

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE GRADUADOS



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

Monitoreo de Radón 222 en la zona sur de
Lima

Tesis para Optar el Grado de
MAGÍSTER EN FÍSICA

AUTOR
JHONNY JONNATAN ROJAS HANCCO

ASESOR
María Elena López Herrera

JURADO
Eduardo Massoni Kamimoto
Patrizia Pereyra Anaya

Lima-Perú
Febrero, 2016

Resumen

Existen diversos estudios de las concentraciones de Radón 222 [36], los cuales comenzaron en minas, el objetivo de este tipo de estudios era determinar la dosis a la que estaban expuestos los trabajadores por diversas fuentes naturales entre ellas el Radón, las concentraciones de Radón 222 encontradas fueron muy elevadas llegando a la conclusión que las hijas del Radón 222 son las más nocivas adicionándose a los efectos que causa el fumar, dado que el Radón 222 es un gas exhalado por el suelo y por tanto se encuentra en forma natural en la atmósfera cobra enorme importancia medir las concentraciones de Radón 222 en las viviendas y lugares de trabajo en el cual las personas pasamos la mayor parte de nuestras vidas.

En este trabajo se muestra resultados de mediciones de Radón 222 en interiores (viviendas) de la zona sur de Lima (principalmente en el distrito de Villa el Salvador) y se analiza los resultados encontrados, así mismo la data encontrada será incluida en la elaboración del mapa de Radón 222 de Lima-Metropolitana. En la actualidad se acepta que la inhalación de los productos de decaimiento del Radón 222 incrementa la incidencia de cáncer al pulmón, estas observaciones han sido estudiadas por diversas organizaciones como la OMS (Organización Mundial de la Salud) [32], ICRP (según sus siglas en inglés, International Commission Radiological Protection) [19]. Si bien es cierto, el interés en esta fuente de radiación natural inicio en países desarrollados, actualmente un importante número de estudios se han desarrollado para evaluar los niveles de Radón 222 y el Radón 220 en casas y áreas con un potencial alto de riesgo a la exposición a este gas radiactivo. En nuestro país recientemente se ha iniciado este tipo de estudios pero aún es insuficiente, este trabajo pretende contribuir con la determinación y estudio de los niveles de Radón 222 en viviendas en la zona sur de la ciudad de Lima, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas, el tipo de suelo, los materiales de construcción utilizados son parámetros que influyen en la medición, la concentración del Radón 222 y sus productos de decaimiento en la atmósfera del interior de las viviendas. Se encuentra que la velocidad con la que entra y sale el aire de una casa es un parámetro determinante, siendo la ventilación una de las formas más efectivas de reducir las concentraciones del Radón 222 en una vivienda habitada.

PLAN DE TESIS

Planteamiento del Problema

El fenómeno del decaimiento radiactivo es un proceso que ha estado y está presente en los suelos de la tierra debido a las cadenas radiactivas naturales existentes, el Radón 222 es uno de los hijos del Uranio 238 el cual se encuentra en todos los suelos de la tierra, el Radón tiene varios isótopos como el Radón 222, Radón 220 (conocido como Thorón) y el Radón 219 además de las artificiales, de los isótopos naturales de Radón el más abundante es el Radón 222, el que le sigue en abundancia es el Radón 220 perteneciente a la cadena de Torio, el Radón 219 se encuentra en menor medida a las anteriores debido a la abundancia isotópica del Uranio 238 respecto al Uranio 235 y debido a su corto periodo de semidesintegración de 4 s en comparación al Radón 220 con periodo semidesintegración de 56 s y Radón 222 con periodo semidesintegración de 3,82 días, el Radón 222 es el más abundante y de periodo más largo.

La principal característica que hace importante la medición de este radioisótopo es que es un gas incoloro, inodoro e insípido, un gas radiactivo que no podemos percibir con nuestros sentidos, por tanto al ser hijo del Radio 226 presente en los minerales del subsuelo sufre un fenómeno de transporte de altas concentraciones a bajas concentraciones difundiéndose a través del subsuelo hasta alcanzar la superficie exhalando hacia la atmósfera concentrándose en lugares cerrados (principalmente en lugares con poca ventilación), viviendas y lugares de trabajo haciéndose parte del aire que respiramos.

Justificación del problema

En los últimos 20 años se ha realizado diversos estudios de las concentraciones de Radón, de las cuales el principal isótopo Radón 222 es el mayor contribuyente que puede causar a través de sus hijas, efectos estocásticos y como resultado diversos países tienen una reglamentación definida para concentraciones de Radón 222 en viviendas. En nuestro país hay una normativa dada por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), reglamento de protección radiológica D.S 009-97 EM, en el anexo IV se mencionan los límites de Radón en viviendas y en lugares de trabajo [1], sin embargo no existen medidas que corroboren si efectivamente las viviendas y lugares de trabajo están dentro de los límites que el reglamento menciona. Dado que no se ha realizado un monitoreo como los mencionados estudios, tanto en viviendas como en lugares de trabajo, es necesario realizar la medición de las concentraciones de Radón 222 en viviendas y centros de trabajo.

Objetivos

- Realizar la medición de la concentración Radón 222 en las viviendas de la zona sur de Lima principalmente en el distrito de Villa el Salvador.
- Recopilar y desarrollar un marco teórico que refleje el mecanismo que se utilizó para realizar el monitoreo de Radón usando la técnica de huellas nucleares.
- Identificar si hay lugares de medición donde hay un exceso de los límites de concentración recomendados [32], [5].
- Con los datos obtenidos contribuir a la elaboración del mapa de Radón 222 de Lima metropolitana y Callao.

Metodología

El desarrollo de trabajo tiene tres partes: primero se desarrolla la justificación teórica. En esta primera etapa se explica del mecanismo de decaimiento alfa y como las partículas alfa interactúan con el medio. En la segunda etapa se desarrolla la técnica de huellas nucleares usando el Nitrato de Celulosa LR-115 tipo 2. En la tercera etapa consta de medidas experimentales que se realizan en lugares elegidos de forma aleatoria en la zona de estudio, que hacen que sea una muestra representativa de el lugar de monitoreo.

*Dedico esta tesis a mis padres y hermanos
por su apoyo incondicional.*



Agradecimientos

Gracias totales a mis padres Román y Vilma, a mi hermano y hermana, a mis amigos por sus ideas y sugerencias, a los profesores, a mi asesora por sus consejos y un agradecimiento muy especial a todas las personas que de forma desinteresada y voluntaria brindaron sus hogares para que sean lugares de estudio, sin ellos este trabajo no hubiera sido posible realizar.

Este trabajo fue posible gracias a la financiación otorgada por Concytec a través de una beca de estudios. Gracias a todos!

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Decaimiento radiactivo	2
1.2. ¿Qué es el Radón?	6
1.3. Gas Radón en interiores	7
1.4. Límites permisibles de la concentración de Radón 222 en interiores	9
2. Fundamento teórico	12
2.1. Desintegración alfa	12
2.2. Interacción de las partículas alfa con la materia	15
2.2.1. Alcance o rango	15
2.2.2. Energía de ionización	16
2.2.3. Ionización total I_t	16
2.2.4. Ionización específica I_s	17
2.3. Difusión del gas Radón	19
2.3.1. Modelo de difusión del gas Radón 222	21
2.4. Formación de las trazas o huellas nucleares	27
2.5. Geometría de las trazas o huellas debido al baño químico	28
2.6. Cálculo de la concentración de Radón	30
3. Materiales y metodología experimental	31
3.1. Polímero LR-115 tipo 2	31
3.1.1. Nivel de saturación del LR-115 tipo 2	34
3.1.2. Sensibilidad del LR-115 tipo 2	34
3.2. Equipos y materiales de laboratorio	35
3.3. Metodología en la toma de datos del gas Radón 222	36
3.4. Metodología de detección de partículas alfa provenientes del Radón 222	38
3.4.1. Exposición al Radón 222 ambiental	38
3.4.2. Baño químico	40
3.4.3. Lectura de trazas por microscopio óptico	42
4. Resultados y discusión	44
4.1. Resultados de las mediciones en el año 2014	44
4.2. Resultados de las mediciones en el 2015	46
4.2.1. Primer periodo 2015	46

4.2.2. Segundo periodo 2015	47
4.2.3. Tercer periodo 2015	49
4.2.4. Resultados generales de la medición de Radón 222 en los tres periodos 2015	52
4.3. Resultados de la medición de Radón 222 por un periodo de un año	56
5. Conclusiones y recomendaciones	58
Bibliografía	60
Apéndice	63
A. Calibración del LR-115 tipo 2	64
A.1. Arreglo experimental	64
A.2. Resultados	65
B. MEASURING RADON 222 CONCENTRATION IN THE BASE- MENTS OF THE NEW ENGINEERING BUILDING OF THE PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF PERU (PUCP)	66
C. Ficha de datos de cada vivienda a monitorear	76

Índice de figuras

1.1. Serie radiactiva del U 238 [31].	7
1.2. Medios a través de los cuales el Rn 222 puede entrar a una vivienda [3].	8
2.1. Diagrama de los niveles de energía de la desintegración alpha del Ra 226 a Rn 222 [24].	12
2.2. Potencial para la emisión de las partículas alfa [12].	14
2.3. Curva de alcance de las partículas alfa del Po 212 [26]	17
2.4. Ionización específica vs alcance R(cm) donde se varío la distancia de la fuente de las partículas alfa del Po 210 y Po 214 [26]	18
2.5. Esquema de liberación de Radón 222 en subsuelo [10].	21
2.6. Esquema del suelo donde una casa está construida vista de la sección transversal [22].	23
2.7. Diferencias de presión a través de la abertura vs permeabilidad del suelo [22].	23
2.8. Modelo de la formación de la huella con V_T Y V_g constantes con incidencia vertical sobre el detector.	28
3.1. Estructura del nitrato de celulosa [35].	31
3.2. Esquema del detector LR-115 tipo 2	32
3.3. Esquema de formación de huellas en el LR-115 tipo 2 para rangos de energía [28].	33
3.4. Equipos, (a) baño termostático de seis compartimentos, (b) microscopio marca Leica.	35
3.5. Equipos, (a) aire acondicionado del laboratorio de huellas nucleares, (b) vasos de precipitado.	36
3.6. Ubicación del distrito de Villa el Salvador en la provincia de Lima [2].	36
3.7. Grilla del distrito de Villa el Salvador por cada 1km^2 , puntos distribuidos en forma aleatoria.	38
3.8. Diagrama del método de detección de partículas alfa (radiación ionizante) por trazas en sólidos.	39
3.9. Características de algunas viviendas de Villa el Salvador.	39
3.10. Detector LR-115 tipo 2 adherido sobre la pared en el interior de una vivienda.	40

3.11. (a) Volumen de agua 200 mL, (b) volumen de NaOH 80 mL, (c) Arreglo de vasos como van en los baños, (d) detectores pre- parados listos para ser grabados	41
3.12. NaOH coloreado debido a la degradación del nitrato de celulosa.	41
3.13. (a) Detectores preparados en un porta muestras, (b) lectura del detector.	42
3.14. Campos de conteo del detector LR-115.	42
3.15. Huellas debido a la desintegración de Radón 222, dejadas por las partículas alfa.	43
4.1. Resultados de la medición de las concentraciones de Rn 222, hecha en tres distritos del sur de Lima.	45
4.2. Resultados del primer periodo 2015.	47
4.3. Resultados del segundo periodo 2015.	49
4.4. Resultados del tercer periodo 2015	51
4.5. Promedios en las posiciones A y B por cada vivienda.	53
4.6. Promedio de las concentraciones de Radón 222 en cada vivienda monitoreada durante los tres períodos.	55
4.7. Puntos de medición en el distrito de Villa el Salvador.	56
4.8. Tres lugares elegidos, donde se realizó el medición de Rn 222 por un periodo de un año.	57
A.1. Esquema del arreglo experimental.	65
A.2. Datos obtenidos de las densidades de huellas en la cámara de Rn 222.	65

Índice de tablas

1.1. Riesgo por Rn para un fumador [5].	10
1.2. Riesgo por Rn para un no fumador [5].	11
2.1. Tabla de las energías, periodos y constantes de desintegración para algunos emisores alfa [26].	15
2.2. Energías de ionización para algunos gases [4].	16
2.3. Valores para de las longitudes de difusión y constante de difusión para Rn 222 y Rn 220 [10].	19
2.4. Concentración típica de Rn 222 [10].	20
2.5. Valores experimentales de los coeficientes y longitudes de difusión del Rn 222 en algunos materiales [27].	26
3.1. Incertidumbres de medida en $\pm Bq/m^3$ y $\pm \%$ con un nivel de confianza de 2σ , donde t es el tiempo de exposición en días para diferentes concentraciones, las incertidumbres de los instrumentos de medida del Radón no deben exceder $\pm 20 \%$ [28].	35
4.1. Concentración de Rn 222 en los distritos de San Juan de Miraflores (SJM), Villa el Salvador (VES), Villa María del Triunfo (VMT).	44
4.2. Concentraciones de Rn 222 máximas y mínimas.	45
4.3. Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) primer periodo.	46
4.4. Máximo y mínimo del primer periodo de monitoreo en el (VES).	47
4.5. Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) segundo periodo.	48
4.6. Máximo y mínimo del segundo periodo de monitoreo en el (VES).	48
4.7. Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) tercer periodo.	50
4.8. Máximo y mínimo del tercer periodo de monitoreo en el (VES).	50
4.9. Resultado de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) de los tres periodos en las posiciones A y B.	52
4.10. Resultado de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) de los tres periodos en cada posición.	54
4.11. Resultados de la medición por un periodo de un año consecutivo.	57

Capítulo 1

Introducción

Para explicar el porqué del cambio de los núcleos inestables como Radio, Radón o núcleos en cualquier cadena radiactiva, que emiten ciertas partículas así como la existencia de los núcleos estables, se han propuesto diversos modelos nucleares que toman en cuenta ciertas propiedades que hace posible su existencia. En una primera aproximación se propuso el modelo nuclear de la gota líquida el cual toma al núcleo como una gota líquida con propiedades de tensión superficial, la saturación de la fuerza que une a los nucleones, las fuerzas de repulsión de Coulomb debido a los protones y términos que expliquen el porqué de la existencia de núcleos con A par, que expliquen su estabilidad, llegando a una fórmula semiempírica de masa de Bethe-Weizsacker usado para predecir la estabilidad de las masas para un A y Z arbitrario [6]. Otro modelo que fue de los primeros en tomar en cuenta los efectos cuánticos en la estructura nuclear es el modelo nuclear del Gas de Fermi, el cual asume que el núcleo puede ser considerado como un gas libre de neutrones y protones, fermiones confinados en un pozo potencial cumpliendo el principio de exclusión de Pauli, definiendo el nivel de Fermi como el nivel de energía E_F más alto completamente lleno, este modelo es usado para estudiar estados excitados de núcleos complejos, otro modelo es el modelo de capas este modelo explica bastante bien la estabilidad de los núcleos con números mágicos. Así hay diversas propuestas pero ninguno explica completamente las características de los núcleos. Una de las principales características de los núcleos es que estos sufren una interacción fuerte que hace posible se mantengan unidos los neutrones y protones además pueden sufrir una interacción débil que hace posible el decaimiento de núcleos inestables emitiendo partículas beta, fotones gamma y debido a la saturación de la fuerza fuerte y a la de Coulomb se emiten partículas alfa [7]. El Radón es un núcleo inestable y es la principal fuente de radiactividad natural que estamos expuestos, existen diversos estudios que explican la relación entre la exposición al Radón y los casos de cáncer al pulmón como por ejemplo [36] y la necesidad de saber las concentraciones a la que estamos expuesto es urgente, diversos países regulan estas concentraciones basados en mediciones hechas teniendo en cuenta las recomendaciones hechas por organizaciones internacio-

nales como la EPA, OMS, ICRP, etc. En este trabajo se presenta resultados de las mediciones realizadas principalmente en el distrito de Villa el Salvador cuyo objetivo es contribuir con la elaboración del mapa de Radón 222 de Lima Metropolitana y el Callao.

1.1. Decaimiento radiactivo

Los núcleos inestables transmutan a otros núcleos, emitiendo partículas α, β o γ , cualquier transición espontánea de un estado a otro se denomina decaimiento radiactivo, este cambio se puede describir mediante un proceso estadístico, es decir si tenemos un número grande de núcleos inestables no sabemos con certeza cuando sufrirán la transición cada uno de ellos, pero si hay una constante de probabilidad asociada a cada núcleo, es la llamada constante de desintegración λ que es la probabilidad de decaimiento por unidad de tiempo. Si tenemos N , número de núcleos radiactivos de algún tipo, el cambio de un número de núcleos durante un tiempo infinitesimal dt es:

$$dN = N(t + dt) - N(t) = -N(t)\lambda dt \quad (1.1)$$

donde el signo negativo representa el hecho que el número de núcleos decrece, si tenemos un número de núcleos N_0 en un tiempo inicial $t = 0$ se obtiene el número de nucleones para cualquier tiempo $N(t)$

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= -\lambda dt \\ \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} &= -\lambda \int_0^t dt \end{aligned}$$

$$N(t) = N_0 \exp^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

hay tiempos característicos asociados al decaimiento de núcleos inestables como por ejemplo el periodo de semi-desintegración $t_{1/2}$ el tiempo durante el cual la mitad de los núcleos han decaído.

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 \exp^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.3)$$

Dado que las sustancias radiactivas sufren transformaciones sucesivas hasta llegar a la estabilidad, el parámetro que caracteriza cada uno de los miembros de una cadena radiactiva es λ entonces podemos escribir las ecuaciones que describen este proceso de decaimiento.

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (1.4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.5)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (1.6)$$

⋮

$$\frac{dN_n}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1} - \lambda_n N_n \quad (1.7)$$

Luego la solución de la ecuación Ec. 1.4 tiene la forma de la Ec. 1.2 y si reemplazamos esta solución en la Ec. 1.5 podemos escribir:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (1.8)$$

donde $N_0 = N_1^0$ son los átomos del núcleo padre en el tiempo $t = 0$ entonces se puede calcular:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} + C \exp^{-\lambda_2 t} \quad (1.9)$$

Para calcular la constante C haremos $t = 0$, donde $N_2 = N_2^0$ entonces se tiene que:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} + [N_2^0 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0] \exp^{-\lambda_2 t} \quad (1.10)$$

Luego calculamos N_3 utilizando las ecuaciones anteriores.

$$N_3 = \lambda_2 \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \left(\frac{\exp^{-\lambda_1 t}}{\lambda_3 - \lambda_1} - \frac{\exp^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right) + \frac{N_2^0 \exp^{-\lambda_2 t}}{\lambda_3 - \lambda_2} \right] + [N_3^0 - \lambda_2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{N_2^0}{\lambda_3 - \lambda_2} \right)] \exp^{-\lambda_2 t} \quad (1.11)$$

Podemos seguir solucionando cada una de las ecuaciones diferenciales correspondientes a los miembros de una cadena radiactiva, una solución para este tipo de problema fue deducida por Bateman con la condición que en $t = 0$ las cantidades iniciales de cada una de las componentes de la cadena radiactiva son cero a excepción del núcleo padre. $N_1 = N_1^0$ Y $N_2^0 = N_3^0 = N_4^0 = \dots = N_n^0 = 0$ entonces el componente n ésimo de la cadena radiactiva tiene la forma:

$$N_n = B_1 \exp^{-\lambda_1 t} + B_2 \exp^{-\lambda_2 t} + B_3 \exp^{-\lambda_3 t} + \dots + B_n \exp^{-\lambda_n t} \quad (1.12)$$

Donde cada uno de los coeficientes tiene la forma:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= \frac{\lambda_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_1^0 \\
 B_2 &= \frac{\lambda_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_1^0 \\
 B_3 &= \frac{\lambda_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_3) \dots (\lambda_n - \lambda_3)} N_1^0 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 B_n &= \frac{\lambda_1 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{n-1}}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_3 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} N_1^0 \quad (1.13)
 \end{aligned}$$

Otro concepto importante que se debe tener muy en cuenta es el equilibrio radiactivo, las ecuaciones diferenciales antes resueltas como bien ya se menciono describen el decaimiento de los miembros de una cadena radiactiva y corrientemente se utiliza el termino de equilibrio para expresar la condición en que la derivada de una función con respecto al tiempo es nula, entonces las condiciones de equilibrio son pues:

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 \lambda_1 = 0 \quad (1.14)$$

$$N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2$$

$$N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3$$

$$N_{n-1} \lambda_{n-1} = N_n \lambda_n \quad (1.15)$$

Tales condiciones no puede satisfacerse debido a que la sustancia predecesora es radiactiva, esto quiere decir que $\lambda_1 \neq 0$, ya que la Ec. 1.14 exige $\lambda_1 = 0$, pero podemos aproximar a la condición, si hacemos que la sustancia predecesora se desintegre mucho mas lentamente que cualquiera de los miembros de la cadena este tipo de equilibrio es llamado equilibrio secular.

También se define una función del tiempo llamada actividad $A(t)$ que es el número de desintegraciones por unidad de tiempo de un determinado material.

$$A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t) = \lambda N_0 \exp^{-\lambda t} \quad (1.16)$$

El número de átomos que se desintegran en un segundo es por termino medio λN , pero el número de ellos que se incluye y transforma en un segundo cualquiera fluctúa alrededor de este valor, tanto N y A se utilizan para intercambiarlos debido a que A es proporcional al N relacionados mediante $A = c\lambda N$, donde el factor de proporcionalidad c , llamada coeficiente de detección, depende de la eficiencia del detector y puede variar de una sustancia a otra, pero se supondrá que los coeficientes de detección son todos iguales a la unidad, es decir que se detectan todas las desintegraciones, condición que corrientemente no se cumple en la practica, se adopta aquí para simplificar [25]. Así la actividad sera

$$A = \lambda N \quad (1.17)$$

La unidad de la actividad en SI es Becquerel (Bq) y en sistema tradicional es el Curio (Ci) donde $Bq = \text{desintegracion}/\text{seg}$ y el $Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq$

Por tanto utilizando tanto el equilibrio secular así como la definición de actividad podemos decir de las Ec. 1.15, 1.17 que $A_1 = A_2$ la actividad el padre como del hijo son iguales en el equilibrio secular, de aquí podemos calcular el tiempo necesario para que esto ocurra, para lo cual podemos usar las Ec. 1.2, 1.10 o podemos usar las relaciones de Bateman Ec.1.12, 1.13. Entonces como primer caso asumiremos que solo existe el padre por tanto la otra especie $N_2^0 = 0$, entonces esta condición la cumple bateman luego se tiene:

$$\begin{aligned} N_2 &= B_1 \exp^{-\lambda_1 t} + B_2 \exp^{\lambda_2 t} \\ B_1 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \\ B_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_1^0 \\ N_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 [\exp^{-\lambda_1 t} - \exp^{\lambda_2 t}] \\ \lambda_1 N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} &= \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 [\exp^{-\lambda_1 t} - \exp^{\lambda_2 t}] \\ t &= \frac{\ln(1 - \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2})}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})}{\lambda_1 - \lambda_2} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Pero si ya existiera el hijo en determinada cantidad $N_2^0 \neq 0$ entonces tomamos en cuenta la Ec.1.10 y utilizando las mismas condiciones anteriores se tiene que:

$$\lambda_1 N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 \exp^{-\lambda_1 t} + [N_2^0 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0] \exp^{-\lambda_2 t} \quad (1.19)$$

Despejando adecuadamente se tiene que el tiempo necesario para llegar al equilibrio secular es:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\frac{A_2^0}{A_1^0} + \lambda_2}\right)}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (1.20)$$

Siempre debemos recordar que se alcanza el equilibrio secular solo si $\lambda_1 \ll \lambda_2$, donde A_1^0 y A_2^0 son las actividades iniciales del padre e hijo respectivamente, también podría darse un equilibrio transitorio pero solo si $\lambda_1 < \lambda_2$ y si $\lambda_1 > \lambda_2$, no se alcanza equilibrio de ningún tipo, cuando decaiga el padre el hijo aumenta hasta alcanzar un máximo para luego decrecer.

1.2. ¿Qué es el Radón?

Entre las fuentes de radiación ionizante de origen natural, el gas Radón es el más importante. El isótopo más abundante es el Radón (Rn 222) que es un gas noble formado a partir del Radio 226, que a su vez es un producto de desintegración del Uranio 238, cadena de desintegración del Uranio 238. El Uranio y el Radio están presentes de forma natural en suelos y rocas. Otros isótopos del Radón son el Thorón (Rn 220) y el Actinón (Rn 219), formados a partir de la desintegración del Torio y del Uranio 235, además de otros isótopos artificiales. El gas Radón 222, con un periodo de desintegración de 3,82 días, emana de rocas y suelos, tiende a concentrarse en espacios cerrados como minas subterráneas o casas y contribuye en gran proporción a la dosis de radiación ionizante recibida por la población en general. Cuando se inhala gas Radón 222, las partículas alfa inmensamente ionizantes con un factor de ponderación de 20, emitidas por los productos de desintegración del Radón 222 de vida corta Polonio 218 y Polonio 214 que al ser depositados en el tracto respiratorio pueden interactuar con los tejidos biológicos pulmonares provocando daños en el ADN. Generalmente se considera que la aparición del cáncer requiere al menos una mutación, y la proliferación de células intermedias que hayan sufrido cierto grado de daño en el ADN puede provocar un gran aumento en el número de células disponibles para la aparición del cáncer. Puesto que incluso una sola partícula alfa puede provocar daños genéticos significativos en una célula, la posibilidad de daños al ADN asociados al radón se da con cualquier nivel de exposición. Por consiguiente, es improbable que exista una concentración umbral por debajo de la cual el Radón 222 y sus isótopos con sus respectivas hijas no albergue el potencial de provocar cáncer de pulmón [39].

Se han realizado diversas investigaciones para poder determinar la abundancia isotópica de los elementos químicos a través de estudios de la geoquímica, sin embargo para elementos radiactivos con vida muy corta como es el caso del Radón determinar tal abundancia es complicado, por lo general se asume que un 100 % de Radón es Rn 222, pero esto no es del todo correcto ya que según la clasificación de elementos de Goldschmidt [17], en términos generales hay mas Torio que Uranio, entonces bajo esta premisa también existiría una

proporción considerable de Rn 220 ya que este pertenece a la cadena del Torio, claro depende la geología del suelo donde se este realizando el estudio. Pero como ya se dijo bajo ciertas consideraciones se puede determinar la relación entre estos dos isotopos del Radón.

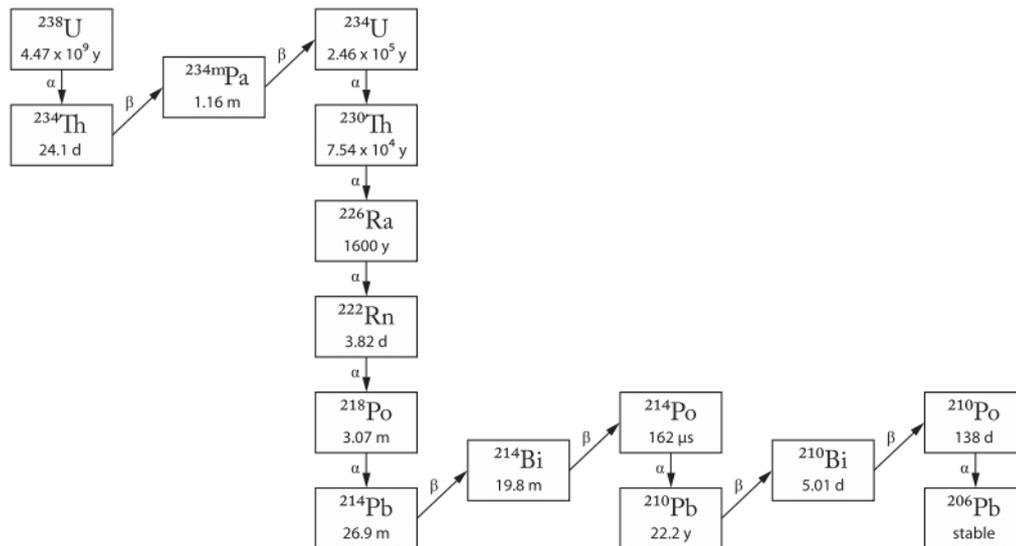


Figura 1.1: Serie radiactiva del U 238 [31].

1.3. Gas Radón en interiores

Como ya se mencionó el Radón 222 proviene del decaimiento natural de Uranio 238 que se encuentra en el suelo. La distribución de las concentraciones de Rn 222 en el interior de las viviendas es variada ya que los suelos no son uniformes y depende de muchos parámetros la exhalación del Radón, cubriendo normalmente varios órdenes de magnitud. Dentro de un distrito o una ciudad, en algunos casos, las viviendas pueden tener concentraciones tan altas de Rn 222 y la dosis recibida por los residentes puede exceder el límite anual de dosis aplicada por exposición ocupacional. El Radón 222 se difunde a través del suelo hasta llegar al medio ambiente, definiéndose como emanación a la fracción de gas que pasa del sólido a los poros del terreno, exhalación que es la cantidad del gas que escapa a la atmósfera exterior, los factores que influyen para la difusión del Radón 222 son el contenido de Radio 226 en el suelo, porosidad del suelo, permeabilidad, factores atmosféricos, etc. La distancia típica o promedio que puede recorrer el Rn 222 y Rn 220 antes de desintegrarse es 2 metros y 2,80 centímetros respectivamente en aire y el mecanismo de desplazamiento es a través de la difusión y convección [10]. El Radón 222 del suelo es el principal problema, a veces el Radón 222 entra a una vivienda a través del agua, los materiales de construcción pueden emitir Radón 222, sin embargo

los materiales de construcción raramente causan problemas. El Radón 222 puede entrar por grietas en las paredes o en las losas del piso, a través de pisos inconclusos, por las uniones de construcción, por los marcos de ventanas, sumideros y cavidades dentro de las paredes. Los niveles de concentración de Radón 222 en interiores son el resultado muchos factores que se conectan incluyendo el tipo de roca, el tipo de suelo, la humedad del suelo, las estaciones, el diseño de la construcción, etc. La Organización Mundial de la Salud (OMS), debido a evidencias epidemiológicas en la población señala al Rn 222 como responsable de un número considerable de casos de cáncer al pulmón en la población en general. La OMS provee ciertas recomendaciones para reducir los riesgos de salud debido al Rn 222 y propone un nivel de referencia de $100Bq/m^3$ para minimizar el riesgo de exposición en interiores debido Rn 222, si este nivel no puede ser alcanzado, bajo condiciones de cada país recomiendan elegir un nivel de concentración que no debe exceder los $300Bq/m^3$ [33].

El Radón no tiene olor o sabor y es incoloro, la única manera de saber si una vivienda o un lugar de trabajo tienen niveles elevados de Radón 222 es usando un dispositivo especializado en ello. Para la mitigación Radón 222 existen técnicas que son generalmente muy eficaces para reducir las concentraciones de Radón en el interior. El estándar de oro en la mitigación del radón es una técnica conocida como despresurización bajo losa. Un tubo se inserta en el relleno debajo de la losa y un ventilador eléctrico se utiliza para sacar el gas del suelo al exterior, reduciendo la presión de aire debajo de las losas. Las técnicas alternativas o complementarias, dependiendo de las condiciones, incluyen sellar las aberturas en las paredes o en las losas y de implementar sistemas de ventilación en los sótanos o ambientes cerrados para disminuir la concentración de Radón 222.

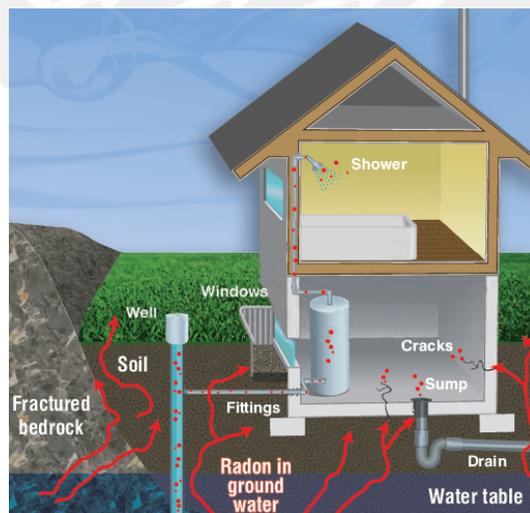


Figura 1.2: Medios a través de los cuales el Rn 222 puede entrar a una vivienda [3].

1.4. Límites permisibles de la concentración de Radón 222 en interiores

Como se señaló anteriormente, el gas Radón se desintegra quedando sus productos de decaimiento radiactivos (hijas), que pueden quedar atrapadas en los pulmones cuando se respira. A medida que se desintegran estos productos de decaimiento liberan partículas. Estas puede dañar el tejido pulmonar y dar lugar al cáncer de pulmón en el transcurso de toda una vida. Pero no todos los que están expuestos a niveles elevados de Radón 222 desarrollan cáncer de pulmón, el periodo entre la exposición y la aparición de la enfermedad puede darse en largos periodos [36]. Al igual que otros contaminantes ambientales, existe cierta incertidumbre acerca de la magnitud de los riesgos para la salud relacionados con el Radón 222. Sin embargo, sabemos más sobre riesgos de Radón que riesgos de la mayoría de otras sustancias que causan cáncer. Esto se debe a que las estimaciones de los riesgos del Radón se basan en estudios de cáncer en los seres humanos [29] (estudio en los mineros subterráneos). Combinado con el Radón 222 fumar es un riesgo para la salud, especialmente grave. Es por ello que organizaciones tanto en Europa como en USA han dado recomendaciones y límites de la concentración del Radón en interiores; en USA el límite máximo aconsejable es de 4 pCi/L (148 Bq/m^3). En Inglaterra el límite es de 200 Bq/m^3 ($5,4 \text{ pCi/L}$). La comunidad Europea recomienda que no se supere los 400 Bq/m^3 ($10,8 \text{ pCi/L}$) en las viviendas actuales y los 200 Bq/m^3 ($5,4 \text{ pCi/L}$) en las nuevas construcciones según las recomendaciones de la Comisión de Medio Ambiente de la CEE del 21 de febrero de 1990. La Environmental Protection Agency (EPA) recomienda tomar medidas para casos de concentraciones mayores de 200 pCi/L (7400 Bq/m^3) reducir los niveles en un plazo de varias semanas, de 20 a 200 pCi/L (740 a 7400 Bq/m^3) tomar las medidas para reducir los niveles por debajo de 4 pCi/L en un plazo de varios meses, de 4 a 20 pCi/L (150 Bq/m^3 a 741 Bq/m^3) tomar medidas para reducir los niveles hasta por debajo de 4 pCi/L (148 Bq/m^3) en un plazo de varios años y en el caso de 4 pCi/L aunque la exposición a este nivel representa menor riesgo, los descensos de estos bajos niveles son a veces [7] difíciles de conseguir, se muestra algunas tablas:

Tabla 1.1: Riesgo por Rn para un fumador [5].

Radon level	If 1000 people who smoked were exposed to this level over a lifetime	the risk of cancer from radon exposure compares to	What to do: stop smoking and
20 pCi/L	About 260 people could get lung cancer	250 times the risk of drowning	Fix your home
10 pCi/L	About 150 people could get lung cancer	200 times the risk of dying in a home fire	Fix your home
8 pCi/L	About 120 people could get lung cancer	30 times the risk of dying in a fall	Fix your home
4 pCi/L	About 62 people could get lung cancer	5 times the risk of dying in a car crash	Fix your home
2 pCi/L	About 32 people could get lung cancer	6 times the risk of dying from poison	Consider fixing between 2 and 4 pCi/L
1,3 pCi/L	About 20 people could get lung cancer	(Average indoor radon level)	(Reducing levels below
0,4 pCi/L		(Reducing levels below)	2 pCi/L is difficult)

Como podemos observar un fumador que también es expuesto al Radón tiene un mayor riesgo de contraer cáncer al pulmón. Existen diversos estudios que analizan el riesgo que existe de contraer cáncer al pulmón debido a altas concentraciones de Radón, estos estudios denominados estudios de control por riesgo de cáncer debido a la exposición en interiores han mostrado que el riesgo de cáncer de pulmón crece con largos periodos en promedios 20 a 30 años de exposición al Radón 222.

Tabla 1.2: Riesgo por Rn para un no fumador [5].

Radon level	If 1000 people who smoked were exposed to this level over a lifetime	the risk of cancer from radon exposure compares to	What to do: stop smoking and
20 <i>pCi/L</i>	About 36 people could get lung cancer	35 times the risk of drowning	Fix your home
10 <i>pCi/L</i>	About 18 people could get lung cancer	20 times the risk of dying in a home fire	Fix your home
8 <i>pCi/L</i>	About 15 people could get lung cancer	4 times the risk of dying in a fall	Fix your home
4 <i>pCi/L</i>	About 7 people could get lung cancer	The risk of dying in a car crash	Fix your home
2 <i>pCi/L</i>	About 4 people could get lung cancer	The risk of dying from poison	Consider fixing between 2 and 4 <i>pCi/L</i>
1,3 <i>pCi/L</i>	About 2 people could get lung cancer	(Average indoor radon level)	(Reducing levels below
0,4 <i>pCi/L</i>		(Reducing levels below)	2 <i>pCi/L</i> is difficult)

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1. Desintegración alfa

El gas Radón tiene varios radioisótopos el Rn 222, Rn 220, Rn 219 además de otros isotopos, de las cuales el más abundante y de mayor periodo de semidesintegración (3.82 días) es el Rn 222, cuyo padre es el Ra 226 (1602 años) tanto padre e hijo sufren decaimiento alfa a continuación se muestra un diagrama de niveles de la desintegración alfa del Ra 226 al Rn 222.

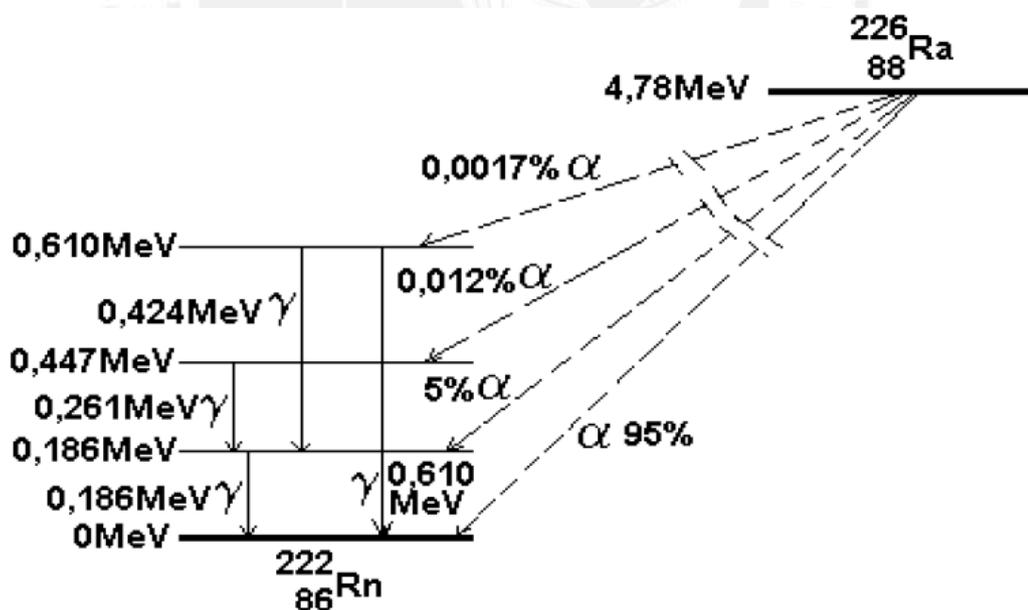


Figura 2.1: Diagrama de los niveles de energía de la desintegración alfa del Ra 226 a Rn 222 [24].

Este tipo de decaimiento ocurre en elementos con número atómico alto y tiene la siguiente forma:



Los núcleos radiactivos en muchos casos emiten partículas alfa de diferentes energías, un espectro de partículas alfa, permitiendo definir ciertos niveles energéticos del núcleo emisor. se puede determinar las energías de las partículas alfa a través de un espectrógrafo magnético, si se conoce la intensidad del campo magnético y el radio de la trayectoria como son partículas cargadas experimentan la fuerza de Lorentz de acuerdo a ello la velocidad se calcula como $v = \frac{qHr}{m_0} \sqrt{1 - \beta^2}$, tomándose en cuenta correcciones relativistas la energía de las partículas alfa estará dado por:

$$E_{k\alpha} = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad (2.2)$$

Ahora, como leyes generales en la desintegración alfa, se cumple la conservación de energía así como también la conservación del momento. Si asumimos que la masa del núcleo padre es M_P , masa del núcleo hijo M_H y la masa de la partícula alfa m_α entonces por conservación de energía se tiene:

$$M_p c^2 = (M_H + m_\alpha) c^2 + E_{k\alpha} + E_{kH} + E_\gamma \quad (2.3)$$

Donde $E_{k\alpha}$, E_{kH} son las energías cinéticas de la partícula alfa e hijo respectivamente y E_γ la energía del fotón gamma, podemos definir la energía de desintegración alfa como:

$$E_\alpha = (M_p - M_H - m_\alpha) c^2 = E_{k\alpha} + E_{kH} + E_\gamma \quad (2.4)$$

Pero suponiendo que decae a su estado fundamental $E_\gamma = 0$ y por conservación de momento se tiene que la velocidad de la partícula alfa se puede calcular en términos de las masas.

$$v_\alpha = \sqrt{2 \frac{(M_p - M_H - m_\alpha) c^2}{m_\alpha \left(\frac{m_\alpha}{M_H} + 1 \right)}} \quad (2.5)$$

Ahora como podemos ver en el esquema de desintegración del $Ra\ 226$, el 95 % de las partículas alfa poseen una energía cinética de $4,78 MeV$ mientras que cuando se desintegra mediante partículas alfa que tienen energías cinéticas de $4,17 MeV$ que sufren los núcleos en un porcentaje de 0,0017 %, aparece el $Rn\ 222$ en estado excitado, siendo su energía de excitación de $0,610 MeV$, que es precisamente la energía del fotón gamma que necesita emitir para llegar al nivel fundamental o normal y como podemos notar también hay transiciones prohibidas, así podemos tener $Rn\ 222$ en estados excitados ó en estado normal.

Una forma teórica de explicar el decaimiento alfa y que fue uno de los primeros éxitos de la mecánica cuántica y se correlaciona bastante bien con la parte experimental, fue el desarrollado por Gamow y Gurney [16], [18] el cual consiste en asumir que la partícula alfa se mueve en el campo del núcleo hijo, este campo estará dado por el potencial de Coulomb hasta una cierta distancia denominado radio efectivo del núcleo, a partir del cual actuará un

potencial atractivo el cual descenderá rápidamente y será constante como sigue a continuación.

$$V = \begin{cases} -V_0 & , r < R \\ 2Ze^2/r & , r > R \end{cases} \quad (2.6)$$

Donde Z número de protones del núcleo hijo, V_0 es el potencial atractivo, R es el radio efectivo y en forma gráfica se representa de la siguiente manera:

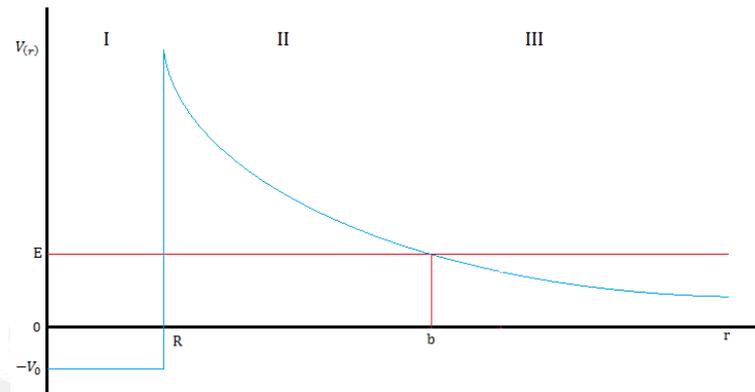


Figura 2.2: Potencial para la emisión de las partículas alfa [12].

El cual consiste de tres regiones en cada una de las cuales se plantea la ecuación de Schrödinger radial, luego usando la aproximación de Jeffreys para las regiones II Y III se resuelve y usando las condiciones de contorno se puede calcular la constante de desintegración [12] como:

$$\lambda = \frac{8(E + V_0)}{\sqrt{2\mu R(2Ze^2 - ER)}} \exp^{-2 \int_R^b \left(\sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} \left(\frac{2Ze^2}{r} - E \right)} dr \right)} \quad (2.7)$$

Donde μ es la masa reducida, como podemos observar el término exponencial varía notablemente para pequeños cambios de la energía, entonces podemos decir que la constante de desintegración será mayor si la energía de desintegración E es mayor y viceversa este hecho ya se había observado en forma experimental en la regla Geiger-Nuttall la cual relaciona el $\log \lambda + 20$ y logaritmo del alcance, mediante una ecuación lineal, donde además si aplicamos esta regla podemos graficar los emisores alfa de cada cadena radiactiva en tres ecuaciones lineales cada una correspondiente a cada cadena y además tienden a ser paralelas. Podemos estimar que una variación de energía de 2MeV a 3MeV provoca un cambio en la constante de desintegración del orden de 10^{24} . Para darnos una idea se muestra la siguiente tabla.

Tabla 2.1: Tabla de las energías, periodos y constantes de desintegración para algunos emisores alfa [26].

Núclido	Alcance medio en aire (cm)	Energía de desintegración alfa (MeV)	Periodo de semidesintegración	constante de desintegración (seg^{-1})
Th 232	2,49	4,05	$1,39x10^{10}a$	$1,58x10^{-18}$
Ra 226	3,30	4,88	$1,62x10^3a$	$1,36x10^{-11}$
Th 238	3,98	5,52	$1,9a$	$1,16x10^{-8}$
Rn 222	4,05	5,59	$3,83d$	$2,10x10^{-6}$
Po 218	4,66	6,12	$3,05m$	$3,78x10^{-3}$
Po 216	5,64	6,89	$0,16s$	4,33
Po 214	6,91	7,83	$1,5x10^{-4}s$	$4,23x10^3$
Po 212	8,57	8,95	$3,0x10^{-7}s$	$2,35x10^6$

2.2. Interacción de las partículas alfa con la materia

Dado que las partículas alfa son núcleos de He 4 cargados positivamente 2 veces la carga del electrón, además de ser partículas pesadas estas interactúan con la materia mediante colisiones y transfieren su energía cinética mediante colisiones causando ionización y excitación, los electrones así liberados son llamados ionización primaria, también pueden generar ionizaciones secundarias, esta cesión de energía será hasta recombinarse a determinada distancia o alcance.

2.2.1. Alcance o rango

El alcance de una partícula alfa R es la distancia de la fuente hasta donde se puede notar la llegada de partículas alfa en forma casi constante a partir del cual el número de partículas disminuye hasta cero, entonces podemos decir que es la máxima distancia de penetración en un medio material.

Entonces una forma de determinar el alcance es usando una cámara de ionización junto con una fuente colimada además dicha fuente pueda moverse para poder controlar el espesor de aire que necesita atravesar la partícula alfa hasta llegar a la cámara de ionización para ser detectada, en ella se mide la velocidad de recuento, producto de las ionizaciones generadas en la cámara que se son amplificadas como pulsos y está en función de la distancia a la que se encuentra la fuente. El alcance a condiciones normales en aire para energías de 4 a $7MeV$ se cumple de forma empírica que es:

$$R_0cm = 0,309.[E(Mev)]^{3/2} \quad (2.8)$$

Usando esta expresión se puede llegar a calcular el alcance en otros medios usando la fórmula de Bragg-Kleeman como sigue.

$$R(cm) = R_0 3,2 \times 10^{-4} \frac{\sqrt{A_{ef}}}{\rho} \quad (2.9)$$

Donde R_0 es el alcance medio en aire, ρ es la densidad del material en g/cm^3 y el A_{ef} el número másico efectivo se puede calcular como.

$$\sqrt{A_{ef}} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i A_i}{\sum_{i=1}^K n_i \sqrt{A_i}} \quad (2.10)$$

n_i son las fracciones atómicas, A_i números de masa de los diferentes átomos que conforman el material.

2.2.2. Energía de ionización

Es la energía necesaria para arrancar un electrón de un átomo que se encuentra en su estado fundamental, su valor depende de la molécula o átomo y podemos notarla como w ahora podemos ver algunos valores en la siguiente tabla.

Tabla 2.2: Energías de ionización para algunos gases [4].

Gas	w(eV/par)
H2	37
He	41
N2	35
O2	31
Aire	35
Ne	36
Ar	26

2.2.3. Ionización total I_t

Es el número de pares iónicos generados por ionización primaria e ionización secundaria debido a la cesión de energía de la partícula al interactuar con el medio hasta que toda su energía cinética E_{k0} inicial sea transferida. Entonces podemos definir la ionización total como la razón entre la energía cinética inicial y la energía media de ionización.

$$I_t = \frac{E_{k0}}{w} \quad (2.11)$$

En condiciones normales en aire la I_t se puede calcular como:

$$I_t = 2,88x10^4 E(MeV) \quad (2.12)$$

Donde $E(MeV)$, es la energía cinética de las partículas alfa.

2.2.4. Ionización específica I_s

Podemos definirla como el número de pares ionicos que se crean por unidad de longitud por la partícula incidente tanto ionizaciones primarias como secundarias dentro del medio material, entonces entre x y $x + dx$ se puede escribir lo siguiente:

$$I_s = \frac{I_t}{dx} \quad (2.13)$$

La interacción de las partículas con la materia principalmente se da por interacción electromagnética, al ingresar estas partículas cargadas a determinado medio sufren colisiones transfiriendo de esta forma su energía, distinguiéndose colisiones elásticas e inelásticas, en el primero de ellos solo hay una transferencia de energía cinética, no habiendo ionización y excitación en los átomos, pero en las colisiones inelásticas hay transferencia de energía por parte de la partícula cargada los cuales producen ionización y excitación y este es el proceso que generalmente sufren las partículas cargas en un determinado medio. Dado que las partículas alfa son átomos de He doblemente cargados que se mueven con determinada aceleración estos emitirán una radiación electromagnética cuya intensidad será proporcional al cuadrado a de la aceleración, entonces podemos decir $a = \frac{Ze^2}{me}$

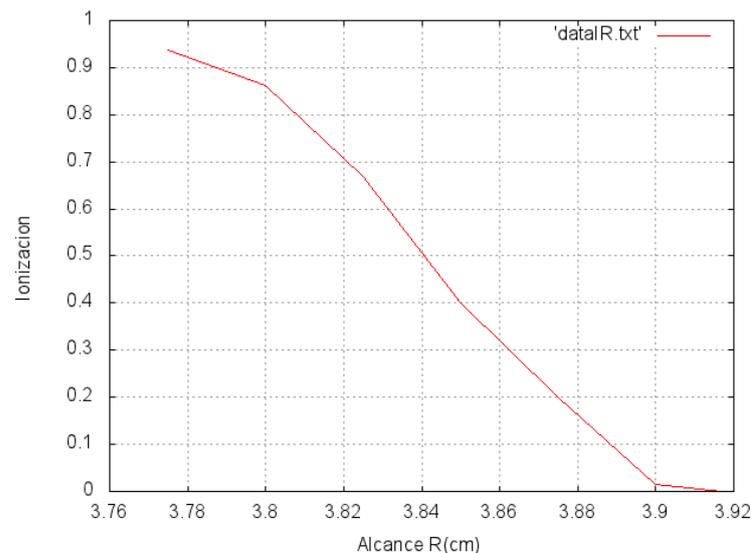


Figura 2.3: Curva de alcance de las partículas alfa del Po 212 [26]

Ahora podemos observar un ejemplo del alcance cuya ordenada representa la fracción de partículas que son detectadas a diferentes alcances las cuales causan una ionización relativa. Esta gráfica muestra la parte final del alcance en aire así como también podemos definir el alcance extrapolado como una tangente en el punto de inflexión que corta al eje de las abscisas y un alcance medio como la abscisa de la mayor ordenada de la curva diferencial de los alcances, que explica que el alcance de las partículas no es constante, debido al efecto de dispersión del alcance, el cual se debe a la forma en como interactúa la partícula alfa con el medio. La forma de curva de la ionización es la misma no importando el gas y la energía de la partícula alfa y se diferencian solamente por el alcance y la magnitud de la curva de ionización.

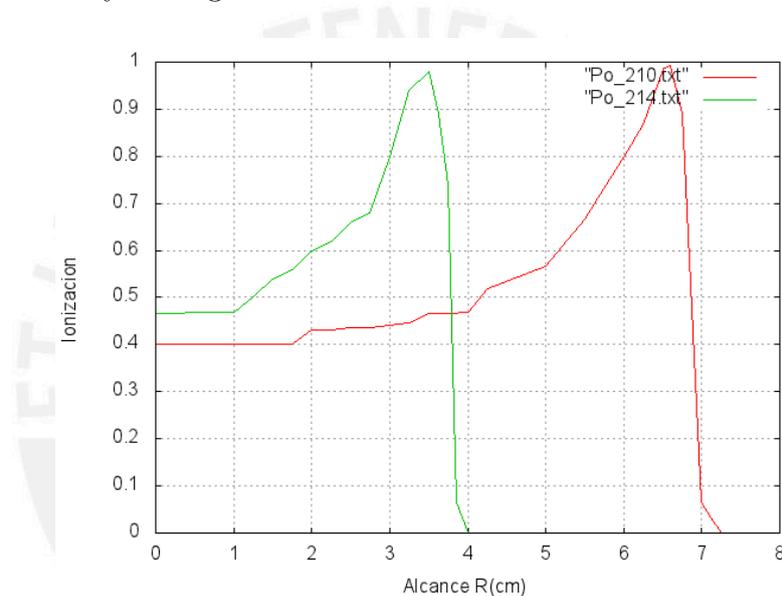


Figura 2.4: Ionización específica vs alcance R(cm) donde se varió la distancia de la fuente de las partículas alfa del Po 210 y Po 214 [26]

Gracias a las curvas de ionización nosotros podemos calcular las energías de las partículas alfa que han sido absorbidas por el medio, sabemos que la energía media de ionización es de 35 eV y con una cámara de ionización, se obtiene pulsos de diferentes alturas, si estos pulsos se seleccionan por diferentes canales correspondiente, podemos registrar muchos pulsos de alturas diferentes en forma simultánea y si conocemos cierta energía de alguna fuente alfa particular, podemos relacionar el canal a la energía por consiguiente a la altura de pulso, de esta forma podríamos conocer la energía de las partículas alfa y por consiguiente la fuente emisora.

2.3. Difusión del gas Radón

El Radón como ya se menciona se mueve por difusión y convección. Por ejemplo la velocidad de difusión entre aire y agua son bastante diferentes y esto se caracteriza por el coeficiente de difusión D , cuando el Radón 222 se mueve hay una distancia promedio de difusión antes que el núcleo desaparezca como tal, esa distancia esta dada por $\sqrt{D\tau}$, donde τ es la vida media del isótopo, de esta forma para suelos secos esa distancia es aproximadamente 1,6 m mientras que para suelos húmedos con altas concentraciones de agua dicha distancia es aproximadamente 1,6 cm [10].

Tabla 2.3: Valores para de las longitudes de difusión y constante de difusión para Rn 222 y Rn 220 [10].

Medio	$\sqrt{D\tau_{Rn-222}}$ (cm)	$\sqrt{D\tau_{Rn-220}}$ (cm)	Cosntante de difusión D ($cm^2 s^{-1}$)
Aire	220	2.85	10^{-1}
Suelo poroso	115	2.0	$5x10^{-2}$
Agua	2.2	0.0285	10^{-5}
Suelo poroso saturado	1.55	0.020	$5x10^{-6}$

Existen diferentes tipos de rocas que contienen concentraciones de uranio que varían, y estas están relacionadas a pequeñas cantidades de ciertos minerales presentes en las rocas que a menudo no se toma en cuenta, por ejemplo el Circonio, Apatito, Esfeno etc. En un estudio que se hizo analizando una roca de meteorito se encontró que el circonio puede grabar las huellas que dejan las partículas pesadas que se producen por fisión espontanea y de radiación cósmica, encontrándose mediante este método concentraciones de uranio que varían bastante dependiendo que tipo de circonio se encontró en el meteorito, las diferencias de distribución de uranio influye mucho en la liberación del Radón.[14]

El Radón 222 producido por la desintegración del Uranio 238 casi nunca escapa del lugar donde se crea, es usual que se de en el subsuelo donde esta bastante comprimido y por supuesto que puede escapar una pequeña fracción inmediatamente después de formase o antes de que decaiga. Una muestra de esto es la siguiente tabla.

Tabla 2.4: Concentración típica de Rn 222 [10].

Localización	Concentración átomos (cm^{-3})
Aire sobre los océanos	0.04
Aire cerca de la superficie de la tierra	4
Concentración típica en las casas de U.S	20
Gases del suelo	20000
En el interior de los minerales comunes	500000

El mecanismo de liberación del gas Radón se da a través de un efecto llamado efecto retroceso, que sufre el Radón debido al decaimiento alfa del Radio. esto es por conservación de momento, así pues el Radón 222 tiene una energía cinética de alrededor de 86 keV el cual es suficiente para desplazar el radón en promedio 26 nm en tridimita SiO_2 , entonces podemos observar dos casos, el primero de ellos muestra el proceso de retroceso que sufre el Radón logrando salir del grano sólido que contiene el Radio, dado que el espacio entre granos contiene agua el Radón es frenado por este, luego el Radón se difundirá o sera trasportado por el agua.

El segundo caso si el espacio entre granos es seco solo hay gas entre granos, entonces el Radón al sufrir el proceso de retroceso el gas entre granos no lo frena conllevando al Radón a entrar dentro del grano vecino, dejando una huella por el que entró al otro grano, huella que podrá ser degradada si es que el suelo se humedece antes que decaiga el Radón permitiendo escapar al Radón.

El proceso de transporte del Radón se lleva a cabo por difusión y por diferencias de presión. Mediante difusión dependerá de las condiciones donde sucede, puede ser fácilmente limitada sin embargo por diferencias de presión el Radón 222 y sus isotopos podría llegar a recorrer grandes distancias pero no se conoce aún muy bien estas diferencias de presión solo en casos especiales entonces podríamos decir ambos procesos se superponen en el proceso de transporte del Radón.

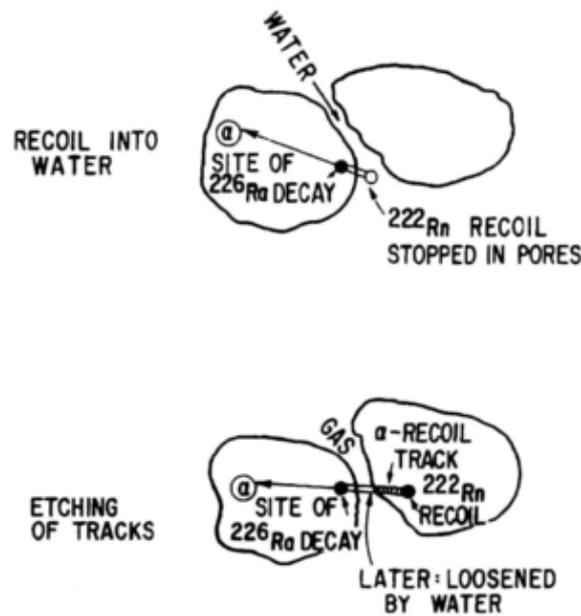


Figura 2.5: Esquema de liberación de Radón 222 en subsuelo [10].

La difusión del Radón 222 tanto en aire como en agua son bastante similares, como ya se dijo, en subsuelo la difusión depende de la porosidad de las rocas y el suelo, como veremos mas adelante habrá mayor transporte por difusión si la porosidad es mayor, ahora debemos considerar la variabilidad de los coeficientes de difusión, en subsuelo varía desde valores de 0.005 a $0.006 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$, que comparado en aire $0,1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$.

El movimiento forzado del Radón 222 en suelos y rocas se debe a la existencia de gradientes de presión que depende de la permeabilidad hidráulica, parámetro definido como, $K = \eta \left(\frac{dV}{dt} \right) / A \left(\frac{dP}{dx} \right)$, donde η es la viscosidad, $\left(\frac{dV}{dt} \right)$ es el volumen que se desplaza por unidad de tiempo y por área A , $\left(\frac{dP}{dx} \right)$ es gradiente de presión, donde la unidad de este coeficiente es de cm^2 , siendo sus valores menores, para diferentes muestras, de 10^{-10} a 210^{-9} cm^2 mientras que a diferentes alturas de 15 a 20 m se tiene valores de entre 10^{-10} a 210^{-6} cm^2 . Ahora este mecanismo de transporte de radón depende de la geología del suelo y de fenómenos geotérmicos, como erupciones volcánicas, concentraciones de Uranio 238 etc.[10]

2.3.1. Modelo de difusión del gas Radón 222

Este modelo evalúa los factores que afectan la difusión y la convección del Radón 222 entre el subsuelo y una casa común, además observaremos cual es el mecanismo que más contribuye a la exhalación de Radón 222.

A continuación la ecuación diferencial en el estado estacionario en un medio poroso, tiene cuatro términos, el primer termino por la ley de Fick describe la

difusión del gas Radón 222 debido a una diferencia de concentración del gas, el segundo termino describe el transporte del Radón 222 por convección por la existencia de una diferencia de presiones en el suelo, el tercer termino explica la generación del gas Radón 222 y el ultimo termino describe su decaimiento.

$$D_e \nabla^2 C + \frac{k}{\varepsilon \mu} \nabla p \nabla C + G - \lambda_{Rn} C = 0 \quad (2.14)$$

Donde C (Bq/m^3) es la concentración, D_e es el coeficiente de difusión, k es la permeabilidad del suelo m^2 , ε es la porosidad, μ es la viscosidad del gas ($Pa.s$), p es la presión en el suelo (Pa) y G es la creación del gas Radón 222 ($Bq/m^3.s$).

Este modelo funciona bajo las siguientes condiciones: Cada elemento mencionado anteriormente es homogéneo (D_e , μ , ε y k), el gas del suelo es incompresible $\nabla \cdot \bar{v} = 0$, el fluido del gas del suelo es lineal por la ley de Darcy $\bar{v} = -\frac{k}{\mu} \nabla p$, la distribución de presión cumple la ecuación del Laplace $\nabla^2 p = 0$

El método que se usa para solucionar esta ecuación diferencial es la de elementos finitos, dado que es una ecuación de difusión y convección, encontrar la solución es un poco complicada debido a que el termino del transporte por convección bajo ciertas condiciones puede darnos ciertas inestabilidades en la solución, que no se da en una ecuación de difusión, el método usado la resolver la ecuación diferencial mencionada arriba es el método Petrov-Galerkin, [23]. Luego se definen la densidad de flujo debido a la difusión E_d y convección E_k

$$E_d = -\varepsilon D_e \nabla C \quad (2.15)$$

$$E_k = -\frac{k}{\mu} \nabla p C = \bar{v} C \quad (2.16)$$

Donde v es la velocidad del flujo del aire a través de las grietas, k es la permeabilidad de las grieta con ancho w donde se cumple que $k = w^2/12$ y de acuerdo a ley de Darcy se tiene que:

$$v = \frac{w^2}{12\mu} \cdot \frac{\Delta p}{d} \quad (2.17)$$

Ademas se define la tasa de flujo o caudal, Q (m^3/s) a través de la grieta, donde d es el espesor de la losa del piso y L es la longitud de la grieta.

$$Q = \frac{w^3 L \Delta p}{12\mu d} \quad (2.18)$$

A continuación se muestra un esquema que realizo Martin Jiránek, el modelo caracteriza el suelo de una vivienda donde esta construida la misma.

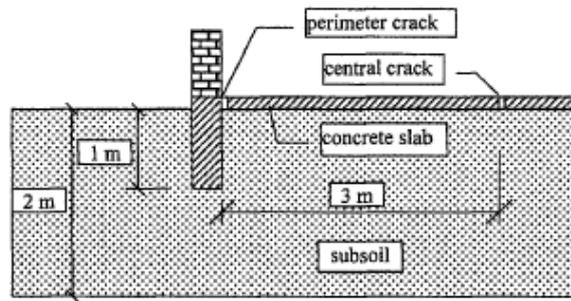


Figura 2.6: Esquema del suelo donde una casa esta costruida vista de la sección transversal [22].

La figura mostrada tiene dos grietas una en el centro, grieta central y otra cerca a la junta a la que se denomina grieta perimétrica, se considera $G = 0,12 \text{ Bq/m}^3\text{s}$ constante así mismo la concentración de Radón ^{222}Rn también constante $57,2 \text{ kBq/m}^3$ la concentración en interior de 60 Bq/m^3 además a través de estas grietas serán los únicos lugares por donde ingresará el Radón ^{222}Rn , no se considera el Radón ^{222}Rn por materiales de construcción, entonces si se varían los diversos parámetros como la permeabilidad del suelo, el tamaño de las grietas y las posiciones de las grietas se obtiene los siguiente.

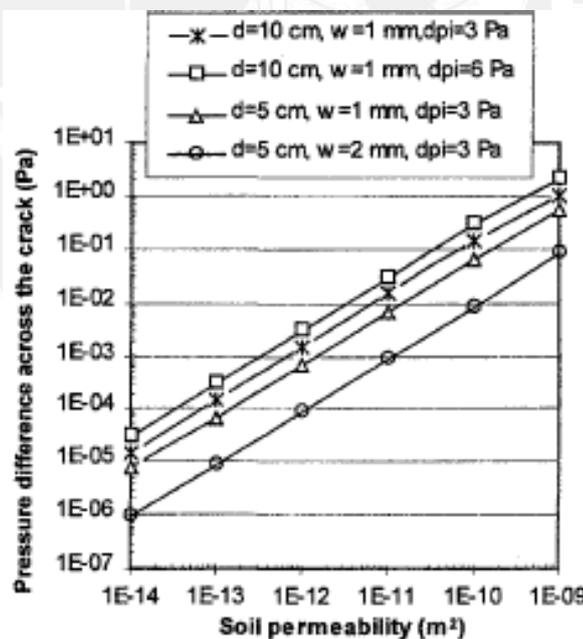


Figura 2.7: Diferencias de presión a través de la abertura vs permeabilidad del suelo [22].

En este esquema se demuestra que para diferentes valores de w , d y a diferencias de presiones entre interiores y exteriores, la diferencia de presiones a través de la grieta es proporcional al espesor de la loza y a la diferencia

de presiones interior exterior e inversamente proporcional a al tamaño de la grieta[22].

Ahora si en la ecuación diferencial parcial no consideramos el transporte por convección, una versión más sencilla para poder encontrar una solución analítica la ecuación en una dimensión, se puede reescribir de la siguiente forma.

$$D_e \frac{d^2 C}{dz^2} + G - \lambda_{Rn} C = 0 \quad (2.19)$$

Para poder solucionar este problema tenemos que asumir ciertas condiciones de frontera tales como: $C(z = 0) = C_1$, $C(Z = H_0) = C_2$ y además definimos un parámetro denominado longitud de difusión:

$$l_0^2 = \frac{D_e}{\lambda_{Rn}} \quad (2.20)$$

Teniendo en cuenta esta consideración se puede llegar a la siguiente solución:

$$C(z) = A \sinh\left(\frac{z}{l_0}\right) + B \cosh\left(\frac{z}{l_0}\right) + \frac{G}{\lambda_{Rn}} \quad (2.21)$$

Utilizando las condiciones de frontera, se determina los coeficientes A y B , donde el $\sinh(z = 0) = 0$.

$$A = \frac{C_2 - C_1 \cosh\left(\frac{H_0}{l_0}\right) - G \lambda_{Rn}^{-1} (1 - \cosh\left(\frac{H_0}{l_0}\right))}{\sinh\left(\frac{H_0}{l_0}\right)} \quad (2.22)$$

$$B = C_1 - \frac{G}{\lambda_{Rn}} \quad (2.23)$$

Reemplazando estos coeficientes en la solución se tiene lo siguiente:

$$C(z) = \left(\frac{C_2 - C_1 \cosh\left(\frac{H_0}{l_0}\right) - G \lambda_{Rn}^{-1} (1 - \cosh\left(\frac{H_0}{l_0}\right))}{\sinh\left(\frac{H_0}{l_0}\right)} \right) \sinh\left(\frac{z}{l_0}\right) + \left(C_1 - \frac{G}{\lambda_{Rn}} \right) \cosh\left(\frac{z}{l_0}\right) + \frac{G}{\lambda_{Rn}} \quad (2.24)$$

Entonces podemos observar que la ecuación a lo largo del eje Z , depende las concentraciones C_1 , C_2 , H_0 es la distancia que se tiene que difundir el Radón 222 en el subsuelo hasta alcanzar una concentración C_2

Ahora utilizando una vez más la ley de Fick, podemos definir un parámetro llamado exhalación E , que es la densidad de corriente de partículas de Radón 222 que atraviesan determinada área por unidad de tiempo y esta es proporcional a la gradiente de concentración.

$$E = -D_e \frac{dC}{dz} \quad (2.25)$$

Cuando $Z = H_0$, cuando el gas Radón 222 haya terminado de difundirse en subsuelo este saldrá al exterior dicho de otra forma, este exhalará al exterior donde la concentración de Radón 222 será C_2 , en un volumen V_2 , entonces en este proceso se puede llegar a un equilibrio, llamado equilibrio de concentración, esto quiere decir que la C_2 no variara con la altura ni con el tiempo, esto sucederá si y solo si, los átomos de radón que desprecen en el V_2 es igual al número de átomos que ingresan al V_2 por exhalación por determinada área A' , esta condición se puede expresar de la siguiente forma:

$$EA' = \lambda_{Rn}C_2V_2 \quad (2.26)$$

Dado la condición de equilibrio se obtiene lo siguiente [20].

$$C_2 = \frac{l_0A'(C_1 - G\lambda^{-1}(1 - \cosh(\frac{H_0}{l_0})))}{A'l_0 \cosh(\frac{H_0}{l_0}) + V_2 \sinh \frac{H_0}{l_0}} \quad (2.27)$$

Si C_2 , C_1 , G , A' , V_2 Y H_0 son parámetros conocidos se puede calcular D_e para el tipo del suelo o material de construcción, simplemente despejando l_0 y reemplazando $l_0\lambda_{Rn} = D_e$

Usando métodos bastante similares al descrito se han obtenido valores de D_e de los siguiente materiales [27], [21].

Tabla 2.5: Valores experimentales de los coeficientes y longitudes de difusión del Rn 222 en algunos materiales [27].

Material	Espesor 10^{-3} (m)	Coefficiente de difusión $10^{-6} m^2/s$	Longitud de difusión 10^{-3} (m)	Valoración
Yeso	100	2.35	1100	Permeable
Piedra pómez	150	1.50	850	Permeable
Piedra caliza	150	0.34	400	Permeable
Ladrillo	150	0.35	400	Permeable
Arenisca	100	2.20	1000	Permeable
Hormigón	100	1.30	800	Permeable
Concreto pe- sado	100	0.007	60	Permeable
Concreto del polímero PCC	40	$< 10^{-6}$	7	Impermeable
Granito	30	$< 10^{-6}$	0.7	Permeable
Placas de vi- drio	70	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Asbesto del asfalto	3	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Betún	3	$< 10^{-6}$	$\leq 0,7$	Impermeable
Papel de PEHD	1	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Goma de sili- cona	3	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Lamina de plomo	0.1	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Caucho butílico	1.5	$< 10^{-5}$	2	Permeable
Revestimiento de poliure- tano	5	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Lámina de plástico	3	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable
Resina epóxi- ca	3	$< 10^{-6}$	$< 0,7$	Impermeable

2.4. Formación de las trazas o huellas nucleares

Como ya se dijo anteriormente las partículas alfa emitidas por el gas Radón 222 , interactúan con el medio mediante colisiones causando ionizaciones y excitaciones, estas partículas al interactuar con un sólido puede causar estos efectos y crear centros de tensión estables que luego reaccionarán al grabado químico. En los polímeros constituido por un sin número de cadenas, las partículas alfa rompen las cadenas al interactuar con el material, produciéndose los radicales libres que reaccionarán químicamente (en el grabado con el $Na(OH)$) a mayor velocidad que en las zonas donde no se produjeron tal rompimiento de cadenas. Los rayos delta son electrones desplazados y si poseen energía suficiente pueden producir ionizaciones secundarias y excitaciones, para sólidos (cristales y vidrios) es despreciable en la formación de la traza o huella.

En sólidos la formación de huellas básicamente se da por ionización primaria para energías cedidas de 10^{14} *erg/gr*, en polímeros los efectos que causan los rayos delta son fundamentales además se debe tener en cuenta las excitaciones e ionizaciones secundarias, dado que si se produce rompimiento de cadenas por estos, la razón de grabado del polímero aumentará.

Un modelo que es bastante ilustrativo que explica la formación de huellas en sólidos es la punta de explosión iónica, el cual consiste en la formación de una inestabilidad debido a la ionización producida por la partícula alfa produciendo un desplazamiento de iones de cargas iguales en direcciones contrarias produciéndose vacancias y iones intersticiales y eso hace que se expanda el esfuerzo alrededor de la dirección de la partícula ionizante, pero para que funcione este modelo se debe tener en cuenta dos restricciones que tienen que ver con la concentración y la movilidad de las corrientes llevadas, la repulsión coulombiana debe superar la fuerza de enlace entre cada uno de los constituyentes de la red, en otras palabras el estrés producido debe ser mayor que la fuerza local existente entre ellos, lo que explica la formación de huellas en aislantes y semiconductores de baja conductividad ya que por procesos de recombinación podría no formarse la huella, entonces la concentración se refiere a que si los electrones que han sido expulsados por ionización cerca de la huella pueden ser remplazados antes que se de el estrés o desplazamiento estamos hablando de un tiempo de 10^{-13} segundos que se necesita para que se de tal desplazamiento, entonces podría no formarse huella, sufriría como ya dijimos el efecto de recombinación, ahora si tratamos de cuantificar la densidad electrónica necesaria para que se forme la huella se dice que n_n densidad de electrones libres y el número de ionizaciones producidas por átomo es n_a , la región donde sería vaciado un número de electrones sería juntamente como sigue [15].

$$n_a = \pi r^2 a_0 n_n \quad (2.28)$$

Donde a_0 es la separación entre iones, r es la longitud de difusión de los electrones y el tiempo necesario para esta longitud esta dada como ya vimos

anteriormente como r^2/D , donde D es el coeficiente de difusión dada por la ecuación de movilidad eléctrica $D = \mu_q K_b T / e$, que asocia un movimiento de una partícula cargada, esta expresión nos dice si en esta región se vacían electrones en menor tiempo que lo antes dicho se evitara la formación de huellas entonces la condición necesaria para la formación de huellas es solo si cumple $n_n < en_a / \pi a_0 \mu_q k_b T t$. Si la movilidad de las vacancias se da en cualquier dirección en regiones de alta concentración, no se formara huellas entonces para que se forme estas es necesario que la movilidad sea menor que $r_0 e / 4tKT$, [13]

2.5. Geometría de las trazas o huellas debido al baño químico

Una vez formada las huellas latentes en los detectores de estado solido, estas trazas no se pueden observar con un microscopio óptico dado que los diámetros son muy pequeños, para hacer posible la observación de estas huellas se somete a un proceso de grabado, en este caso el polímero que usamos LR-115 tipo 2, será sometido a una solución básica, la cual realizará sobre el polímero dos procesos de grabado, uno dado por V_T que es la velocidad de grabado a lo largo de la huella latente y un grabo general dado por V_g que es la velocidad de grabado sobre la superficie del detector y ademas ambos parámetros se consideran constantes (por simplicidad), para una partícula que ha incidido en forma vertical sobre la superficie del detector con un tiempo de grabo dado por t , el modelo sería como sigue:

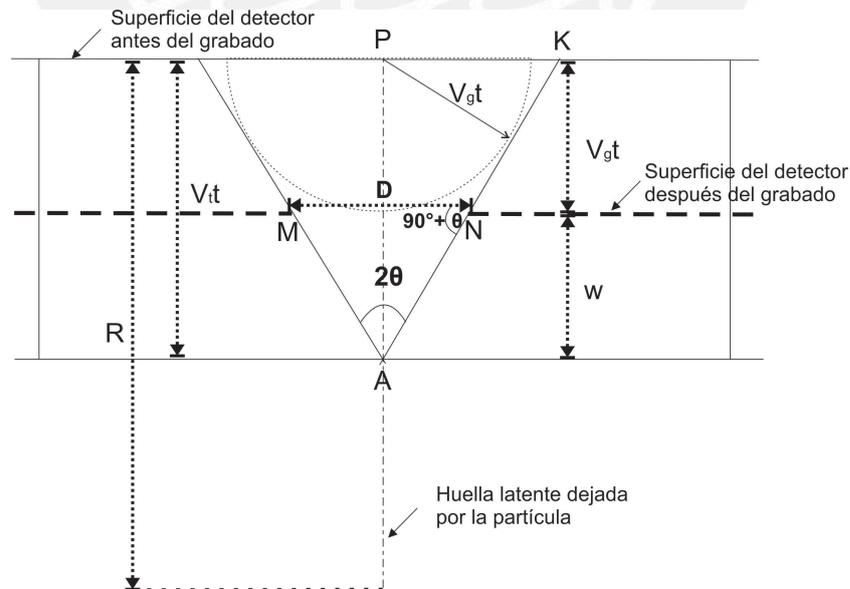


Figura 2.8: Modelo de la formación de la huella con V_T Y V_g constantes con incidencia vertical sobre el detector.

Como podemos observar en la figura se definen diversos parámetros ademas

de los ya mencionados, donde R es el alcance de la partícula, D diámetro que es posible observar luego del proceso de grabado, θ ángulo formado entre la dirección de la huella latente y la pared del cono, dado que se da un rompiendo de cadenas tras el paso del partícula ionizante, el camino dejado está más propenso a racionar con la solución básica debido a la formación de radicales, por ello $V_T > V_g$, por ende los espesores disueltos también serán diferentes como se observa en la figura, se puede encontrar algunas relaciones importantes.

Podemos notar fácilmente que $W = t(V_T - V_g)$ por geometría básica que el $\sin \theta = V_g/V_{V_T}$, además usando la ley de senos en el triángulo MNA se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{MA}}{\sin(90^\circ + \theta)} &= \frac{\overline{MN}}{\sin 2\theta} \\ \frac{\sqrt{(D/2)^2 + W^2}}{\cos \theta} &= \frac{D}{\sin 2\theta} \\ \csc \theta &= 2 \frac{\sqrt{(D/2)^2 + W^2}}{D} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Una vez más usando identidades trigonométricas en los triángulos rectángulos se puede determinar otra relación, usamos la $\tan \theta$ en los triángulos APK y ADN como sigue:

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{\overline{PK}}{\overline{AP}} = \frac{\overline{DN}}{\overline{AD}} \\ \frac{D/2 + V_g t \tan \theta}{V_T t} &= \frac{D/2}{W} \\ \frac{D}{2(V_T - V_g)} &= \frac{D + 2V_g t \tan \theta}{V_T} \\ D &= 2t \tan \theta (V_T - V_g) \\ D &= 2t \frac{V_g}{V_T \cos \theta} (V_T - V_g) \\ D &= 2t V_g \frac{(V_T - V_g) \sqrt{V_T - V_g}}{\sqrt{V_T - V_g} \sqrt{V_T - V_g} \sqrt{V_T + V_g}} \\ D &= 2t V_g \frac{\sqrt{V_T - V_g}}{\sqrt{V_T + V_g}} \end{aligned} \quad (2.30)$$

De esta ecuación se puede decir que si ambas velocidades llegan a ser iguales entonces $D = 0$, de la misma forma podemos calcular otras relaciones [15] parámetros de grabado en función de los parámetros antes definidos como:

$$V_g t = (D/2)(\tan \theta + \sec \theta) \quad (2.31)$$

$$V_T t = (D/2) \csc \theta (\tan \theta + \sec \theta) \quad (2.32)$$

2.6. Cálculo de la concentración de Radón

En los primeros estudios hechos en minas [36], se trabajaba con una unidad llamada Working Level, unidad de densidad de energía volumétrica (MeV/L), energía que puede ser depositada por las hijas del Radón en el pulmón, debido a esto se tomo un límite de concentración para el Radón en minas de $100 pCi/L$, dado que en las viejas minas la ventilación era deficiente, se puede llegar a un estado en donde tanto el Radón y sus hijas pueden llegar al equilibrio y en esas condiciones para la concentración de Radón antes mencionada, las hijas del Radón pueden liberar $130000 MeV$ de energía por decaimiento alfa entonces se tiene que, $1 WL = 130000 MeV/L$, esto en aire, luego de ello se definió el Working Level Month, que no es sino las horas de trabajo de un mes de 170 horas, en las que las hijas liberan energía y se define pues $1 WLM = Working Level Month = 1 WL$ exposición por 170 horas.

El WL es un parámetro importante ya que nos da una referencia de cuanta dosis podríamos recibir respecto las hijas del Radón, dado que en las viviendas no se llega por lo general a un equilibrio, entonces la concentración de las hijas se estima en un 40 %, siendo pues el factor de conversión de $1 pCi/L = 24 \mu WLM$. Se asume un factor de equilibrio de 0,40, en estas condiciones se asume también que el promedio de permanencia en casa es 7000 horas durante un año esto es pues $1 WLM = 4 mSv$, es una aproximación de cuanto dosis podríamos recibir [19].

Como se ha visto, es importante determinar las concentraciones de Radón, ya que a partir de ella se puede estimar la dosis a la que podríamos estar expuestos debido a las hijas del Radón, entonces la relación que se usa para determinar la concentración de Radón 222 usando (SSNTD).

$$C = \frac{T}{Kt} \quad (2.33)$$

Donde:

C; es la concentración en Bq/m^3 , $1 pCi/L = 37 Bq/m^3$

T; es la densidad de huellas $\#Huellas/mm^2$

K; factor de calibración $\frac{\#Huellas/mm^2}{(Bq/m^3)h}$

t; es el tiempo a la que el detector estuvo expuesto (h), horas.

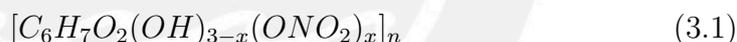
Mediante esta ecuación podemos calcular la concentración, sin embargo hay que tener ciertas consideraciones respecto al factor de calibración [11].

Capítulo 3

Materiales y metodología experimental

3.1. Polímero LR-115 tipo 2

El polímero nitrocelulosa fue descubierto por Christian Friedrich S. en 1846 en forma accidental mientras trabajaba en su laboratorio, es un polímero lineal sintetizada por nitración, en principio tenemos la celulosa, que es una cadena de uniones de moléculas de beta-glucosa, estas se hacen reaccionar con el ácido nítrico HNO_3 reemplazando los grupos hidroxilo OH por los nitratos ONO_2 y la formula química que explica este proceso es:



Donde x es el número de grupos hidroxilos que son reemplazados por los nitratos, mientras los grupos hidroxilos sean casi completamente reemplazados, el nitrato de celulosa será más puro y entonces estos servirán para aplicaciones militares, entonces el parámetro que regula el grado de reemplazos o el grado de nitración se conoce como el grado de sustitución $D.S.$, este parámetro determinara si el nitrato de celulosa será aplicado como pintura, como explosivo etc. [37]

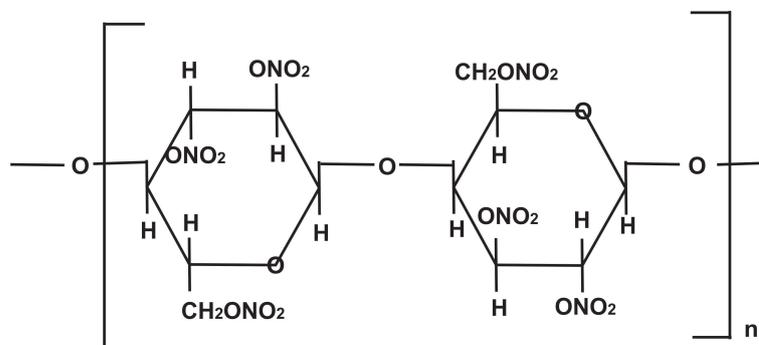


Figura 3.1: Estructura del nitrato de celulosa [35].

El grado de sustitución $D.S.$ se puede calcular mediante la siguiente relación como:

$$D.S. = \frac{3,6 \times \text{contenidodenitrogeno}(\%)}{31,13 - \text{contenidodenitrogeno}(\%)} \quad (3.2)$$

Por ejemplo, cuando $D.S. = 1$ quiere decir que el 6,76 % de los monómeros del nitrato de celulosa son nitrógeno, si los porcentajes de nitrógeno alcanzan valores de 11,11 % o 14,15 % para $D.S. = 2$ Y $D.S. = 3$, respectivamente. Entonces como ya dijimos la aplicación que se le da al nitrato de celulosa depende del contenido de nitrógeno en ella, para porcentajes de nitrógeno menores a 12 % el nitrato de celulosa es usado en barnices, ropa, películas fotográficas, detector alfa LR-115 tipo 2, etc. Si el porcentaje es mayor al 12 % es usado en la manufactura de explosivos [30].

El detector (SSNTD) nitrato de celulosa mejor conocido como LR-115 tipo 2, es un polímero de color rojo que está compuesto de un poliéster como base de 100 μm de espesor y nitrato de celulosa impregnado sobre él de 12 μm de espesor.

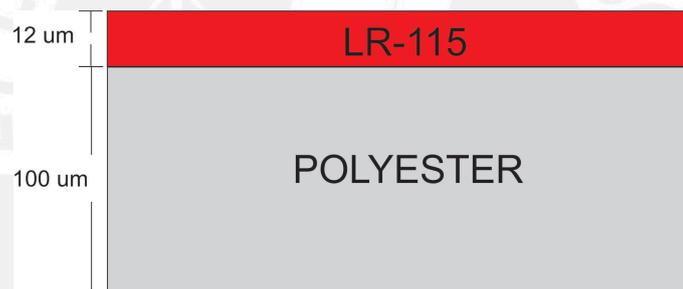


Figura 3.2: Esquema del detector LR-115 tipo 2

El LR-115 tipo 2 es un detector sensible a las partículas alfa cuando estas impactan sobre él, causando daño a su estructura por los procesos antes explicados, una traza en el material no se puede observar a simple vista dado que el tamaño original de estas huellas latentes están entre 20 y 50 Å , entonces es aquí donde el polímero necesita sufrir un ataque químico para poder agrandar estas huellas, obteniéndose huellas con diámetros de 1 μm a 15 μm y mediante un microscopio óptico podremos observarlas. También cabe mencionar que este detector no es sensible a las radiaciones β , γ esto demostrado en diversos artículos y que ha sido comprobado en el laboratorio con fuentes que emiten este tipo de radiación, pero si se degrada por la exposición a la luz solar principalmente luz ultravioleta ambiental.

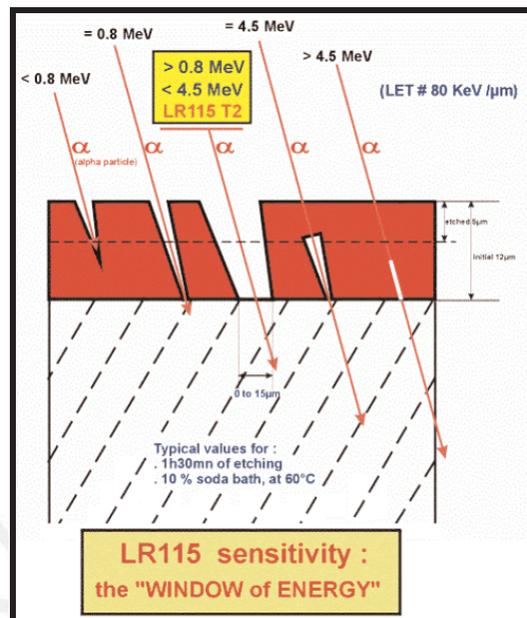


Figura 3.3: Esquema de formación de huellas en el LR-115 tipo 2 para rangos de energía [28].

Como podemos observar en la figura (3.3), la formación de la huella depende de la energía de la partícula ionizante y específicamente para energías mayores a $4,5 \text{ MeV}$ el polímero no los detectará prácticamente no habrá interacción y por tanto no habrá huella latente.

Para que la partícula sea detectada por el polímero depende mucho a que distancia decae el Radón 222, dicho esto es necesario definir una distancia mínima entre la fuente y el detector, para el Radón 222 esta distancia es 5 mm y 30 mm para el $Po 214$ respectivamente, y la distancia máxima es de 35 mm para el Radón 222 y 60 mm para el su hijo más energético $Po 214$ con energía de las partículas alfa de $7,83 \text{ MeV}$ [28], además este polímero es capaz de detectar los otros isótopos del Radón si es que se atenúa lo suficiente las partículas alfa que emiten estos y sus hijas, entrando al rango energético de detección [11]. Hay un efecto de importancia llamada efecto plateout, este efecto da cuenta de la adhesión de los productos de decaimiento en la superficie del detector, pudiendo formar huellas haciendo que el número de huellas aumente dando un error por este efecto, particularmente en el LR-115 tipo 2 este efecto es mínimo debido a que los productos de decaimiento por la regla de Geiger-Nuttal, son altamente energéticos y prácticamente las partículas alfa emitidas al decaer las hijas no interactúan porque están fuera del rango energético de detección (no se atenúan lo suficiente). Este efecto si es de consideración en otros detectores como el CR-39 ya que su rango de detección es más alto pudiendo así detectar los alfas de las hijas cuando ellas se encuentran en la superficie del detector.

3.1.1. Nivel de saturación del LR-115 tipo 2

La saturación de un detector está relacionado con la capacidad de distinguir huellas individuales, en otras palabras con la densidad de huellas máxima en la película, para el LR-115 tipo 2 este densidad máxima de saturación es de 600 *huellas/mm²* con diámetros de 5 a 15 μm que comparado con otros detectores como el CR-39 esta densidad de máxima de saturación es de 50 a 400 *huellas/mm²* con diámetros de 5 a 80 μm [28].

3.1.2. Sensibilidad del LR-115 tipo 2

La sensibilidad nos refiere que para una determinada exposición mínima de Radón 222 el polímero LR-115 tipo 2 es capaz de detectar huellas, para lo cual se define un parámetro muy importante en la dosimetría de Radón 222 el cual es la exposición total E_x dada por la siguiente relación.

$$E_x = Ct \quad (3.3)$$

Donde su unidad es $KBqh/m^3$, C concentración de Radón 222 y t es el tiempo de exposición, la máxima exposición total está en el rango de 70 $MBqh/m^3$ y el mínimo está en el rango de 2 $KBqh/m^3$, usando estos parámetros podemos estimar el tiempo que un detector debe estar expuesto.

Las incertidumbres de medida del LR-115 tipo 2 con un nivel de confianza $1 - \alpha = 2\sigma$, en la tabla que sigue, estas incertidumbres las podemos ver en % y en unidades de concentración de Radón, esta depende principalmente del tiempo de exposición, la concentración a las que estará expuesto, el tiempo de grabado y de la temperatura, ellos son los principales parámetros que contribuyen con la incertidumbre.

Tabla 3.1: Incertidumbres de medida en $\pm Bq/m^3$ y $\pm \%$ con un nivel de confianza de 2σ , donde t es el tiempo de exposición en días para diferentes concentraciones, las incertidumbres de los instrumentos de medida del Radón no deben exceder $\pm 20 \%$ [28].

t	±	±	±	±	±	±
90	8-11 17 %-21 %	12-15 12 %-15 %	24-30 6 %-8 %	34-42 4 %-5 %	38-47 4 %-5 %	45-58 3 %-4 %
75	9-19 18 %-23 %	13-16 13 %-16 %	26-33 6 %-8 %	37-46 5 %-6 %	41-52 4 %-5 %	50-64 3 %-4 %
60	10-13 21 %-26 %	15-18 15 %-18 %	29-37 7 %-9 %	41-52 5 %-6 %	46-58 5 %-6 %	50-71 4 %-5 %
45	11-15 24 %-30 %	17-21 17 %-21 %	34-42 8 %-11 %	47-60 6 %-8 %	53-67 5 %-6 %	65-82 4 %-5 %
30	15-18 29 %-37 %	21-26 21 %-26 %	41-52 10 %-13 %	58-73 7 %-9 %	65-82 6 %-8 %	80-101 5 %-7 %
15	21-26 41 %-52 %	29-37 29 %-37 %	58-73 15 %-18 %	82-104 10 %-13 %	92-116 9 %-12 %	113-142 8 %-9 %
7	30-38 60 %-76 %	43-54 43 %-54 %	85-108 21 %-27 %	120-152 15 %-19 %	134-170 13 %-17 %	165-208 11 %-14 %
	50 Bq/m^3	100 Bq/m^3	400 Bq/m^3	800 Bq/m^3	1000 Bq/m^3	1500 Bq/m^3

3.2. Equipos y materiales de laboratorio

Los equipos y materiales usados para el monitoreo de Radón 222 principalmente son, equipo de baño químico que consta de 6 compartimentos de baños termostáticos independientes, cada uno con su propio controlador de temperatura con un sensor de temperatura tipo k, Microscopio marca Leica, y los detectores nitrato de celulosa (LR-115 tipo 2)

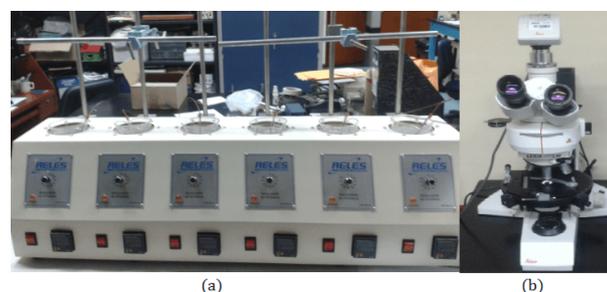


Figura 3.4: Equipos, (a) baño termostático de seis compartimentos, (b) microscopio marca Leica.

Además de ellos también se uso porta muestras, una balanza electrónica,

el hidróxido de sodio $NaOH$, agua destilada, pequeños cables de cobre, vaso de precipitado de vidrio de 140 mL Y 500mL, el laboratorio cuenta con aire acondicionado, se trabajo a determinada temperatura ambiental controlada por esta en el momento del grabado.



Figura 3.5: Equipos, (a)aire acondicionado del laboratorio de huellas nucleares, (b) vasos de precipitado.

3.3. Metodología en la toma de datos del gas Radón 222

Para este trabajo, el muestreo se realizó en el distrito de Villa el Salvador distrito que es unas de las 43 distritos de la provincia de Lima, cuya localización es, al norte limita con del distrito de San Juan de Miraflores, por el este con el distrito de Villa María del Triunfo, por el sur con el distrito de Lurin y por el oeste con el océano Pacífico y con el distrito de Chorrillos.



Figura 3.6: Ubicación del distrito de Villa el Salvador en la provincia de Lima [2].

Dado que en el monitoreo de Radón 222 la población estadística son las viviendas de Villa el Salvador, la variable a determinar es la concentración de

radón en interiores y tiene atributos cualitativos como años de construcción de la vivienda, material de construcción, número de habitantes, número de fumadores, tipo de ventilación, tipo de pintura, lugar específico de muestreo entre otros.

Examinar las concentraciones de Radón 222 en viviendas implicaría conocer exactamente el número total de viviendas y todos los atributos cualitativos de cada una, sin embargo tal como se propone es inviable porque requiere tiempo, alto presupuesto, personal y además la participación voluntaria de todos los habitantes del distrito, entonces la alternativa es medir la variable en solo un grupo de viviendas que represente a todas las viviendas, en otras palabras trabajar con una muestra estadística. Entonces la muestra elegida debe ser representativa de la población a estudiar (viviendas de Villa el Salvador), buscando que la población proporcione acceso a sus viviendas de forma voluntaria e informada, aún así no es accesible en su totalidad y solo trabajaremos sobre una parte de ella esta será la población estudiada a partir de la cual se obtiene la muestra [8].

Se selecciona un método de muestreo de tipo aleatorio, pero no fue propiamente un muestreo aleatorio simple, dado que Villa el Salvador cuenta con un área de $35,46 \text{ km}^2$ y una población de 381790 habitantes con una densidad de población de $10766,8 \text{ hab/km}^2$ [9], si hacemos un cálculo de el número de viviendas, suponiendo que cada vivienda posee 10 habitantes, se puede inferir que el número de viviendas es 37684 aproximadamente, esto nos da una idea bastante general, esta cantidad puede variar.

Entonces como el número de viviendas es muy grande se requiere de un método de muestreo adecuado, el método que mejor se acomoda para grandes cantidades es el muestreo mixto, el cual combina dos a más métodos, los métodos usados fueron muestreo por conglomerados y muestreo aleatorio estratificado, el primero de ellos consiste en dividir la población en varios grupos de características parecidas entre ellos y luego se analizan completamente a algunos los grupos, y el segundo es el muestreo aleatorio estratificado que consiste dividir la población en grupos y luego se muestra cada grupo aleatoriamente, para obtener la parte proporcional de las muestras ya elegidos.

Dado que el primer método selecciona ciertos grupos, sin embargo se tendría que analizar todos componentes de cada grupo elegido, se usa el segundo método para elegir aleatoriamente una parte representativa de él.

La toma de datos se desarrolla en el distrito de Villa el Salvador junto con algunos puntos de distritos aledaños, se elabora una grilla del distrito de Villa el Salvador, donde se dividió el mapa en cuadrados de 1 km^2 , mediante una grilla, esto siguiendo el método de conglomerados obteniéndose 34 cuadrados o áreas, cada una de las cuales en promedio posee alrededor de 2000 casas en promedio, si se asume que el número de habitantes por vivienda son 10. De los 34 cuadrados se elige al azar 15 áreas aplicando el primer método y por

el segundo método se eligió al azar en promedio una vivienda por cada cada km^2 , la distribución de los puntos (lugares representativos de cada vivienda) se puede observar en la siguiente grilla.

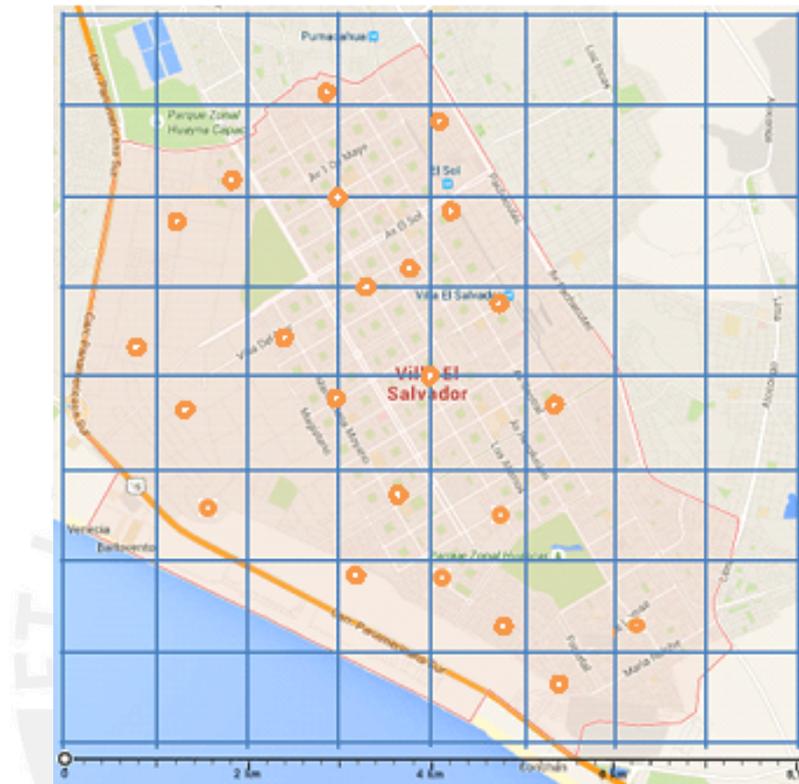


Figura 3.7: Grilla del distrito de Villa el Salvador por cada $1km^2$, puntos distribuidos en forma aleatoria.

3.4. Metodología de detección de partículas alfa provenientes del Radón 222

El procedimiento por el cual se hace posible la detección de las partículas alfa provenientes del Radón 222 (concentración de Radón 222 en el interior de viviendas) es a través de un método pasivo, detección por trazas en detectores de estado sólido (nitrato de celulosa LR-115 tipo2), la metodología que hace posible el uso de esta técnica en general es:

3.4.1. Exposición al Radón 222 ambiental

En esta primera parte de la metodología, una vez determinada la muestra, se establece el tiempo necesario para que los detectores sean expuestos al Radón 222. En este trabajo se sigue la recomendación del fabricante basado

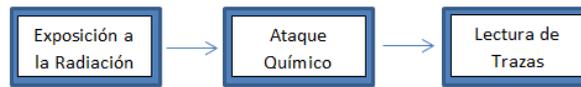


Figura 3.8: Diagrama del método de detección de partículas alfa (radiación ionizante) por trazas en sólidos.

en el cuadro de incertidumbres 3.1 el cual nos dice que dependiendo el tiempo y el nivel de concentración se puede manejar incertidumbres que estén dentro o fuera del 20 %, se elige un tiempo de muestreo de 45 días en promedio, basado en experiencias anteriores donde se midió concentraciones en tres distritos de la zona sur de Lima y se estima que cuatro periodos de monitoreo son necesarios para poder observar la variabilidad que es sabido se obtiene al medir Radón 222 para poder obtener un promedio que represente los niveles de concentración de cada vivienda, además de un promedio general de la concentración de Radón 222 en Villa el Salvador, con valores máximos y mínimos de la concentración. Antes de proceder a monitorear las viviendas elegidas, se solicita el consentimiento del responsable de cada vivienda quien manifiesta su voluntad de participar a través de una ficha en la que el mismo consigna los datos generales de la vivienda, cada uno de los cuales llena una ficha con las características propias la vivienda. También se le informa que la vivienda será reportada con códigos sólo de interés para la investigación y los resultados particulares son confidenciales.



Figura 3.9: Características de algunas viviendas de Villa el Salvador.

Como se puede observar la mayoría de viviendas son de material noble (ladrillo, cemento), sin embargo muchas de ellas están inconclusas sin acabados y por lo general muchas de ellas no están pintas por dentro.

Son dos detectores por vivienda, los cuales fueron puestos en lugares diferentes de acuerdo a la ficha, los lugares que los residentes podían elegir para colocar los detectores son: dormitorio, sala cocina baño y garaje.

Los detectores utilizados en modo desnudo, encima de una mica transparente, en donde se indica el código, fecha de inicio, hora de inicio, fecha de termino y la hora a la que recoge el detector, también el lugar don fue puesto el detector, el detector fue puesto a una altura promedio de 60cm con respecto al piso.



Figura 3.10: Detector LR-115 tipo 2 adherido sobre la pared en el interior de una vivienda.

3.4.2. Baño químico

Transcurridos los 45 días de cada periodo se procede al recojo de los detectores, son devueltos cada uno de ellos sellados dentro de un sobre de papel. Para el proceso de revelado o baño químico se prepara cada una de las muestras, cada detector se adhiere a un pequeños trozos de cable de cable que servirán como manijas, cada uno de los cuales lleva el código de cada detector.

Para el proceso de revelado o baño químico se prepara cada una de las muestras, cada detector se adhiere a pequeños trozos de cable de cable que sirven como manijas, cada uno de los cuales lleva el código de cada detector.

El siguiente paso es determinar las proporciones de agua e NaOH , que van en los vasos de precipitado, en un vaso de precipitado de 500mL , se vierte en promedio 200mL de agua que sera el medio termostático y en el vaso de precipitado de 140mL se vierte un promedio de 80mL de NaOH con una normalidad de $2,5\text{N}$, seguidamente se introduce el segundo vaso en el primer vaso, conteniendo así ellos al otro, de esta forma se introduce en cada baño independiente, 6 arreglos del mismo modo Figura (3.11).

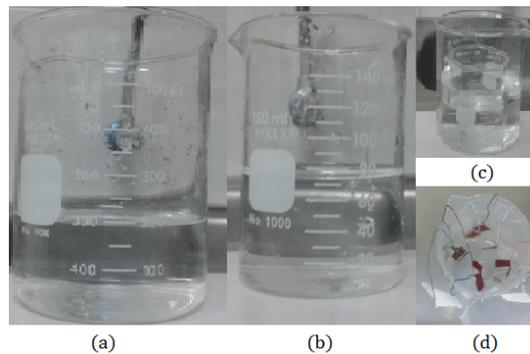


Figura 3.11: (a) Volumen de agua 200 mL, (b) volumen de $NaOH$ 80 mL, (c) Arreglo de vasos como van en los baños, (d) detectores preparados listos para ser grabados

Luego se enciende el aire acondicionado manteniendo una temperatura de $25^{\circ}C$, se espera alrededor de 30 minutos para encender el baño, todos los controladores deben estar fijados a una temperatura de $60^{\circ}C$ temperatura a la cual se realiza el grabado químico, el tiempo necesario para que llegue a estabilizarse a esa temperatura es de una hora aproximadamente, luego del cual se procede a sumergir cada detector en el baño en promedio 6 detectores por baño. El tiempo que dura el ataque químico es de 90 minutos. Seguidamente se extraen los detectores para someterlos al enjuague.

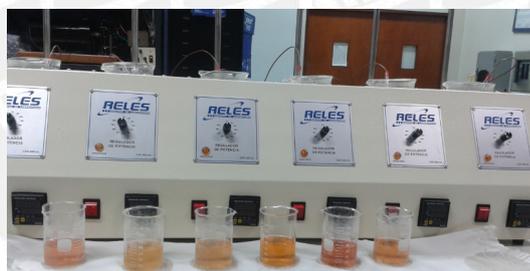


Figura 3.12: $NaOH$ coloreado debido a la degradación del nitrato de celulosa.

Aquí un ejemplo que para diferentes tiempos de grabado se puede obtener diferentes tonalidades del $NaOH$, esto debido a que a mayor tiempo de grabado el polímero se degradara más y a menor tiempo se degradara en menor medida, de aquí la importancia de controlar el tiempo de grabado, si le damos demasiado tiempo al grabado es posible que el polímero sea completamente degradado llevándose con ella las huellas dejadas por las partículas alfa, de igual forma sucede con la temperatura. Los polímeros extraídos del proceso de grabado se sumergen en agua destilada por un tiempo de 30 minutos, luego se les enjuagan una vez más con agua destilada a chorros varias veces, este proceso se realiza hasta neutralizar los polímeros, luego del cual se les dejará a secar por un periodo mínimo de 24 horas.

3.4.3. Lectura de trazas por microscopio óptico

Una vez transcurrido el tiempo de secado, se procede a preparar los detectores para su lectura, en un porta muestras estándar se adhieren dos detectores cada uno con su código. Luego se ajusta el microscopio para realizar la lectura, con un campo de visión de $X10$.

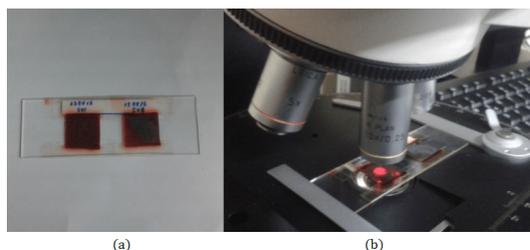


Figura 3.13: (a) Detectores preparados en un porta muestras, (b) lectura del detector.

La lectura que se hace es en forma manual mediante un microscopio óptico, para realizar la lectura se elige cinco campos que sean representativos del detector, cada una de los cuales es contado 5 veces, en total por detector se cuenta 25 veces, esto para observar la repetibilidad del conteo.

Luego de lo cual se calcula la densidad de huellas, seguidamente se calcula la concentración de Radón 222 mediante un factor de calibración. Para anteriores trabajos se usó 20.41 Bq/m^3 para una densidad de 1 huella/mm^2 relación que no posee la unidad de tiempo [34]; la E_c (2.33) exige tal parámetro, se comparó los resultados dados por este factor de calibración con los resultados del factor de calibración $8,3 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Huellas/mm}^2}{\text{Bqh/m}^3}$ [11] y además de ello se compara con el factor calibración que se obtiene en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), trabajo realizado por miembros del grupo GITHUNU-PUCP [Apéndice A].



Figura 3.14: Campos de conteo del detector LR-115.

Aquí una muestra de las huellas observadas por el microscopio óptico, las manchas observadas se deben a que el grabado no siempre es uniforme también tiene que ver con una adecuada la calidad de enjuague, pero se puede observar las huellas claramente, son los puntos más claros (color blanco) estos son resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

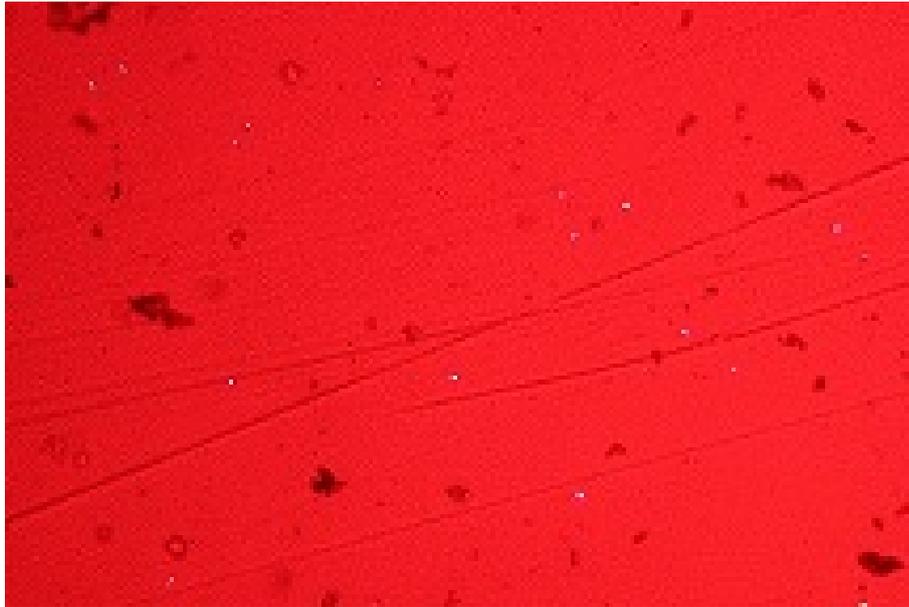


Figura 3.15: Huellas debido a la desintegración de Radón 222, dejadas por las partículas alfa.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Resultados de las mediciones en el año 2014

En el año 2014 se inició el muestreo de Radón 222 en tres distritos de la zona sur de Lima, Villa el Salvador, San Juan de Miraflores y Villa María del Triunfo, el muestreo se realizó por un periodo de 8 semanas, cuyos resultados son los siguientes.

Tabla 4.1: Concentración de Rn 222 en los distritos de San Juan de Miraflores (SJM), Villa el Salvador (VES), Villa María del Triunfo (VMT).

Posiciones	Densidad (huellas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)
SJM 1	1,5 ± 0,5	136,1 ± 21,8
SJM 2	1,8 ± 0,4	161,6 ± 25,9
SJM 3	1,4 ± 0,6	127,6 ± 20,4
SJM 4	1,5 ± 0,4	131,8 ± 21,1
SJM 5	1,9 ± 0,2	170,1 ± 27,2
SJM 6	1,6 ± 0,1	140,3 ± 22,4
VES 1	1,3 ± 0,5	119,0 ± 19,0
VES 2	1,2 ± 0,3	106,3 ± 17,0
VMT 1	2,8 ± 0,8	246,6 ± 39,5
VMT 2	1,5 ± 0,3	136,1 ± 21,8
VMT 3	3,3 ± 0,5	239,4 ± 46,9
VMT 4	1,2 ± 0,4	106,3 ± 17,0

Se encuentra que hay una tendencia marcada en que las concentraciones mayores, se encuentran en el distrito de Villa María del Triunfo, específicamente en cuatro viviendas de Nueva Esperanza, un lugar al pie de las faldas de cerros que se alzan en ese lugar, de igual forma en el distrito de San Juan de Miraflores, se observa concentraciones moderadas que exceden los 148 Bq/m³, en

el distrito de Villa el Salvador se encuentra concentraciones mas bajas que las anteriores, a continuación se muestra el máximo y mínimo de concentraciones.

Tabla 4.2: Concentraciones de Rn 222 máximas y mínimas.

Concentración	Máximo (VMT 2)	Mínimo (VES 2)
(Bq/m^3)	$293,4 \pm 49,9$	$106,3 \pm 18,1$

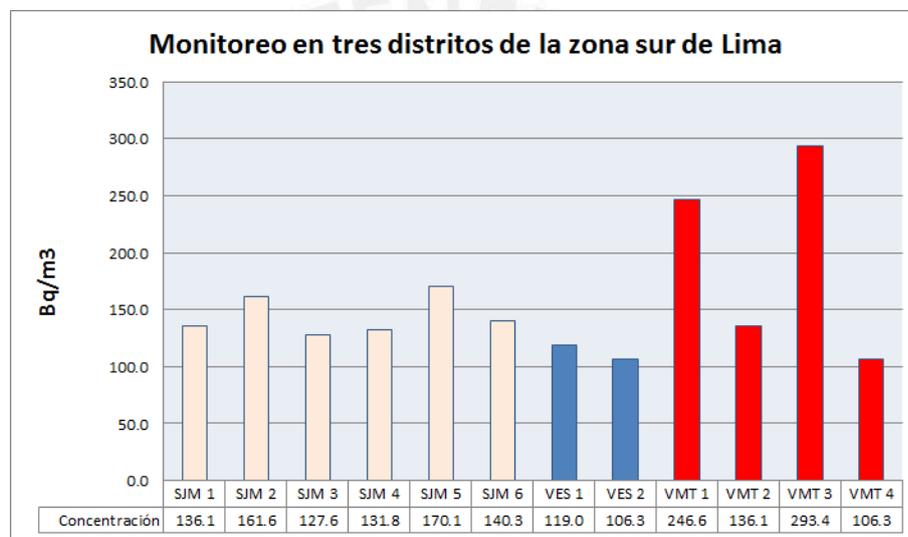


Figura 4.1: Resultados de la medición de las concentraciones de Rn 222, hecha en tres distritos del sur de Lima.

En el histograma de colores, el color crema representa las concentraciones encontradas en el distrito de San Juan de Miraflores, azul en Villa el Salvador y el rojo en Villa María del Triunfo. Cabe mencionar que esta primera medición se realizó de forma aleatoria sin seguir una grilla, porque el objetivo fue estimar las concentraciones de Radón de 222 en forma general de estos distritos donde los códigos, SJM1, VES1, VTM1, etc, representan a cada vivienda.

4.2. Resultados de las mediciones en el 2015

4.2.1. Primer periodo 2015

Como primer periodo de medición del 2015 refiere a un conjunto de viviendas en el distrito de Villa el Salvador, seleccionadas de acuerdo al procedimiento estadístico explicado en la sección (3.3.), el tiempo de medición es en promedio de 45 días y en cada una de las viviendas se midió en dos ambientes diferentes A y B ¹, elegidos por los propios residentes, como por ejemplo, un dormitorio, sala, comedor, cocina baño, sótano etc, en las cuales se puso un detector por ambiente seleccionado. En principio se distribuyó detectores para 28 viviendas, sabiendo que en el transcurso de las mediciones un alto porcentaje de ellos pueden ser perdidos (DP) o no colocados correctamente, efectivamente esto sucede en este periodo, quedando así en promedio 15 casas que fueron monitoreadas de acuerdo a lo planificado.

Tabla 4.3: Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) primer periodo.

Posiciones	Densidad A (huellas/mm ²)	Concentración en A (Bq/m ³)	Densidad B (huellas/mm ²)	Concentración en B (Bq/m ³)
P1	0,7 ± 0,5	69,3 ± 12,5	1,0 ± 0,6	97,1 ± 17,5
P2	1,8 ± 0,7	182,2 ± 32,8	1,8 ± 0,7	181,9 ± 32,7
P3	1,1 ± 0,3	109,4 ± 19,7	1,0 ± 0,3	103,0 ± 18,5
P4	0,9 ± 0,2	89,2 ± 16,1	1,8 ± 0,5	176,1 ± 31,7
P5	0,2 ± 0,1	23,7 ± 4,3	0,5 ± 0,3	51,4 ± 9,3
P6	–	DP	0,3 ± 0,2	34,3 ± 6,2
P7	0,4 ± 0,2	44,6 ± 8,0	0,6 ± 0,3	60,2 ± 10,8
P8	0,4 ± 0,3	45,5 ± 8,2	0,6 ± 0,3	62,2 ± 11,2
P9	0,8 ± 0,3	80,4 ± 14,5	0,9 ± 0,6	95,2 ± 17,1
P10	0,3 ± 0,1	149,0 ± 26,8	1,4 ± 0,4	35,3 ± 6,4
P11	0,3 ± 0,3	37,1 ± 6,7	0,6 ± 0,3	61,1 ± 11,0
P12	0,6 ± 0,2	60,8 ± 11,0	0,5 ± 0,2	51,5 ± 9,3
P13	0,4 ± 0,2	36,8 ± 6,6	–	DP
P14	–	DP	–	DP
P15	2,1 ± 0,5	258,4 ± 46,5	2,4 ± 0,4	121,9 ± 22,0
P16	–	DP	–	DP
P17	0,8 ± 0,4	86,8 ± 15,6	1,1 ± 0,3	114,5 ± 20,6
P18	1,0 ± 0,2	109,9 ± 19,8	1,2 ± 1,0	129,7 ± 23,3

¹A y B = Ambientes diferentes elegidos por los propios residentes en cada una de sus residencias, donde fueron puestos los detectores.

También podemos observar los máximos y mínimos encontrados en la medición realizada, cuyo máximo corresponde a la posición *P15 A*, con $258,4 Bq/m^3$, y el mínimo corresponde a la posición *P5 A*, con $23,7 Bq/m^3$.

Tabla 4.4: Máximo y mínimo del primer periodo de monitoreo en el (VES).

Máximo (Bq/m^3)	Mínimo (Bq/m^3)
$258,4 \pm 43,9$	$23,7 \pm 5,9$

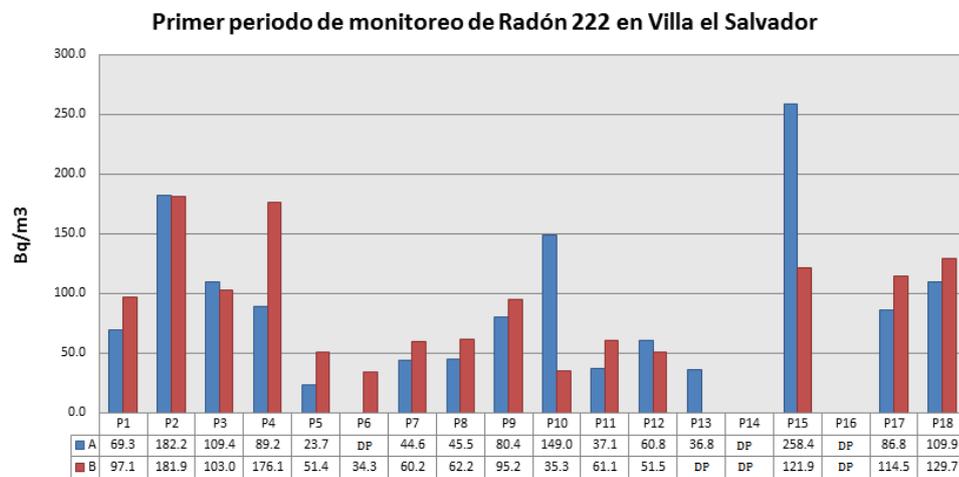


Figura 4.2: Resultados del primer periodo 2015.

A continuación se muestra un histograma de resultados de dichas medidas, en el cual muchos de los detectores se perdieron, DP^2 pero en posteriores medidas se pudo recuperar las medidas en esos puntos.

4.2.2. Segundo periodo 2015

En el segundo periodo se obtuvo una menor cantidad de puntos, se perdieron varios detectores DP , por lo cual en el siguiente periodo se propuso monitorear viviendas nuevas para suplir las perdida de datos.

Los datos muestran grandes diferencias a pesar que la medición se hizo en la misma vivienda para cada caso, dando muestra de como las concentraciones de Radón 222 depende mucho de la geometría del recinto, el número de ventanas, la frecuencia que se deja abierta las ventanas, ventilación principalmente, entonces la medición de Radón 222 esta sujeta a muchas variables que no podemos controlar, haciendo que exista esta variabilidad vista en los datos experimentales . La estación en la que se desarrollo este segundo monitoreo fue primavera, también se debe tomar en cuenta que hay una diferencia de

²DP = Detector perdido

2 a 3 días en la medición entre grupos de detectores, esto debido al horario de distribución de detectores, se debe tener en cuenta además, los detectores fueron puestos a una altura promedio de 1,60 *cm*, donde cada residente puso el detector en los lugares que eligieron A y B. También cabe mencionar que las incertidumbres están asociadas a las concentraciones encontradas y al tiempo que los detectores estuvieron expuestos.

Tabla 4.5: Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) segundo periodo.

Posiciones	Densidad A (<i>huellas/mm²</i>)	Concentración en A (<i>Bq/m³</i>)	Densidad B (<i>huellas/mm²</i>)	Concentración en B (<i>Bq/m³</i>)
P1	–	<i>DP</i>	–	<i>DP</i>
P2	1,9 ± 0,7	184,8 ± 31,4	0,7 ± 0,2	70,0 ± 11,9
P3	0,7 ± 0,4	70,0 ± 11,9	1,2 ± 0,2	121,4 ± 20,6
P4	1,4 ± 0,6	138,2 ± 23,5	–	<i>DP</i>
P5	1,4 ± 0,7	139,1 ± 23,6	1,6 ± 0,2	158,7 ± 27,0
P6	0,4 ± 0,3	42,0 ± 7,1	0,2 ± 0,2	18,7 ± 3,7
P7	0,5 ± 0,2	45,7 ± 7,8	0,6 ± 0,1	56,0 ± 9,5
P8	–	<i>DP</i>	–	<i>DP</i>
P9	0,7 ± 0,3	67,2 ± 11,4	1,5 ± 0,1	149,4 ± 25,4
P10	0,8 ± 0,5	83,1 ± 14,1	0,4 ± 0,2	37,3 ± 6,3
P11	–	39,2 ± 6,7	–	<i>DP</i>
P12	0,5 ± 0,3	48,5 ± 8,3	0,2 ± 0,1	23,3 ± 4,7
P13	–	<i>DP</i>	–	<i>DP</i>
P14	–	<i>DP</i>	–	<i>DP</i>
P15	–	<i>DP</i>	–	<i>DP</i>
P16	0,4 ± 0,2	36,4 ± 6,2	0,1 ± 0,1	14,0 ± 2,8
P17	0,8 ± 0,4	80,3 ± 13,6	1,1 ± 0,1	112,0 ± 19,0
P18	0,4 ± 0,1	39,2 ± 6,7	1,1 ± 0,1	112,0 ± 19,0

El máximos corresponde a la posición *P2* A, con 184,8 *Bq/m³*, y el mínimo corresponde a la posición *P5* B con 14,0 *Bq/m³*. El máximo valor esta por encima de encima de 148 *Bq/m³* y por debajo de los 200 *Bq/m³*, según las recomendaciones de la OMS y la EPA.

Tabla 4.6: Máximo y mínimo del segundo periodo de monitoreo en el (VES).

Máximo (<i>Bq/m³</i>)	Mínimo (<i>Bq/m³</i>)
184,8 ± 31,4	14,0 ± 3,6

Podemos observar concentraciones de Radón 222 de la segunda medición, donde para cada par de barras, representa medidas hechas en cada vivienda en ambientes diferentes, habiendo gran variabilidad entre los resultados de la primera y segunda medida. A medida que se mida en los periodos siguientes, observaremos que esta variabilidad tenderá a un promedio, el cual buscamos medir, ya que una persona puede estar expuesto a altas concentraciones por un corto periodo, sin embargo el riesgo estocástico es menor que estar expuesto a periodos largos a concentraciones no tan altas.

Segundo periodo de monitoreo de Radón 222 en Villa el Salvador

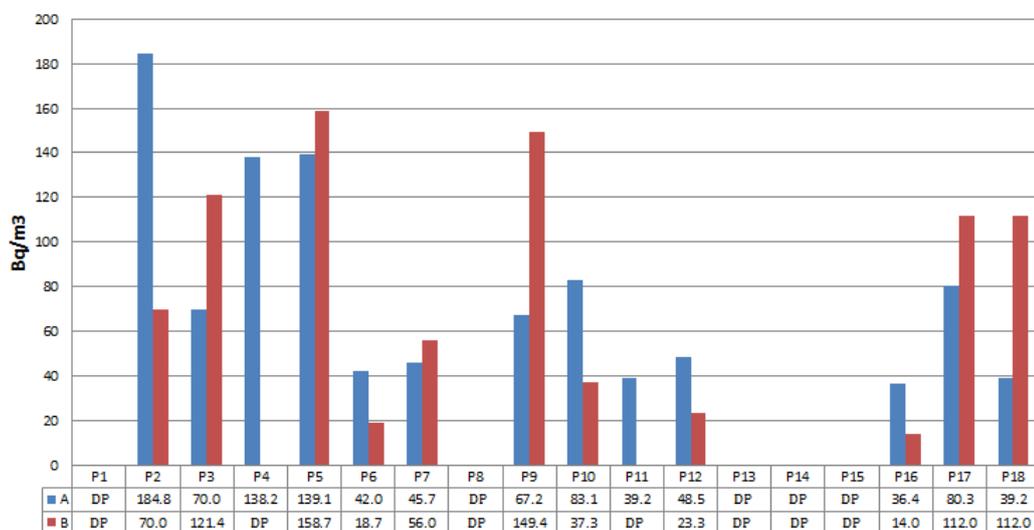


Figura 4.3: Resultados del segundo periodo 2015.

4.2.3. Tercer periodo 2015

Durante el desarrollo de la medición de Radón 222, la pérdida de detectores fue bastante significativa y algunos puntos dejaron de medirse, se tuvo que hacer medidas en nuevos puntos, como ya se menciona, para encontrar un mejor promedio a las variabilidades encontradas en el distrito de Villa el Salvador. Con el fin de hacer la medición de Radón 222 más representativa del distrito, se escogió nuevos lugares donde llevar a cabo la medición, se eligió zonas donde no se había llegado en las anteriores mediciones. El tercer monitoreo se desarrolló en el verano, con los nuevos puntos seleccionados al azar en determinada zona.

Se encuentra un máximo en la posición P5 que excede los 200 Bq/m^3 [32] límite recomendable por la OMS, pero hay una flexibilidad entre los 100 Bq/m^3 y 300 Bq/m^3 y además excede lo recomendado por la EPA 148 Bq/m^3 [38], la mínima de concentración encontrada es en la posición P21.

Tabla 4.7: Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) tercer periodo.

Posiciones	Densidad A (huellas/mm ²)	Concentración en A (Bq/m ³)	Densidad B (huellas/mm ²)	Concentración en B (Bq/m ³)
P1	–	DP	–	DP
P2	–	DP	–	DP
P3	0,8 ± 0,3	78,4 ± 14,1	1,1 ± 0,5	114,3 ± 20,6
P4	0,9 ± 0,2	93,0 ± 16,7	1,2 ± 0,6	123,9 ± 22,3
P5	2,1 ± 0,5	215,0 ± 38,7	0,2 ± 0,1	DP
P6	–	DP	0,2 ± 0,1	18,4 ± 3,7
P7	0,8 ± 0,3	80,4 ± 14,5	0,5 ± 0,2	54,2 ± 9,8
P8	0,7 ± 0,3	73,6 ± 13,2	–	DP
P9	–	DP	0,8 ± 0,4	83,3 ± 15,0
P10	0,7 ± 0,4	68,7 ± 12,4	0,2 ± 0,2	18,4 ± 3,3
P11	0,4 ± 0,3	42,6 ± 7,7	0,6 ± 0,2	60,0 ± 10,8
P12	1,1 ± 0,3	107,5 ± 19,3	1,2 ± 0,5	123,0 ± 22,1
P13	0,5 ± 0,2	46,5 ± 9,3	1,0 ± 0,4	96,8 ± 17,4
P14	0,1 ± 0,1	9,4 ± 1,9	0,5 ± 0,3	54,2 ± 9,8
P15	1,1 ± 0,2	110,4 ± 19,9	1,7 ± 0,4	170,4 ± 30,7
P16	–	DP	–	DP
P17	1,2 ± 0,3	117,2 ± 21,1	0,6 ± 0,2	62,9 ± 11,3
P18	0,7 ± 0,4	72,6 ± 13,1	1,2 ± 0,2	118,1 ± 21,3
P19	0,2 ± 0,1	22,3 ± 4,5	0,4 ± 0,3	38,7 ± 7,0
P20	1,1 ± 0,3	109,4 ± 19,7	0,5 ± 0,2	51,3 ± 9,2
P21	0,1 ± 0,1	10,2 ± 2,0	0,1 ± 0,1	4,5 ± 1,2
P22	0,2 ± 0,1	17,4 ± 3,5	0,2 ± 0,1	20,3 ± 4,1
P23	–	DP	0,4 ± 0,2	36,2 ± 7,2

Tabla 4.8: Máximo y mínimo del tercer periodo de monitoreo en el (VES).

Máximo (Bq/m ³)	Mínimo (Bq/m ³)
215,0 ± 38,7	4,5 ± 1,2

En el tercer periodo, se aprecia una mayor cantidad de puntos de medición, desde la posición P1 hasta la posición P23, pero como es parte del trabajo de campo algunos detectores también se extraviaron.

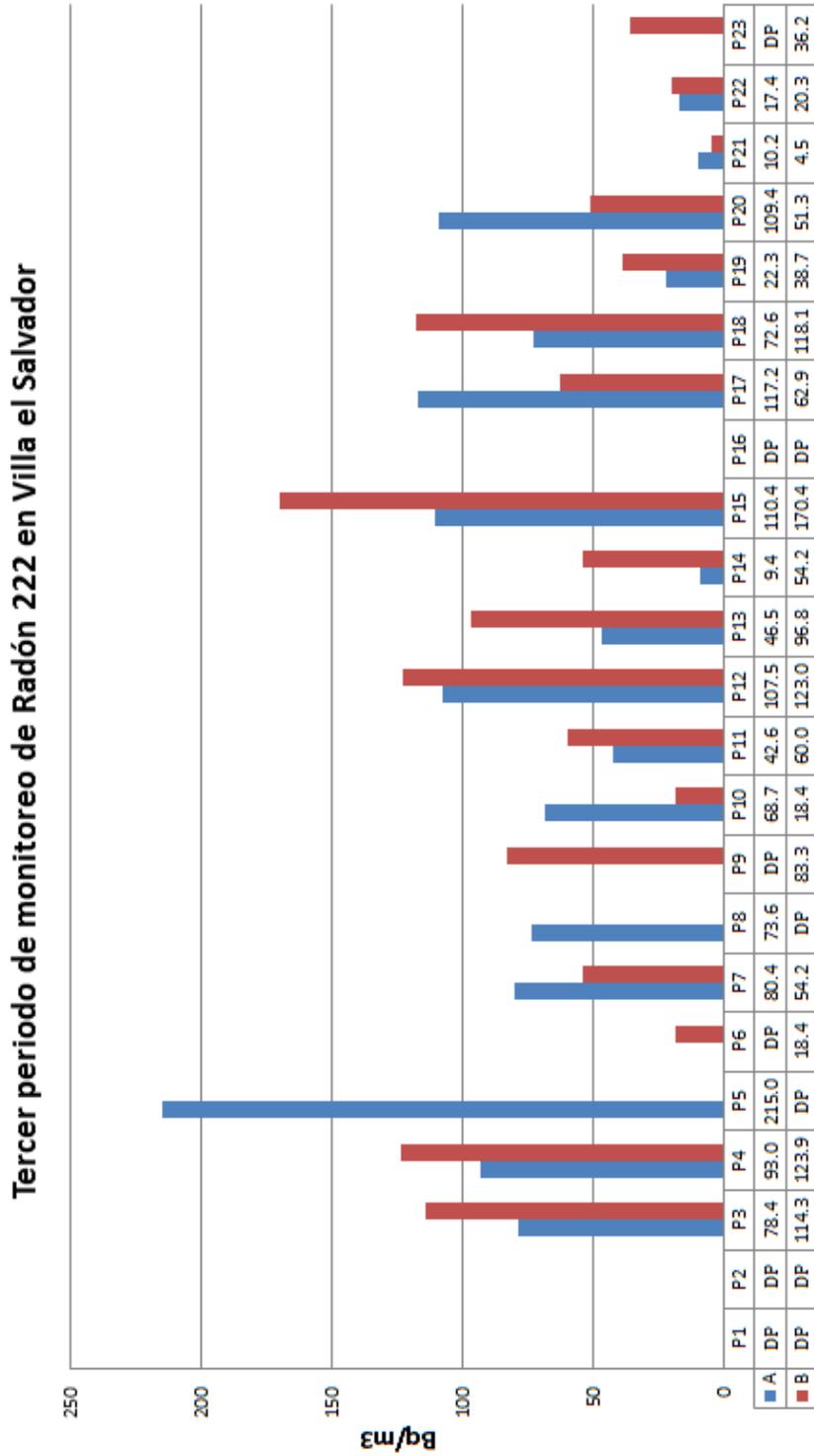


Figura 4.4: Resultados del tercer periodo 2015

4.2.4. Resultados generales de la medición de Radón 222 en los tres periodos 2015

Tabla 4.9: Resultado de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) de los tres periodos en las posiciones A y B.

Posiciones	Concentración A (Bq/m^3)	Concentración B (Bq/m^3)
P1	69,3 ± 12,5	97,1 ± 5,8
P2	183,5 ± 22,8	125,9 ± 81,0
P3	86,0 ± 22,6	112,9 ± 14,8
P4	106,8 ± 29,4	150,0 ± 41,7
P5	125,9 ± 97,5	105,1 ± 77,2
P6	42,0 ± 7,1	23,8 ± 9,5
P7	56,9 ± 21,2	56,8 ± 6,6
P8	59,5 ± 13,2	62,2 ± 11,2
P9	73,8 ± 13,1	109,3 ± 37,0
P10	100,3 ± 44,2	30,4 ± 10,9
P11	39,6 ± 4,9	60,5 ± 7,7
P12	72,3 ± 32,1	65,9 ± 52,0
P13	41,6 ± 8,9	96,8 ± 17,4
P14	9,4 ± 1,9	54,2 ± 9,8
P15	184,4 ± 107,6	146,2 ± 39,1
P16	36,4 ± 6,2	14,0 ± 2,8
P17	94,7 ± 22,0	96,5 ± 30,8
P18	73,9 ± 36,3	119,9 ±
P19	22,3 ± 4,5	38,7 ± 7,0
P20	109,4 ± 19,7	51,3 ± 9,2
P21	10,2 ± 2,0	4,5 ± 1,2
P22	17,4 ± 3,5	20,3 ± 4,1
P23	<i>DP</i>	36,2 ± 7,2

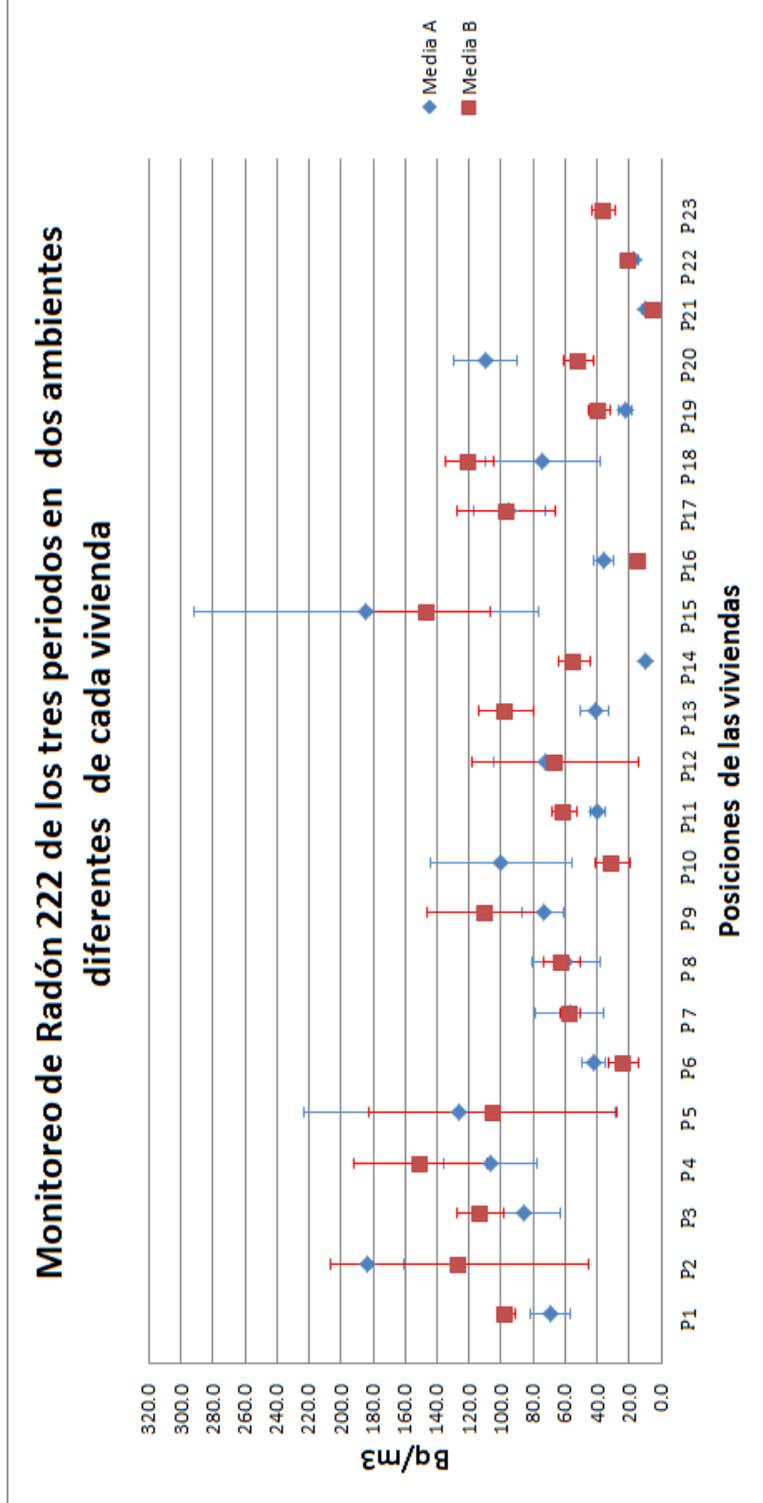


Figura 4.5: Promedios en las posiciones A y B por cada vivienda.

Tabla 4.10: Resultado de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) de los tres periodos en cada posición.

Posición	Concentración (Bq/m^3)
P1	$83,2 \pm 6,9$
P2	$154,7 \pm 42,1$
P3	$99,4 \pm 113,5$
P4	$128,4 \pm 25,5$
P5	$115,5 \pm 62,2$
P6	$32,9 \pm 5,9$
P7	$56,9 \pm 11,1$
P8	$60,9 \pm 12,0$
P9	$91,5 \pm 19,6$
P10	$65,3 \pm 22,8$
P11	$50,1 \pm 4,6$
P12	$69,1 \pm 30,6$
P13	$69,2 \pm 9,8$
P14	$31,8 \pm 5,0$
P15	$165,3 \pm 57,3$
P16	$25,2 \pm 3,4$
P17	$95,6 \pm 18,9$
P18	$96,9 \pm 19,7$
P19	$30,5 \pm 4,1$
P20	$80,4 \pm 10,9$
P21	$7,3 \pm 1,1$
P22	$18,8 \pm 2,7$
P23	$36,2 \pm 7,2$

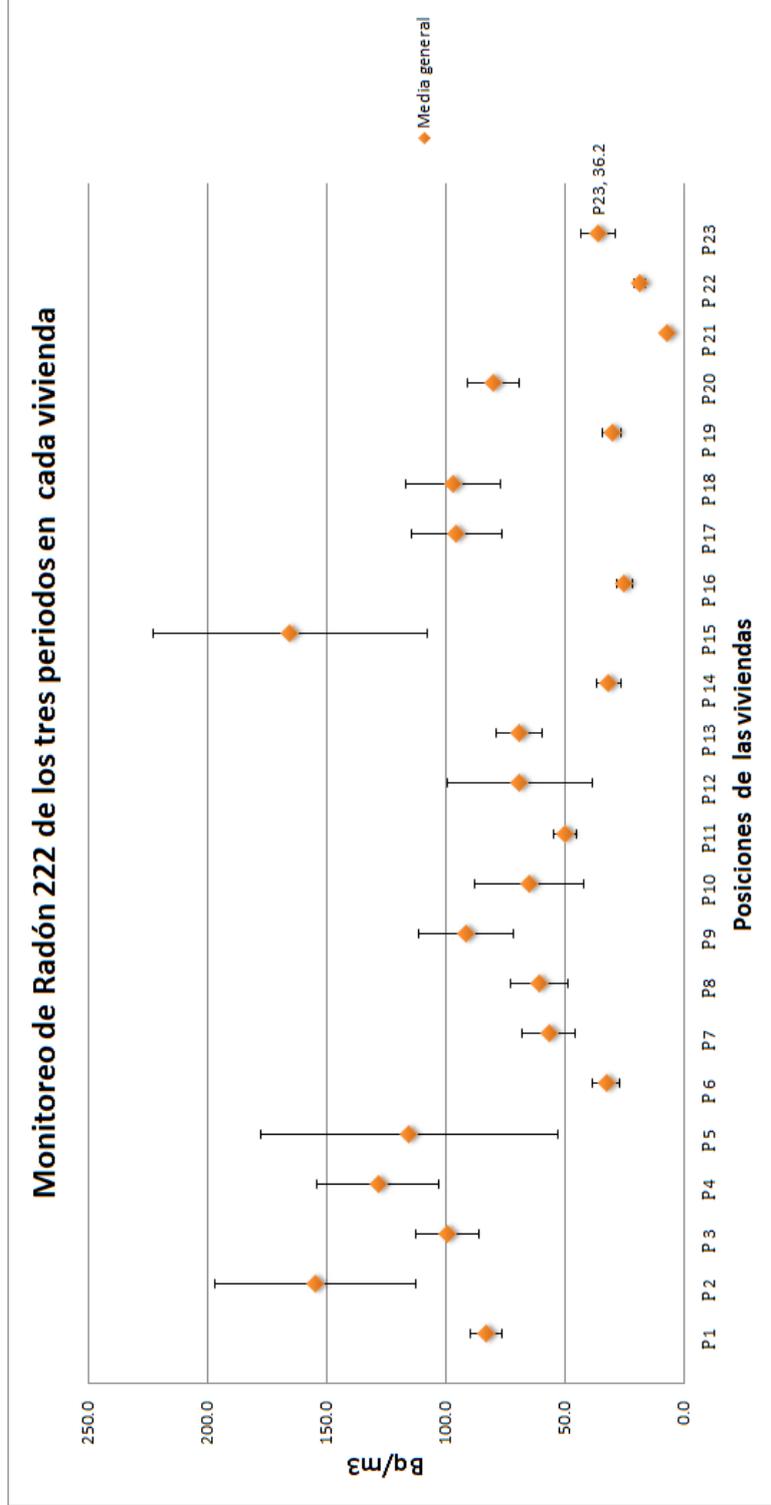


Figura 4.6: Promedio de las concentraciones de Radón 222 en cada vivienda monitoreada durante los tres periodos.

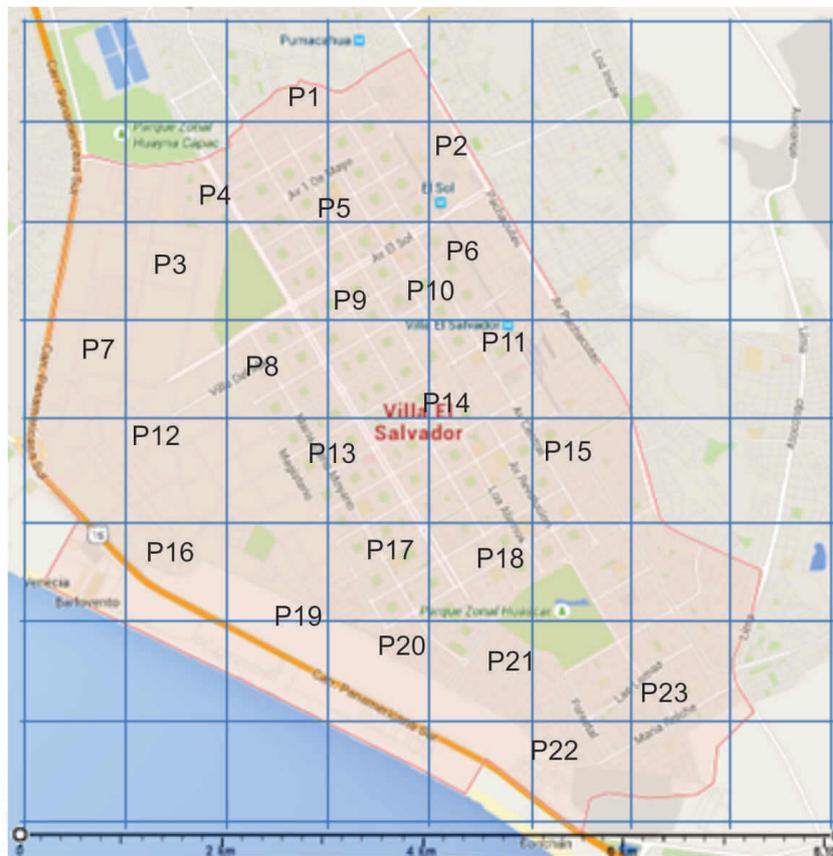


Figura 4.7: Puntos de medición en el distrito de Villa el Salvador.

4.3. Resultados de la medición de Radón 222 por un periodo de un año

Además de las mediciones antes reportadas, se realizó un estudio adicional considerando el riesgo que el detector no responda correctamente a un tiempo extremo de exposición o sufra deterioro por el UV ambiental.

La justificación de este último grupo de medidas es la gran variabilidad observada en las medidas hechas en diferentes periodos del año, esto a los cambios de los parámetros estacionales, sobre todo el de temperatura. Se plantea como hipótesis, si aumenta el periodo de medición a un año, dicha variabilidad en las concentraciones de Radón 222 debe tender a disminuir y esperar que el resultado sea más representativo de las variabilidades encontradas, un promedio de concentración, en cada vivienda. Y teniendo en cuenta que esta media o promedio es un parámetro importante por el hecho de que una persona expuesta en promedio, a altas concentraciones de radón en un corto periodo de tiempo tiene menos probabilidades de sufrir efectos debido a esta, que una

persona que esta expuesta en promedio a menores concentraciones pero por un periodo bastante largo.

Las mediciones se realizaron en tres lugares, se mide en una vivienda donde el detector fue puesto en una cochera colindante a una habitación *COCH1*, el segundo detector fue puesto en un puesto de mercado, lugar de trabajo *MER1* y el tercer punto de medida también en un puesto mercado *MER2*, cuya característica es que es mucho más cerrado que el lugar de trabajo *MER1*.

Tabla 4.11: Resultados de la medición por un periodo de un año consecutivo.

COCH1 (Bq/m^3)	MER1 (Bq/m^3)	MER2 (Bq/m^3)
91,1 ± 15,5	46,2 ± 8,8	65,6 ± 11,8

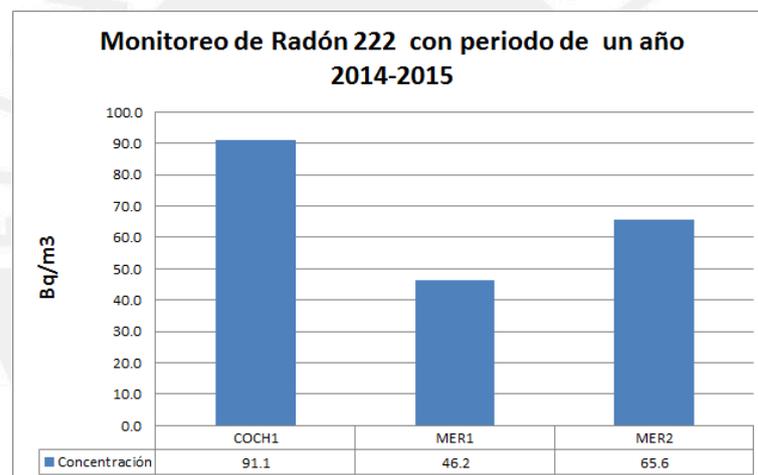


Figura 4.8: Tres lugares elegidos, donde se realizó el medición de Rn 222 por un periodo de un año.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

Las diferencias encontradas en las concentraciones de Radón 222 se deben básicamente a los materiales de construcción, al tamaño de las habitaciones, a la ventilación, al diseño de las viviendas, también influye el lugar donde está construida cada una de las viviendas, la geología del suelo y los parámetros extensivos, temperatura, presión, humedad, la contaminación ambiental, presencia de químicos y por supuesto los aerosoles. Todos estos parámetros se ven reflejados en la variabilidad que se encuentra al detectar el Radón 222, de todos ellos el parámetro ventilación es el más importante.

Los distritos donde fueron realizados los primeros estudios mostraron una significativa diferencia en las concentraciones de Radón 222, motivando nuestro interés de monitorear el distrito de Villa María del Triunfo. El distrito de San Juan de Miraflores mostró más uniformidad en las concentraciones y el distrito de Villa el Salvador concentraciones menores, sin embargo para los dos primeros distritos es conveniente que se realicen muchas más medidas para ver la variabilidad que es común en la detección del Radón 222.

En el distrito de Villa el Salvador se encuentran concentraciones bajas que son las permisibles según las organizaciones internacionales, sin embargo hay algunos puntos donde se observa un promedio más elevado que el que recomienda la EPA [38] un límite de 148 Bq/m^3 , entonces es recomendable seguir el monitoreo en esos puntos.

En el estudio de las concentraciones de Radón 222 se muestra un promedio en dos ambientes diferentes de una misma vivienda, mostrando incluso que si se mide en la misma vivienda existen diferencias significativas.

Muchas de las viviendas donde se llevo a cabo la medición no contaban con recubrimiento en las paredes, sin embargo la ventilación por ventanas era bastante buena. Pero es recomendable pintar las paredes y refaccionar los pisos.

Algunas de las viviendas en estudio están construidas con madera, triplay,

techos de calamina, en dichas viviendas se encontró concentraciones bajas, esto debido a que por lo general estas viviendas tienen muy buena ventilación y no presentan materiales de construcción a excepción del piso.

Los resultados muestran que en la mayoría de los casos se encuentran menores concentraciones en lugares abiertos como puestos de mercado que en las habitaciones de las viviendas.

El detector puede ser expuesto por largos periodos, sin embargo se debe colocar en un lugar donde la luz del sol no incida sobre el detector (para evitar el UV ambiental). Sin embargo, es recomendable que no se exponga por largos periodos ya que el polímero se puede maltratar; si se va a realizar medidas de largos periodos tomar las medidas del caso y guiarse de la tabla (3.1).



Bibliografía

- [1] Instituto Peruano de Energía nuclear IPEN, Reglamento de seguridad radiológica. http://www.ipen.gob.pe/site/regulacion/normatividad/ds009_97em.pdf. Accessed:2016-02-27.
- [2] Map of Lima highlighting Villa el Salvador. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Map_of_Lima_highlighting_Villa_el_Salvador.PNG. Accessed:2016-01-14.
- [3] Radon Movement. <http://integratedcleanair.com/radon/stalking-the-silent-killer/>. Accessed:2016-01-14.
- [4] Simple ionization energy in coated electrode welding. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242013000100010. Accessed:2016-01-14.
- [5] The Guide to Protecting Yourself an Your Family from Radon. http://www.epa.gov/sites/production/files/2016-02/documents/2012_a_citizens_guide_to_radon.pdf. Accessed:2015-10-14.
- [6] Marcelo Alonso and Edward J Finn. Física. fundamentos cuánticos y estadísticos. Vol. III. Editorial Fondo educativo interamericano, 1986.
- [7] Carl Bromberg, Thomas Ferbel, and Ashok Das. *Introduction to nuclear and particle physics*. World Scientific, 2006.
- [8] Jordi Casal and Enric Mateu. Tipos de muestreo. *Rev. Epidem. Med. Prev*, 1(1):3–7, 2003.
- [9] Instituto Nacional de Estadística e Informática. Capítulo 1: Características de la población. *Perfil sociodemográfico del Perú. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*, 2008.
- [10] Saeed A Durrani and Radomir Ilic. *Radon measurements by etched track detectors: applications in radiation protection, earth sciences and the environment*. World Scientific, 1997.
- [11] KP Eappen and YS Mayya. Calibration factors for Ir-115 (type-ii) based radon thoron discriminating dosimeter. *Radiation Measurements*, 38(1):5–17, 2004.

- [12] Lewis Richard Benjamin Elton and Javier Sesma. *Introducción a la teoría nuclear*. Rialp, 1964.
- [13] Guillermo Espinosa. *Trazas nucleares en sólidos*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1994.
- [14] RL Fleischer, CW Naeser, PB Price, RM Walker, and Ursula B Marvin. Fossil particle tracks and uranium distributions in minerals of the vaca muerta meteorite. *Science*, 148(3670):629–632, 1965.
- [15] Robert Louis Fleischer, Paul Buford Price, and Robert M Walker. *Nuclear tracks in solids: principles and applications*. Univ of California Press, 1975.
- [16] George Gamow. Zur quantentheorie des atomkernes. *Zeitschrift für Physik*, 51(3-4):204–212, 1928.
- [17] Victor Moritz Goldschmidt. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. the seventh hugo müller lecture, delivered before the chemical society on march 17th, 1937. *Journal of the Chemical Society (Resumed)*, pages 655–673, 1937.
- [18] RW Gurney and EU Condon. Quantum mechanics and radioactive disintegration. *Physical Review*, 33(2):127, 1929.
- [19] Protection Against ICRP. Radon-222 at home and at work. *ICRP Publication*, 65, 1993.
- [20] Dadong Iskandar, Takao Iida, and Shiro Nakashima. Determination of ^{222}Rn diffusion coefficient in japanese soils. In *Proceedings of 10th International Congress of the International Radiation Protection Association, Hiroshima, Japan*, pages 14–19. Citeseer, 2000.
- [21] AM Ismail, KM Abumurad, MK Kullab, and BA Al-Bataina. Measurement of Rn-222 concentrations in building materials used in jordan. *MUTAH JOURNAL OF RESEARCH AND STUDIES NATURAL AND APPLIED SCIENCES SERIES*, 11:201–216, 1996.
- [22] Martin Jiranek. Diffusive and convective transport of radon through cracks in the building understructure. In *Radon Investigations in the Czech Republic VIII and the Fifth International Workshop on the Geological Aspects of Radon Risk Mapping*, page 65. Czech Geological Survey, 2000.
- [23] Martin Jiranek and Zbynek Svoboda. Verification of radon protective measures by means of a computer model. *Proceedings Building Simulations*, 97:165–172, 1997.
- [24] UNFV. Josue. Olortegui Obregon, Físico Medico. Radiaciones ionizantes, interacción con la materia y principios dosimétricos.

- [25] Irving Kaplan. Física nuclear. *Madrid: Aguilar, 1961, 1, 1961.*
- [26] Irving Kaplan. *Nuclear physics*. Addison-Wesley Reading, Mass., 1963.
- [27] G Keller and B Hoffmann. The radon diffusion length as a criterion for the radon tightness. In *IRPA10 conference proceedings, Hiroshima, 2000.*
- [28] GT Analytic Kodalpha. Kodalpha radón-dosimeters and Ir115 ssntd specifications.
- [29] Daniel Krewski, Jay H Lubin, Jan M Zielinski, Michael Alavanja, Vanessa S Catalan, R William Field, Judith B Klotz, Ernest G Létourneau, Charles F Lynch, Joseph I Lyon, et al. Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 north american case-control studies. *Epidemiology*, 16(2):137–145, 2005.
- [30] María López-López, María Ángeles Fernández de la Ossa, Jorge Sáiz Galindo, Jose Luis Ferrando, Alfonso Vega, Mercedes Torre, and Carmen García-Ruiz. New protocol for the isolation of nitrocellulose from gunpowders: utility in their identification. *Talanta*, 81(4):1742–1749, 2010.
- [31] K Murray Matthews, Chang-Kyu Kim, and Paul Martin. Determination of 210 po in environmental materials: a review of analytical methodology. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(3):267–279, 2007.
- [32] World Health Organization. *WHO handbook on indoor radon: a public health perspective*. World Health Organization, 2009.
- [33] World Health Organization et al. Protection of the public against exposure indoors due to radon and other natural sources of radiation. specific safety guide. 2015.
- [34] P. Pereyra. *Aplicación de la técnica de huellas nucleares en dosimetría de partículas alfa*. Tesis de bachiller de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 1991.
- [35] ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS. En nitrato de celulosa.
- [36] Edward P Radford and KG St Clair Renard. Lung cancer in swedish iron miners exposed to low doses of radon daughters. *New England Journal of Medicine*, 310(23):1485–1494, 1984.
- [37] Charles M Selwitz. *Cellulose nitrate in conservation*, volume 2. Getty Publications, 1988.
- [38] Kenneth E Warner, David Mendez, and Paul N Courant. Toward a more realistic appraisal of the lung cancer risk from radon: the effects of residential mobility. *American Journal of Public Health*, 86(9):1222–1227, 1996.

- [39] Hajo Zeeb, Ferid Shannoun, et al. Manual de la oms sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública. 2015.



Apéndice A

Calibración del LR-115 tipo 2

Los detectores (SSNTD) registran las partículas alfa liberadas por el Radón 222 que interactúan con el detector, dejando en ella huellas latentes que luego es sometido a un proceso de grabado químico, proceso por el cual se obtiene una densidad de huellas, cuyo valor necesita ser transformado a concentración de Radón 222 y sus hijas, esto es posible a través de un factor de calibración (K). En la tesis desarrollada se trabajó con el nitrato de celulosa LR-115 tipo 2 Kodak. Diversos autores han encontrado factores de calibración para este detector, considerando factores de las condiciones en las que se usa el detector, en la mayoría de los casos este detector se usa dentro de un recipiente con una geometría definida, con filtros que permiten discriminar el Radón 220 y sus hijas, detectando solo Radón 222 y eventualmente en el equilibrio dentro de la geometría a sus hijas, sin embargo las diferencias no son tan significativas.

El estudio que se hace es con detectores desnudos por el cual es necesario encontrar el factor de calibración acorde a las condiciones como se hizo en la medición de Radón 222.

A.1. Arreglo experimental

A continuación se muestra el esquema experimental que se usa para la determinación del factor de calibración, donde cada matraz contiene una determinada cantidad de detectores, que además funciona como una pequeña minicámara de Radón, con volúmenes definidos. La fuente de es de Ra 226 el cual por desintegración radiactiva emite el Radón 222, se espera que se alcance el equilibrio radiactivo este tiempo es alrededor de 65 días.

La medición de las concentraciones dentro de las minicámaras es monitoreada por un detector continuo ALPHAGUARD.

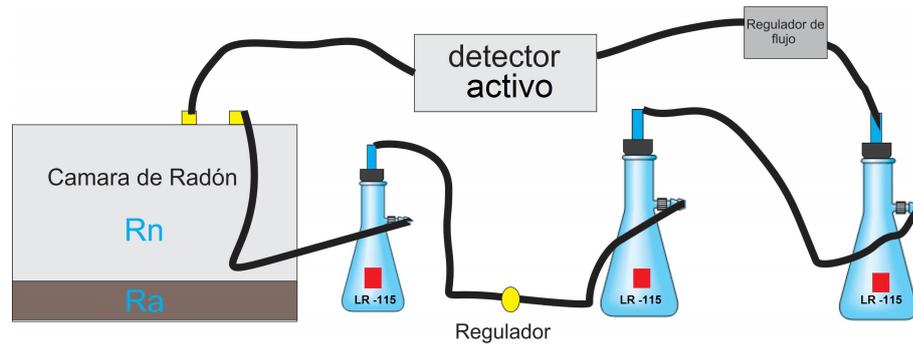


Figura A.1: Esquema del arreglo experimental.

A.2. Resultados

Los detectores fueron puestos a una concentración constante a diferentes periodos. Los resultados de las densidades de huellas encontradas son las siguientes. Con un grado de correlación muy bueno, mostrando la respuesta lineal el cual nos dice que el detector es muy confiable.

Resultados preliminares son mostrados en la siguiente gráfica.

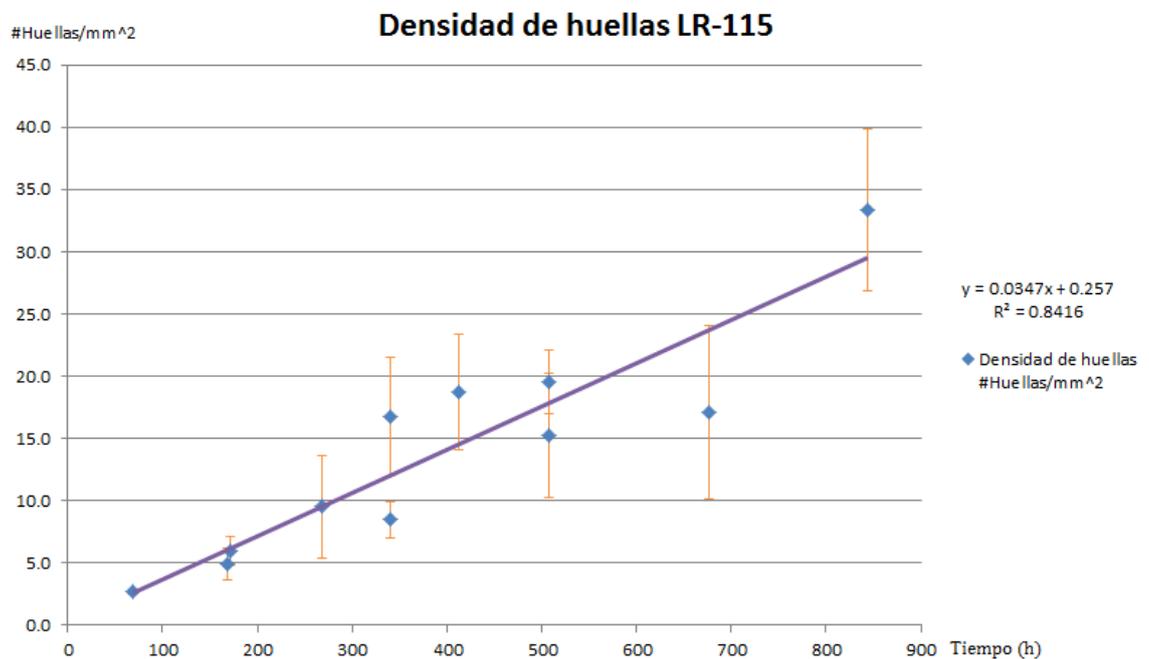


Figura A.2: Datos obtenidos de las densidades de huellas en la cámara de Rn 222.

Apéndice B

MEASURING RADON 222 CONCENTRATION IN THE
BASEMENTS OF THE NEW ENGINEERING BUILDING OF THE
PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF PERU (PUCP)



MEASURING RADON 222 CONCENTRATION IN THE BASEMENTS OF THE NEW ENGINEERING BUILDING OF THE PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF PERU (PUCP)

Rojas, J.J.¹, a, Pérez, B.A.¹, Pereyra, P.E.¹, López, M.E.¹
y Vilcampoma, L.P.¹

¹ Escuela de posgrado, Sección Física, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú.

Abstract

The Pontifical Catholic University of Peru, in the context of preparations to celebrate its first centenary has planned the construction of a classrooms block of 11 levels (8 floors and 3 basements) within its university campus. Taking advantage of this new construction, it is intended to obtain historical data regarding the evolution of Radon 222 concentration in a recent building taking into account environmental and other factors that affect it, the measurements are made in the 3 basement levels of the building. The first results of the history of Radon 222 concentration in the basements of this building used as parking lot are shown. The monitoring has been performed since the first week it was opened to the public. Nuclear Tracks technique is applied to cellulose nitrate detectors (LR 115 type 2). Changes in Radon 222 concentration are evaluated considering aspects such as using exhaust extractors, increase in the number of vehicles, construction time and seasonal parameters.

1 INTRODUCTION

Almost all radioisotopes existing in nature belong to one of three radioactive series that exist in nature, thorium, actinium and uranium [1]. Radon isotopes belonging to these radioactive series and those artificially created are colorless and odorless, Rn 222 is the most stable of radon isotopes with an average life of 3.826 days, which is universally referred to as radon or radon gas; it belongs to the radioactive series of uranium and it is immediate family of Ra 226, with an average life of 1620 years, radon thus formed by the decay of radium in the soil and rocks enters homes, buildings and places such as mine tunnels, basements and it builds up especially in enclosed areas [2]. Radon is the most important source of ionizing radiation of natural origin and the largest contributor to the radiation dose received by living organisms. This is mainly due to exposure to radon and its decay products that are present in the air in the above mentioned places; radon is the second leading cause of lung cancer in the general population after tobacco, epidemiological studies have proved the relationship between indoor radon exposure and lung cancer. The World Health Organization (WHO) showed the health effects due to exposure in homes in 1979, through a European work group in the study of indoor air quality, later on, radon was classified as a human carcinogen by the IARC (International Agency for Research on Cancer) in 1988, agency specialized in cancer research of the WHO [3], also several studies conducted by the ICRP (International Commission on Radiation Protection) show cancer risk associated with exposure to radon and its decay products. Finding a direct relationship of increased lung cancer [4], in 2005, two studies showed definitive evidence between residential radon exposure and lung cancer [5,6].

From the above, various organizations both in Europe and USA have given recommendations and limits on the concentration of radon indoors, in USA the maximum recommended limit is 4 pCi/L (150 Bq/m^3). In England the limit is 200 Bq/m^3 (5.4 pCi/L). The European community recommends not exceeding 400 Bq/m^3 in existing housing and 200 Bq/m^3 in new buildings as recommended by the Environment Committee of the European Community on February 21st, 1990. The measures recommended by the Environmental Protection Agency (EPA), if it occurs more than 200 pCi/L (7400 Bq/m^3), are to take measures to reduce levels within several weeks, from 740 to 7400 Bq/m^3 take steps to reduce levels below

4 pCi/L within several months, from 4 to 20 pCi/L to take steps to reduce levels to below $150 Bq/m^3$ over a period of several years and in the case of levels below $150 Bq/m^3$ although exposure this level represents less risk, declines of these low levels are sometimes difficult to get [7]. So, measuring the concentration of radon and its decay products becomes important because they affect health. For this purpose, different measuring methods are used; including nuclear tracks detectors of solid state- A detector of this type is because the fact that a heavy charged particle causes a great ionization as it passes through a medium. An alpha particle ionizes molecules that are close to its path. The primary ionization process creates an area chemically unstable near the path of the particle that contains free radicals, this area is called latent track [8]. The material containing the latent track is exposed to a chemical solution, which becomes more intense in the latent area; the solutions commonly used are NaOH or KOH. Then, the effect caused by this chemical attack is that it etches the tracks on the detector's surface, with the difference that the etch rate in the damaged area will be higher, thus the particle tracks are etched or formed, with can be seen under a microscope or use the spark counting method or other method like image processing. The effect of the tracks left by the particles happens in many materials such as cellulose nitrate particles or different polycarbonates, these materials are also used to detect radon. This track forming effect is only seen in dielectric materials, in semiconductors by recombination processes the latent tracks are unstable and disappear [9]. The most common commercial detectors used for this purpose are the CR39 and the LR115; these detectors have certain differences, the first and most important is the active layer's thickness, which is 12 microns for LR115 type II and 0.5 mm for CR39, also the tracks formed in them are different, in the case of LR115 they are little holes. The LR115 is based on nitro cellulose while the CR39 is based on polycarbonates, due to these characteristics there are differences in their parameters, which are compared in [10]. Concentration on a specific location based on the solid state detector is derived from the density of tracks observed in the SSNTD, using a suitable calibration factor, where it depends on various parameters among which the most important are the shape of the container where the detector was calibrated, alpha particles energy therefore the source type, the parameters of the etching and counting process etc. They are determined in a laboratory under controlled environmental conditions. Then the relationship is as follows:

$$T = kCt \quad (1)$$

Where T is the density of tracks in (tr/cm^2), k the calibration factor ($trcm^2/Bqhm^3$), C the concentration in (Bq/m^3) and t is the exposure time (in days or hours).

2 EXPERIMENTAL PROCEDURES

This work has been focused on determining the concentration levels of Radon in the basements of a new building at the PUCP, opened in mid-2014.



(a)



(b)

Figure 1: (a)New engineering building of the PUCP (b) panoramic view of basements.

For this purpose, the LR115 type 2 detector with the above-mentioned characteristics was used. As the construction of the new building had just ended, the PUCP's Nuclear Tracks research group decided to monitor the concentration of Radon 222 in this new building, particularly in the basement where staff work 8 hours a day with the relevant labor turnover. For measuring, critical places such as corners were located as these are places away from the existing exhaust fans and they were also placed near the exhaust fans.

2.1 Materials

The materials used were, LR115 type 2 kodalpha, thermostatic bath, 2.5 N NaOH, optical microscope including a computer interface.



Figure 2: Equipment used for counting nuclear tracks associated to Radon 222 concentrations.

2.2 Experimental setup

The LR115 detectors were placed in the three basements of the Engineering's building at the PUCP, in each of them 10 detectors were placed, four pairs in each corner and another pair was located on the stairs, they were placed at a height of approximately 1.5 m from the floor totaling 30 in the three levels. Exposure time of the detectors was 30 days each time, this was repeated 5 times (periods of 1 to 5), after that, the detectors were revealed under the above mentioned conditions and recording time of 90 minutes. Subsequently the respective counting was made using a microscope, during the counting five fields of the detector were taken, since tracks distribution is random, with 10X magnification with field approximately 3mm radius. Equation 1 was used to quantify Radon concentration with calibration factors of $20,41 \text{ Bqm}^3$ corresponding to 100 tracks by cm^2 [11], both recording and counting were brought to standard conditions in the laboratory of experimental physics of the PUCP.

Table 1: Resultados de la concentración de Rn 222 en Villa el Salvador (VES) segundo periodo.

Posiciones (2 detectors by position)	POSITION (Defined by the number of parking lots on each basement)
P1-1,2	Near parking 03
P1-3,4	Near parking 53
P1-5,6	Between the exit symbol and an electric box
P1-7,8	Wall near the driveway to the parking lot
P1-9,10	Emergency stairs (near the elevators) between the basement 1 and the surface
P2-1,2	Near parking 158
P2-3,4	Near parking 132
P2-5,6	Near parking 98
P2-7,8	Extinguisher case near the elevators
P2-9,10	Emergency stairs (near the elevators) between the basement 2 and 1
P3-1,2	Near parking 216
P3-3,4	Near parking 182
P3-5,6	Near parking 162
P3-7,8	Near parking 242
P3-9,10	Emergency stairs (near the elevators) between the basement 3 and 2

3 RESULTS

This report presents the results of Radon 222 monitoring in the basements of the new building of Engineering of the PUCP, performed during winter and spring 2014, in five consecutive periods, each of periods had thirty days on average. The value of this study lies in the fact of verifying whether there is compliance with the standards of radon indoor concentration. Natural radon levels are determined for the first time in such workplaces in the PUCP, thus helping the relevant authorities to establish an appropriate healthy work environment.

Table 2: . Results of monitoring Radon 222 in the first basement of the PUCP.

Detector	Mean value Bq/m_3	Minimum Bq/m_3	Maximum (Bq Bq/m_3
P1-1	37.82 ± 23.45	11.54	74.50
P1-2	21.19 ± 15.40	9.75	47.22
P1-3	24.92 ± 22.73	5.42	62.96
P1-4	23.62 ± 5.69	18.43	32.53
P1-5	27.01 ± 8.81	16.92	38.47
P1-6	23.19 ± 11.13	12.31	37.77
P1-7	25.91 ± 3.43	20.60	29.38
P1-8	38.31 ± 18.14	22.77	67.33
P1-9	26.17 ± 11.26	15.18	41.97
P1-10	27.17 ± 14.25	6.15	41.55

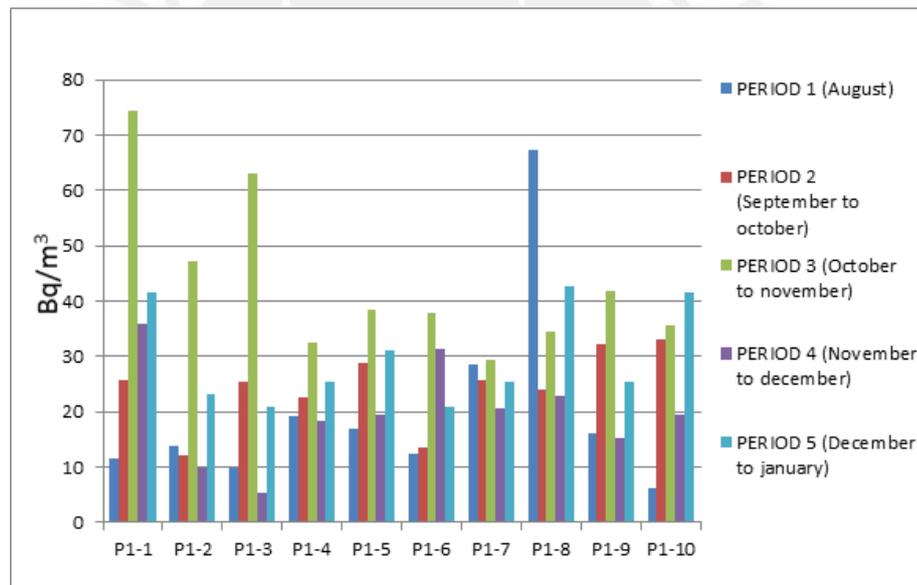


Figure 3: Histogram of the results of Radon 222 monitoring in the first basement of the PUCP, indicating the concentration in Bqm^3 for each period.

Table 3: . Results of monitoring Radon 222 in the first basement of the PUCP.

Detector	Mean value Bq/m_3	Minimum Bq/m_3	Maximum (Bq Bq/m_3
P2-1	34.83 ± 9.08	19.23	42.28
P2-2	29.10 ± 14.32	7.69	47.22
P2-3	21.63 ± 8.99	10.00	31.16
P2-4	19.91 ± 6.44	11.54	27.28
P2-5	23.75 ± 13.09	12.31	45.12
P2-6	20.02 ± 3.98	14.62	24.13
P2-7	28.97 ± 7.62	22.77	41.97
P2-8	30.03 ± 8.43	17.69	39.04
P2-9	32.87 ± 30.52	9.75	86.18
P2-10	23.58 ± 7.87	10.84	32.53

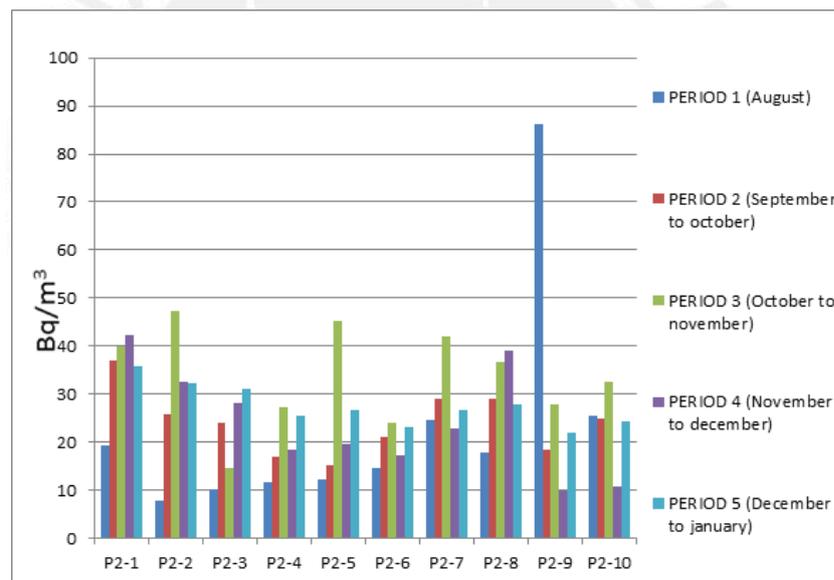


Figure 4: Histogram of the results of Radon 222 monitoring in the second basement of the PUCP, indicating the concentration in Bqm^3 for each period.

Table 4: . Results of monitoring Radon 222 in the first basement of the PUCP.

Detector	Mean value Bq/m_3	Minimum Bq/m_3	Maximum (Bq Bq/m_3
P3-1	34.15 ± 18.52	14.48	64.01
P3-2	38.01 ± 28.57	16.09	82.89
P3-3	41.92 ± 18.87	13.85	59.81
P3-4	50.81 ± 32.72	23.09	97.59
P3-5	22.30 ± 4.917	17.69	30.01
P3-6	17.84 ± 14.21	6.92	41.55
P3-7	34.64 ± 10.82	25.74	52.46
P3-8	28.53 ± 12.27	17.69	47.22
P3-9	21.91 ± 8.88	8.84	30.43
P3-10	18.21 ± 6.57	11.26	25.18

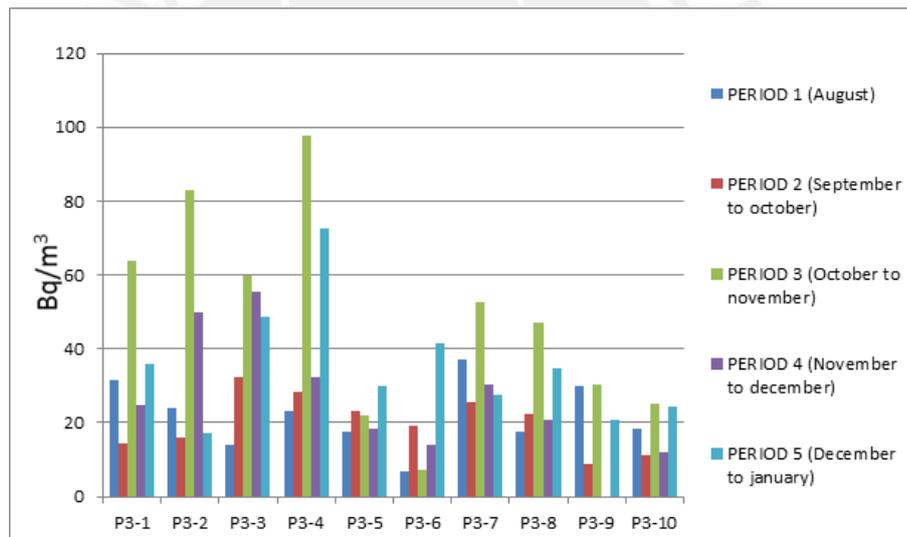


Figure 5: Histogram of the results of Radon 222 monitoring in the first basement of the PUCP, indicating the concentration in Bqm^3 for each period.

4 CONCLUSIONS

This work has enabled taking measurements in a newly constructed building with different materials among which cement predominates and the particularity of maintaining unpainted walls and large basements with relatively poor ventilation. The results of the measurements in the basements demonstrate the presence of Radon 222 in those environments. However, the levels found in different measurement periods are below the maximum allowable levels of 200 Bq/m^3 in new buildings as recommended by the Environment Committee of the EEC of February 21st, 1990 [7]. The maximum concentration level found is 97.59 Bq/m^3 , which corresponds to the third basement of the building under consideration. This indicates that for the moment no corrective action is necessary. It is planned to check in a further work the possible presence of Radon 222 in other environments of the building and continue monitoring the basements where staff remains 24 hours a day in labor turnover periods.



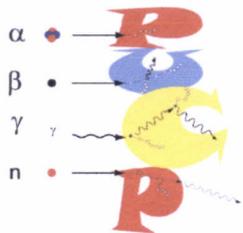
5 REFERENCES

1. F. Goded, V. Serradell., Teoría de Reactores y Elementos de Ingeniería Nuclear, Tomo I, tercera Edic, 1975.
2. World Health Organization., SELECTED POLLUTANTS, 2010., ISBN 978 92 890 02134.
3. World Health Organization., WHO HANDBOOK ON INDOOR RADON, 2009., ISBN 978 92 4 154767 3.
4. ICRP, 1987. Lung Cancer Risk from Exposures to Radon Daughters. ICRP Publication 50.
5. S Darby, D Hill, A Auvinen, J M Barros-Dios, H Baysson, F Bochicchio, et al., A Radon in Homes and Risk of Lung Cancer: Collaborative Analysis of Individual Data from 13 European Case-control Studies, British Medical Journal, 2005 January 29, 330 (7485): 223.
6. D Krewski, JH Lubin, JM Zeilinski, M Alavanja, VS Catalan, RW Field, et al.,?A Residential Radon and Risk of Lung Cancer: A Combined Analysis of 7 North American Case-control Studies., Epidemiology, 2005 March; 16 (2):137-45.
7. ?Radon Risk If You've Never Smoked., <http://www.epa.gov/radon/healthrisks.html>., 1999-2001.
8. Espinosa, G., ?Trazas Nucleares en Sólidos., UNAM. México., 1994., ISBN: 968-36- 4219-5.
9. R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker, Nuclear Tracks in Solids, University of California Press, Berkley, 1975.
10. D. Nikezic 1, K.N. Yu., Profiles and parameters of tracks in the LR115 detector irradiated with alpha particles., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 196 (2002) 105?112.
11. Pereyra P., Aplicación de la técnica de huellas nucleares en dosimetría de partículas alfa., Tesis de bachiller de la Pontificia Universidad Católica del Perú., 1991.

Apéndice C

Ficha de datos de cada vivienda a monitorear





Grupo de Investigación
de Huellas Nucleares

Ficha de Ubicación Detector de Rn 222

Responsable:

Código de los detectores

--	--

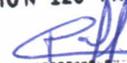
Datos Generales:

Dirección					
Distrito		Teléfono			
Edad aprox. de la construcción (años)		Número Habitantes		Número Fumadores:	
La casa está en:		avenida	calle	Interior o pasaje	
El tráfico es:		intenso	medio	bajo	
Transitan mayormente:		Pesados (ómnibus y camiones)		Livianos (autos)	
En los alrededores hay:		Fábricas con emisión de gases	Fábrica sin emisión de gases	Cables de alta tensión	aeropuerto

Características del lugar de monitoreo

sala	cocina		dormitorio		baño	Garaje	
Sótano	semisótano		Primer piso		Segundo piso	otro	
¿Fuman en la habitación?				si		no	
¿Tiene ventana(s)?				si		no	
¿Quedan abiertas?	siempre	nunca	En el día	Por la noche	Por horas		
¿Otro sistema?	Ventilador de techo	Aire acondicionado		Extractor de aire	otro	Nada	
El sistema adicional está prendido		siempre	nunca	Solo de día	Solo de noche	Por momentos	
Material de construcción			ladrillos	adobe	drywall	otros	
Recubrimiento	pintura	madera	papel	mayólica	otros		

CONTRATO N° 120 PNICP PIAP 2015


PATRIZIA PEREYRA ANAYA
COORDINADOR GENERAL

Si el recubrimiento es pintura:

Tiempo aproximado		Mas de 5 años		Menos de 5 años		
¿Tiene fisuras?		si		No		
Tipo:	látex	Al agua	Base imprimante	esmalte	otro	No recuerda

Otras características

En forma general puede decir que la habitación tiene buena ventilación.			si	no	
La luz solar le da	Por la mañana		Por la tarde	nunca	
El piso es de	cemento	mayólica	madera	tapiz	Otro:

Observaciones (colocar cualquier otra característica que pueda ser de interés en la ubicación)

Muchas gracias por su participación.

Contacto: Laboratorio de Huellas Nucleares (3er. Piso Física)

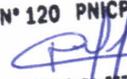
Patrizia Pereyra

Oficina 626 2000

ANEXOS 4112 / 4111 / 4127

Correo: grupo.githunu@pucp.pe

CONTRATO N° 120 PNICP PIAP 2015


PATRIZIA PEREYRA ANAYA
COORDINADOR GENERAL