.1048
26	0.4292	0.4692	0.5325	0.5915	0.6651	0.8017	0.9745	1.1706	1.3678	1.4956	1.6124	1.7555	1.8573	1.9857	2.0789
27	0.4373	0.4770	0.5397	0.5982	0.6709	0.8055	0.9754	1.1677	1.3608	1.4857	1.5998	1.7394	1.8387	1.9638	2.0547
28	0.4450	0.4845	0.5467	0.6046	0.6764	0.8092	0.9763	1.1650	1.3541	1.4763	1.5879	1.7242	1.8212	1.9433	2.0319
29	0.4524	0.4916	0.5533	0.6106	0.6817	0.8127	0.9771	1.1624	1.3478	1.4675	1.5766	1.7099	1.8047	1.9239	2.0104
30	0.4596	0.4984	0.5597	0.6164	0.6866	0.8159	0.9779	1.1600	1.3419	1.4591	1.5660	1.6964	1.7891	1.9056	1.9901
31	0.4664	0.5050	0.5658	0.6220	0.6914	0.8190	0.9786	1.1576	1.3362	1.4511	1.5559	1.6836	1.7743	1.8883	1.9709
32	0.4729	0.5113	0.5716	0.6273	0.6960	0.8220	0.9793	1.1554	1.3308	1.4436	1.5463	1.6714	1.7603	1.8718	1.9527
33	0.4792	0.5174	0.5772	0.6323	0.7003	0.8248	0.9799	1.1533	1.3256	1.4364	1.5371	1.6599	1.7469	1.8562	1.9355
34	0.4853	0.5232	0.5825	0.6372	0.7045	0.8275	0.9805	1.1512	1.3207	1.4295	1.5284	1.6489	1.7342	1.8414	1.9190
35	0.4912	0.5288	0.5877	0.6419	0.7085	0.8301	0.9810	1.1492	1.3160	1.4229	1.5201	1.6383	1.7221	1.8273	1.9034
36	0.4969	0.5343	0.5927	0.6464	0.7123	0.8326	0.9816	1.1473	1.3114	1.4166	1.5121	1.6283	1.7106	1.8138	1.8885
37	0.5023	0.5395	0.5975	0.6507	0.7160	0.8349	0.9821	1.1455	1.3071	1.4106	1.5045	1.6187	1.6995	1.8009	1.8742
38	0.5076	0.5445	0.6021	0.6548	0.7196	0.8372	0.9825	1.1437	1.3030	1.4048	1.4973	1.6095	1.6890	1.7886	1.8606
39	0.5127	0.5494	0.6065	0.6588	0.7230	0.8394	0.9829	1.1420	1.2990	1.3993	1.4903	1.6007	1.6789	1.7768	1.8476
40	0.5177	0.5541	0.6108	0.6627	0.7263	0.8415	0.9834	1.1404	1.2951	1.3940	1.4836	1.5923	1.6692	1.7655	1.8351

Tabla B.2 Tabla de Chi cuadrado reducido-Parte II

k	P														
	0.9950	0.9900	0.9750	0.9500	0.9000	0.7500	0.5000	0.2500	0.1000	0.0500	0.0250	0.0100	0.0050	0.0020	0.0010
41	0.5225	0.5587	0.6150	0.6665	0.7294	0.8435	0.9838	1.1388	1.2914	1.3888	1.4771	1.5841	1.6598	1.7546	1.8230
42	0.5271	0.5631	0.6190	0.6701	0.7325	0.8455	0.9842	1.1373	1.2879	1.3839	1.4709	1.5763	1.6509	1.7441	1.8115
43	0.5316	0.5674	0.6229	0.6736	0.7355	0.8473	0.9845	1.1358	1.2844	1.3792	1.4649	1.5688	1.6422	1.7341	1.8004
44	0.5360	0.5715	0.6267	0.6770	0.7383	0.8492	0.9849	1.1344	1.2811	1.3746	1.4591	1.5616	1.6339	1.7244	1.7898
45	0.5402	0.5756	0.6304	0.6803	0.7411	0.8509	0.9852	1.1330	1.2779	1.3701	1.4536	1.5546	1.6259	1.7151	1.7795
46	0.5444	0.5795	0.6339	0.6835	0.7438	0.8526	0.9855	1.1317	1.2748	1.3659	1.4482	1.5478	1.6182	1.7061	1.7696
47	0.5484	0.5833	0.6374	0.6866	0.7464	0.8542	0.9859	1.1304	1.2718	1.3617	1.4430	1.5413	1.6107	1.6974	1.7600
48	0.5523	0.5870	0.6407	0.6895	0.7489	0.8558	0.9861	1.1291	1.2689	1.3577	1.4380	1.5351	1.6035	1.6891	1.7508
49	0.5561	0.5906	0.6440	0.6924	0.7514	0.8573	0.9864	1.1279	1.2661	1.3539	1.4331	1.5290	1.5966	1.6810	1.7419
50	0.5598	0.5941	0.6471	0.6953	0.7538	0.8588	0.9867	1.1267	1.2633	1.3501	1.4284	1.5231	1.5898	1.6731	1.7332
51	0.5634	0.5975	0.6502	0.6980	0.7561	0.8603	0.9870	1.1255	1.2607	1.3465	1.4238	1.5174	1.5833	1.6655	1.7249
52	0.5669	0.6009	0.6532	0.7007	0.7583	0.8617	0.9872	1.1244	1.2581	1.3429	1.4194	1.5118	1.5769	1.6582	1.7168
53	0.5704	0.6041	0.6562	0.7033	0.7605	0.8630	0.9875	1.1233	1.2556	1.3395	1.4151	1.5065	1.5708	1.6511	1.7089
54	0.5737	0.6073	0.6590	0.7059	0.7626	0.8644	0.9877	1.1222	1.2532	1.3362	1.4110	1.5013	1.5649	1.6442	1.7013
55	0.5770	0.6104	0.6618	0.7083	0.7647	0.8656	0.9879	1.1212	1.2508	1.3329	1.4069	1.4962	1.5591	1.6375	1.6940
56	0.5802	0.6134	0.6645	0.7107	0.7667	0.8669	0.9881	1.1202	1.2486	1.3298	1.4030	1.4913	1.5535	1.6310	1.6868
57	0.5833	0.6163	0.6671	0.7131	0.7687	0.8681	0.9883	1.1192	1.2463	1.3267	1.3992	1.4865	1.5480	1.6246	1.6798
58	0.5863	0.6192	0.6697	0.7154	0.7706	0.8693	0.9885	1.1182	1.2441	1.3238	1.3954	1.4819	1.5427	1.6185	1.6731
59	0.5893	0.6220	0.6722	0.7176	0.7725	0.8704	0.9887	1.1173	1.2420	1.3209	1.3918	1.4774	1.5375	1.6125	1.6665
60	0.5922	0.6248	0.6747	0.7198	0.7743	0.8716	0.9889	1.1164	1.2400	1.3180	1.3883	1.4730	1.5325	1.6067	1.6601
61	0.5951	0.6274	0.6771	0.7219	0.7761	0.8727	0.9891	1.1155	1.2379	1.3153	1.3849	1.4687	1.5276	1.6011	1.6539
62	0.5979	0.6300	0.6795	0.7240	0.7778	0.8737	0.9893	1.1146	1.2360	1.3126	1.3815	1.4645	1.5229	1.5956	1.6478
63	0.6006	0.6326	0.6817	0.7260	0.7795	0.8748	0.9894	1.1137	1.2340	1.3100	1.3783	1.4605	1.5182	1.5902	1.6419
64	0.6033	0.6351	0.6840	0.7280	0.7812	0.8758	0.9896	1.1129	1.2322	1.3074	1.3751	1.4565	1.5137	1.5850	1.6362
65	0.6059	0.6376	0.6862	0.7300	0.7828	0.8768	0.9898	1.1121	1.2304	1.3049	1.3720	1.4526	1.5093	1.5799	1.6306
66	0.6085	0.6400	0.6883	0.7319	0.7844	0.8777	0.9899	1.1113	1.2286	1.3025	1.3689	1.4489	1.5050	1.5749	1.6251
67	0.6110	0.6424	0.6905	0.7338	0.7860	0.8787	0.9901	1.1105	1.2268	1.3001	1.3660	1.4452	1.5008	1.5700	1.6198
68	0.6134	0.6447	0.6925	0.7356	0.7875	0.8796	0.9902	1.1097	1.2251	1.2978	1.3631	1.4416	1.4967	1.5653	1.6146
69	0.6159	0.6469	0.6946	0.7374	0.7890	0.8805	0.9903	1.1090	1.2234	1.2955	1.3602	1.4381	1.4927	1.5607	1.6095
70	0.6182	0.6492	0.6965	0.7391	0.7904	0.8814	0.9905	1.1082	1.2218	1.2933	1.3575	1.4346	1.4888	1.5561	1.6045
71	0.6205	0.6514	0.6985	0.7408	0.7918	0.8823	0.9906	1.1075	1.2202	1.2911	1.3548	1.4313	1.4850	1.5517	1.5997
72	0.6228	0.6535	0.7004	0.7425	0.7932	0.8831	0.9908	1.1068	1.2187	1.2890	1.3521	1.4280	1.4812	1.5474	1.5949
73	0.6251	0.6556	0.7023	0.7442	0.7946	0.8839	0.9909	1.1061	1.2171	1.2869	1.3495	1.4248	1.4776	1.5432	1.5903
74	0.6273	0.6576	0.7041	0.7458	0.7959	0.8848	0.9910	1.1054	1.2156	1.2849	1.3470	1.4216	1.4740	1.5390	1.5858
75	0.6294	0.6597	0.7059	0.7474	0.7973	0.8856	0.9911	1.1048	1.2141	1.2829	1.3445	1.4186	1.4705	1.5350	1.5813
76	0.6315	0.6617	0.7077	0.7489	0.7986	0.8863	0.9912	1.1041	1.2127	1.2809	1.3421	1.4156	1.4670	1.5310	1.5770
77	0.6336	0.6636	0.7094	0.7505	0.7998	0.8871	0.9914	1.1035	1.2113	1.2790	1.3397	1.4126	1.4637	1.5272	1.5727
78	0.6357	0.6655	0.7111	0.7520	0.8011	0.8878	0.9915	1.1028	1.2099	1.2771	1.3374	1.4097	1.4604	1.5234	1.5686
79	0.6377	0.6674	0.7128	0.7534	0.8023	0.8886	0.9916	1.1022	1.2086	1.2753	1.3351	1.4069	1.4572	1.5196	1.5645
80	0.6397	0.6693	0.7144	0.7549	0.8035	0.8893	0.9917	1.1016	1.2072	1.2735	1.3329	1.4041	1.4540	1.5160	1.5605
81	0.6416	0.6711	0.7160	0.7563	0.8046	0.8900	0.9918	1.1010	1.2059	1.2717	1.3307	1.4014	1.4509	1.5124	1.5566
82	0.6435	0.6729	0.7176	0.7577	0.8058	0.8907	0.9919	1.1005	1.2046	1.2700	1.3285	1.3987	1.4479	1.5089	1.5527
83	0.6454	0.6746	0.7192	0.7591	0.8069	0.8914	0.9920	1.0999	1.2034	1.2683	1.3264	1.3961	1.4449	1.5055	1.5490
84	0.6472	0.6763	0.7207	0.7604	0.8080	0.8921	0.9921	1.0993	1.2021	1.2666	1.3243	1.3935	1.4420	1.5021	1.5453
85	0.6491	0.6780	0.7222	0.7618	0.8091	0.8927	0.9922	1.0988	1.2009	1.2650	1.3223	1.3910	1.4391	1.4988	1.5417
86	0.6508	0.6797	0.7237	0.7631	0.8102	0.8934	0.9923	1.0982	1.1997	1.2633	1.3203	1.3885	1.4363	1.4956	1.5381
87	0.6526	0.6814	0.7252	0.7643	0.8113	0.8940	0.9923	1.0977	1.1986	1.2618	1.3183	1.3861	1.4335	1.4924	1.5346
88	0.6543	0.6830	0.7266	0.7656	0.8123	0.8946	0.9924	1.0971	1.1974	1.2602	1.3164	1.3837	1.4308	1.4893	1.5312
89	0.6561	0.6846	0.7280	0.7668	0.8133	0.8952	0.9925	1.0966	1.1963	1.2587	1.3145	1.3814	1.4282	1.4862	1.5278
90	0.6577	0.6862	0.7294	0.7681	0.8143	0.8958	0.9926	1.0961	1.1952	1.2572	1.3126	1.3791	1.4255	1.4832	1.5245
91	0.6594	0.6877	0.7308	0.7693	0.8153	0.8964	0.9927	1.0956	1.1941	1.2557	1.3108	1.3768	1.4230	1.4802	1.5213
92	0.6610	0.6892	0.7321	0.7705	0.8163	0.8970	0.9928	1.0951	1.1930	1.2542	1.3090	1.3746	1.4204	1.4773	1.5181
93	0.6626	0.6907	0.7335	0.7716	0.8173	0.8976	0.9928	1.0946	1.1919	1.2528	1.3072	1.3724	1.4180	1.4745	1.5150
94	0.6642	0.6922	0.7348	0.7728	0.8182	0.8981	0.9929	1.0941	1.1909	1.2514	1.3055	1.3702	1.4155	1.4717	1.5119
95	0.6658	0.6937	0.7361	0.7739	0.8191	0.8987	0.9930	1.0937	1.1899	1.2500	1.3038	1.3681	1.4131	1.4689	1.5089
96	0.6673	0.6951	0.7373	0.7750	0.8201	0.8992	0.9931	1.0932	1.1889	1.2487	1.3021	1.3661	1.4108	1.4662	1.5059
97	0.6688	0.6965	0.7386	0.7761	0.8210	0.8998	0.9931	1.0928	1.1879	1.2473	1.3004	1.3640	1.4084	1.4635	1.5030
98	0.6703	0.6979	0.7398	0.7772	0.8218	0.9003	0.9932	1.0923	1.1869	1.2460	1.2988	1.3620	1.4062	1.4609	1.5001
99	0.6718	0.6993	0.7410	0.7782	0.8227	0.9008	0.9933	1.0918	1.1859	1.2447	1.2972	1.3600	1.4039	1.4583	1.4973
100	0.6733	0.7007	0.7422	0.7793	0.8236	0.9013	0.9933	1.0914	1.1850	1.2434	1.2956	1.3581	1.4017	1.4558	1.4945

Anexo C

Resultados de radón en el Perú

Mediciones de radón en Arequipa

La concentración promedio de radón en Arequipa fue de $21 \pm 1 \text{ Bq m}^{-3}$, el 75% de los resultados se encuentran por debajo de 21 Bq m^{-3} y el máximo valor de concentración de radón registrado por este monitor fue de 57 Bq m^{-3} .

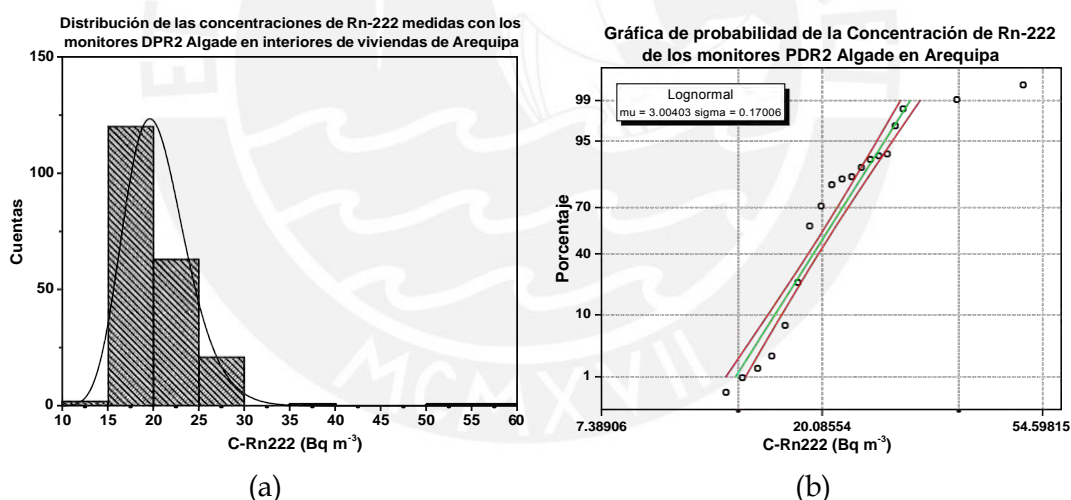


Fig. C.1 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Arequipa
a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución LogNormal

Mediciones de radón en Puno

La concentración promedio de radón en Puno fue de $20 \pm 1 \text{ Bq m}^{-3}$, el 75% de los resultados se encuentran por debajo de 19 Bq m^{-3} y el máximo valor de concentración de radón registrado por este monitor fue de 58 Bq m^{-3} .

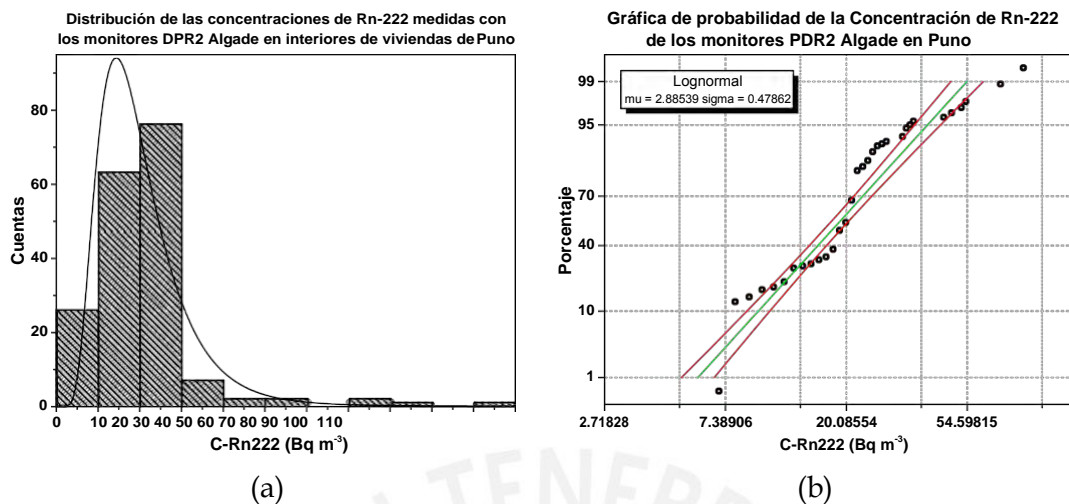


Fig. C.2 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Puno a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución LogNormal

Mediciones radón en Cusco

La concentración promedio de radón en Cusco fue de $20 \pm 1 \text{ Bq m}^{-3}$, el 75% de los resultados se encuentran por debajo de 22 Bq m^{-3} y el máximo valor de concentración de radón registrado por este monitor fue de 106 Bq m^{-3} .

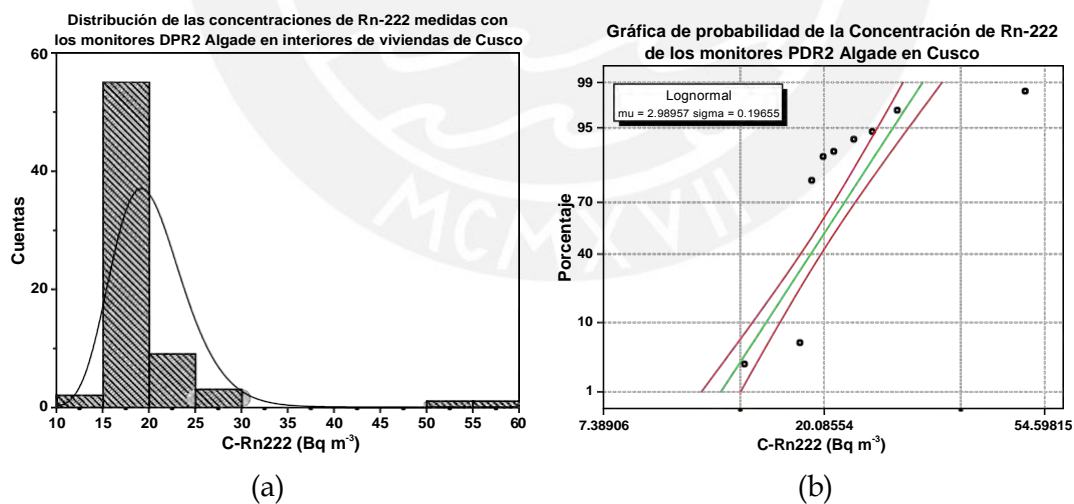


Fig. C.3 Distribución de las concentraciones de radón por los monitores DPR2 en Cusco a) Distribución de las C-Rn222; b) Gráfica de probabilidad de C-Rn222 para una distribución LogNormal