

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



*Medición de Radón 222 en lugares de trabajo
ubicados en sótanos*

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGISTER EN
FÍSICA

AUTORA

Vanessa Yuliana Guevara Rojas

ASESORA

Dra. María Elena López Herrera

JURADO

Dr. Daniel Palacios Fernández

Mg. Patrizia Pereyra Anaya

MAYO, 2018

RESUMEN

El Radón-222 es un gas de origen natural el cual se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del Uranio, que está presente en suelos y rocas. El Radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite partículas alfa y produce a su vez una serie de partículas de vida corta (Polonio-218, Polonio-214, y Polonio-210) que también decaen emitiendo partículas alfa. Las personas inhalan las partículas de vida corta, y estas pueden causar significativo daño a las células interiores de los bronquiolos y además pueden terminar conduciendo a la aparición de cáncer de pulmón. Por el motivo antes expuesto es de suma importancia medir y evaluar los niveles de exposición debido al Radón. En esta tesis se determina la concentración de Radón-222 en 27 lugares de trabajo ubicados en sótanos que pertenecen a 10 edificios en la ciudad de Lima- Perú. En las mediciones se emplean detectores LR -115 Tipo 2 los cuales se colocan sobre la pared de los sótanos en estudio en tres niveles, 40 cm, 100 cm 160 cm de altura medidos a partir del piso. Los detectores luego son grabados y leídos siguiendo el protocolo usado en el Laboratorio de del Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares de la PUCP (GITHUNU-PUCP). Los resultados estadísticos demuestran que 12 lugares de trabajo presentaron niveles de concentración mayores a 150 Bq/m^3 en diferentes periodos de medición. Se determinó que la distribución de concentración de Rn-222 en un recinto no es homogénea; habiendo mayores niveles de concentración en las zonas del recinto donde hay poca circulación de aire y menores niveles de concentración en las zonas donde hay mayor circulación de aire. Empleando el coeficiente de Pearson se evaluó la correlación de la concentración Rn-222 con la altura alrededor de los puntos de medición, donde dos ambientes mostraron correlación lineal entre estas variables. Empleando el coeficiente de correlación múltiple y de Pearson se logró evaluar la correlación de la concentración de Rn-222 con la humedad relativa y temperatura, en 20 ambientes de trabajo; un ambiente muestra una correlación lineal múltiple justificable entre estas variables, un ambiente muestra una correlación lineal positiva significativa entre la concentración y temperatura y un ambiente muestra una correlación lineal negativa significativa entre la concentración y la humedad relativa. Se concluyó que probablemente la ventilación es la variable que más influencia en los niveles de concentración de Radón en recintos con estas características.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Dios, quien se fortalece en mi debilidad y me bendice día a día. A mi familia, de manera especial a mi mamá, Elia Rojas, y mi abuela, Olga Heredia, que me formaron en amor y me apoyan incondicionalmente. A mi asesora, coordinadores de tesis y compañeros del Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), que gracias a su apoyo y conocimiento hicieron de esta experiencia una de las más especiales en mi vida.



AGRADECIMIENTOS

Ing. José Kanematsu Hazama

Mg. Jhonny Rojas Hanco

Mg. Bertha Milagros García Gutiérrez

Dra. Sandra Guzmán Calcina

AGRADECIMIENTO INSTITUCIONALES

Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares (GITHUNU)

Programa de Becas CIENCIACTIVA del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación
Tecnológica (CONCYTEC)

ÍNDICE

RESUMEN

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: FUNDAMENTO TEÓRICO.....18

1.1 Núcleos atómicos inestables.....18

1.1.1 Desintegración radiactiva

1.1.1.1 Actividad radiactiva

1.1.1.2 Vida media

1.1.1.3 Media vida

1.1.2 Desintegración alfa

1.1.2.1 Poder de frenado de la partícula alfa

1.1.2.2 Rango de partícula alfa

1.1.2.3 Curva de Bragg

1.2 Radón.....30

1.2.1 Isótopos de Radón

1.2.2 Formación y emanación de Radón

1.2.3 Radón en el suelo

1.2.4 Radón en los materiales de construcción

1.2.5 Transporte de Radón

1.2.5.1 Difusión

1.2.5.2 Convección

1.2.6 Exhalación

1.3 Radón en interiores.....42

1.3.1 Influencia de la ventilación

1.3.2 Influencia de la exhalación de paredes, piso y techo

1.3.3 Influencia de la temperatura y humedad

1.4 Exposición ocupacional debido a Radón.....49

1.4.1 Niveles de acción en interiores

1.5	Técnica de medición de Radón.....	51
1.5.1	Respuesta del LR-115 Tipo 2 a la partícula alfa	
1.5.2	Características geométricas de las trazas	
1.5.3	Nivel de saturación	
1.5.4	Incertidumbre de medida del detector LR-115	

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y METODOLOGÍA57

2.1	Identificación de los lugares de estudio.....	57
2.1.1	Tipo de suelo	
2.2	Ubicación y recolección de detectores.....	58
2.3	Grabado químico de detectores.....	59
2.4	Lectura de trazas en los detectores.....	60
2.5	Determinación de la concentración de Rn-222.....	62
2.5.1	Determinación del factor de calibración del detector LR-115	
2.5.2	Cálculo de la densidad de trazas	
2.5.3	Cálculo de la concentración de Rn-222	
2.5.4	Coefficiente de correlación de Pearson	
2.5.5	Coefficiente de correlación múltiple	

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS.....69

3.1	Edificio 1.....	69
3.1.1	Lugar de trabajo 1A	
3.1.2	Lugar de trabajo 1B	
3.1.3	Lugar de trabajo 1C	
3.1.4	Lugar de trabajo 1D	
3.2	Edificio 2.....	86
3.2.1	Lugar de trabajo 2A	
3.2.2	Lugar de trabajo 2B	
3.2.3	Lugar de trabajo 2C	
3.3	Edificio 3.....	96
3.3.1	Lugar de trabajo 3A	
3.3.2	Lugar de trabajo 3B	

3.4	Edificio 4.....	102
3.4.1	Lugar de trabajo 4A	
3.5	Edificio 5.....	107
3.5.1	Lugar de trabajo 5A	
3.5.2	Lugar de trabajo 5B	
3.6	Edificio 6.....	111
3.6.1	Lugar de trabajo 6A	
3.6.2	Lugar de trabajo 6B	
3.7	Edificio 7.....	114
3.7.1	Lugar de trabajo 7A	
3.7.2	Lugar de trabajo 7B	
3.7.3	Lugar De trabajo 7C	
3.8	Edificio 8.....	120
3.8.1	Lugar de trabajo 8A	
3.8.2	Lugar de trabajo 8B	
3.8.3	Lugar de trabajo 8C	
3.8.4	Lugar de trabajo 8D	
3.8.5	Lugar de trabajo 8E	
3.9	Edificio 9.....	135
3.9.1	Lugar de trabajo 9A	
3.9.2	Lugar de trabajo 9B	
3.9.3	Lugar de trabajo 9C	
3.10	Edificio 10.....	149
3.10.1	Lugar de trabajo 10A	
3.11	Resumen.....	151
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		152
BIBLIOGRAFÍA.....		154

ANEXO 1.....159
ANEXO 2.....162
ANEXO 3.....166



ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Núcleo atómico [4].....	18
1.2	Gráfica de estabilidad nuclear [7].....	19
1.3	Desintegración radiactiva [8].....	20
1.4	Vida media [9].....	21
1.5	Efecto túnel [10].....	23
1.6	Decaimiento alfa del Rn-222 [11].....	23
1.7	Poder de frenado de partículas alfa en diferentes materiales.....	27
1.8	Poder de frenado de partícula alfa en aire seco.....	27
1.9	Rango y rango proyectado [14].....	28
1.10	Rango proyectado de partícula alfa en diferentes materiales.....	29
1.11	Rango proyectado de partícula alfa en aire seco.....	29
1.12	Curva de Bragg en aire de una partícula alfa de energía 4.78 MeV [17].....	30
1.13	(a) Ingreso de Radón a recintos [19].....	31
	(b) Daño del tejido pulmonar por la progenie del Radón [20]	
1.14	(a) Serie Radiactiva U-238 [21].....	32
	(b) Serie Radiactiva Th-232 [22]	
1.15	Principios de emanación de Radón en un grano de mineral [5].....	33
1.16	(a) Estructura del suelo [23].	34
	(b) Tipos de granos: Grava (gravel), arena (sand), limo (silt), arcilla (clay) [24].	
1.17	Granos de arena que contienen minerales de Sílice SiO ₂ (cuarzo), el cual a su vez contiene Uranio que finalmente da origen al gas Radón.....	34
1.18	Razón U-238 / Th-232 en el suelo [1].....	35
1.19	Transporte de Radón [25].....	38
1.20	Difusión [26].....	38
1.21	Exhalación [28].....	41
1.22	(a) Distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 en planos a diferentes distancias desde el piso.....	43
	(b) Campo vectorial del movimiento del aire, que asocia a cada punto de la superficie un vector velocidad y la dirección del viento en dicho punto [29]	
1.23	Impacto de la tasa de ventilación en la distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 [30].....	44
1.24	Distribución inhomogénea de Rn-222 [31].....	44
1.25	Niveles de concentración de Rn-222, en viviendas de diferentes materiales de construcción [5].....	45
1.26	Esquema de la influencia de la temperatura (T) en la concentración de Radón (C-Rn), a una humedad absoluta constante (HA) y humedad de saturación (HS) que varía con la temperatura.....	47
1.27	Concentración de Rn-222 versus temperatura [30].....	47

1.28	(a) Perfil de distribución de Rn-222 a una temperatura de 15 °C.....	47
	(b) Perfil de distribución de Rn-222 a una temperatura de 25 °C [30].	
1.29	Esquema de la influencia de la humedad relativa (HR) en la concentración de Rn-222 (C-Rn), a una humedad de saturación (HS) y temperatura (T) constantes.....	48
1.30	Concentración de Rn-222 versus humedad relativa, a temperatura constante [30].....	48
1.31	Detector LR-115 Tipo 2 [54].....	51
1.32	Cadena de escisión [5].....	51
1.33	Sensibilidad del detector LR-115 Tipo 2 en una ventana de energía de 0,8 - 4,5 MeV [56].	52
1.34	Regiones de influencia para el Rn-222, Rn-220 y sus progenies, para detector LR-115 Tipo 2 en modo desnudo [57].....	53
1.35	Traza formada por una partícula alfa que incide de manera normal sobre la superficie de un detector LR-115.....	54
2.1	Mapa de suelos en los distritos de Lima [59].....	58
2.2	Arreglo de detectores colocados a alturas desde el piso de 40, 100 y 160 cm.....	59
2.3	Procedimiento de grabado químico de detectores LR- 115 Tipo 2.....	60
2.4	Procedimiento de lectura de trazas en los detectores LR- 115 Tipo 2.....	61
2.5	Esquema de la cámara de calibración de Rn-222.....	62
2.6	Densidad de trazas versus exposición.....	63
3.1	(a) Diseño y puntos de medición del lugar de trabajo 1A.....	69
	(b) Coordenadas de los puntos de medición	
3.2	Fachada del lugar de trabajo 1A, donde se puede visualizar unas ranuras ubicadas en la parte inferior de la puerta de ingreso.....	70
3.3	Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 40 cm de altura desde el piso.....	71
3.4	Distribución de concentración de Rn 222 en un plano horizontal a 40 cm de altura.....	71
3.5	Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 100 cm de altura desde el piso.....	72
3.6	Distribución de concentración de Rn-222 en un plano horizontal a 100 cm de altura.....	72
3.7	Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 160 cm de altura desde el piso.....	73
3.8	Distribución de concentración de Rn-222 en un plano horizontal a 160 cm de altura.....	73
3.9	Niveles de concentración promedio de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición.....	74
3.10	Distribución promedio de concentración de Rn-222.....	74
3.11	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1B.....	76
	(b) Ventanas del recinto	
3.12	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1C.....	79
	(b) Puerta 1 del recinto	
3.13	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1D.....	84
	(b) Puerta 1 y ventanas	

3.14	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2A.....	87
	(b) Ventiladores	
3.15	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2B.....	90
	(b) Ventiladores	
3.16	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2C.....	93
	(b) Ventiladores	
3.17	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 3A.....	96
	(b) Ventanas	
3.18	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 3B.....	99
	(b) Imagen real del ambiente	
3.19	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 4A.....	102
3.20	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 5A.....	107
3.21	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 5B.....	109
3.22	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 6A.....	111
3.23	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 6B.....	112
3.24	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7A.....	114
	(b) Imagen real del ambiente	
3.25	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7B.....	116
3.26	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7C.....	118
3.27	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8A.....	120
	(b) Punto de medición	
3.28	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8B.....	123
3.29	Punto de medición del lugar de trabajo 8B.....	124
3.30	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8C.....	126
3.31	(a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8D.....	129
	(b) Punto de medición	
3.32	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8E.....	132
3.33	Punto de medición en el lugar de trabajo 8E.....	133
3.34	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9A.....	135
3.35	(a) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9A.....	136
	(b) Imagen real del lugar de trabajo 9A	
3.36	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9B.....	139
3.37	(a) Imagen real del lugar de trabajo 9B.....	140
	(b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9B	
3.38	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9C.....	142
3.39	(a) Imagen real del lugar de trabajo 9C.....	143
	(b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9C	
3.40	Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9D.....	146
3.41	(a) Imagen real del lugar de trabajo 9D.....	147
	(b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9D	

3.42 (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 10A.....149
(b) Punto de medición



ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Isótopos del elemento Radón [5].....	18
1.2	Vida media y media vida de algunos núcleos [5].....	22
1.3	Energía cinética del núcleo hijo y partícula alfa de diversas desintegraciones.....	24
1.4	Poder de Frenado [13].....	26
1.5	Energía de partículas alfa y rango proyectado [17].....	28
1.6	Tamaño y porosidad de granos de suelo [5].....	35
1.7	Emanación de átomos de Radón de poros con aire en varios suelos y roca triturada [5]...36	
1.8	Concentraciones normales de Ra^{226} y Rn^{222} en aire de suelo, medido a un metro de profundidad [5].....	37
1.9	Contenidos de Ra-226 y Th-232 en algunos materiales de construcción suecos. Los materiales reflejan la posible emisión de Radón y Torón [5].....	37
1.10	Contenidos de Ra-226 y Th-232 en algunos materiales de construcción alemanes. Los materiales reflejan la posible emisión de Radón y Torón [5].....	38
1.11	Distancia de difusión promedio de los isótopos de Radón en diferentes medios [5].....	39
1.12	Valores experimentales promedio del coeficiente de difusión y la distancia de difusión de Rn-222 en algunos materiales [27].....	40
1.13	Valores representativos de la permeabilidad hidráulica [5].....	41
1.14	Valores de la exhalación anual de Rn-222 [18].....	42
1.15	Comparación de la simulación con las mediciones experimentales a un $Z= 1.22$ de la concentración de Rn-222 en Bq/m^3 [29].....	43
1.16	Influencia de la tasa de ventilación en los resultados de concentración de Rn-222 en Bq/m^3 [30].....	43
1.17	Exhalación de Radón de paredes, piso y techo [29].....	45
1.18	Exhalación de Radón de paredes, piso y techo.....	45
1.19	Concentración y exhalación de Rn-222 de diferentes materiales de construcción [33].....	46
1.20	Estudios de exposición ocupacional debido a Rn-222 en lugares de trabajo ubicados arriba del terreno y en sótanos.....	49
1.21	Niveles de acción en interiores, establecidos en diferentes países [5].....	50
1.22	Distancia mínima y máxima para el Rn-222 y Po-214 [56].....	53
1.23	Incertidumbres de medida del detector LR-115 Tipo 2 [56].....	56
2.1	Identificación de los lugares de estudio.....	57
2.2	Escala para interpretar el coeficiente de correlación.....	66
2.3	Criterio para interpretar el coeficiente de determinación múltiple ajustado (r^2_{adj}).....	68
3.1	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1A.....	70
3.2	Coeficiente de Pearson y determinación entre la concentración y el eje X	
3.3	Coeficiente de Pearson y determinación entre la concentración y el eje Y	
3.4	Coeficiente de Pearson y determinación entre la concentración y el eje Z	

3.5	Coeficiente de Pearson y determinación entre la concentración y la altura en cada punto de medición	
3.6	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1B.....	76
3.7	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1B)	
3.8	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1B)	
3.9	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 1B)	
3.10	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1C.....	79
3.11	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1C)	
3.12	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1C)	
3.13	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 1C)	
3.14	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 2 (ambiente 1C)	
3.15	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 2 (ambiente 1C)	
3.16	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 1C)	
3.17	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1D.....	84
3.18	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1D)	
3.19	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1D)	
3.20	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 1D)	
3.21	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2A.....	88
3.22	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2A)	
3.23	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2A)	
3.24	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2A)	
3.25	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2B.....	91
3.26	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2B)	
3.27	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2B)	
3.28	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2B)	
3.29	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2C.....	94
3.30	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2C)	

3.31	Coefficiente de Pearson y determinación entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2C)	
3.32	Coefficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2C)	
3.33	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 3A.....	97
3.34	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 3A)	
3.35	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 3A)	
3.36	Coefficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 3A)	
3.37	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 3B.....	100
3.38	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 3B)	
3.39	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 3B)	
3.40	Coefficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 3B)	
3.41	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 4A.....	103
3.42	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 4A)	
3.43	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 4A)	
3.44	Coefficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 4A)	
3.45	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 2 (ambiente 4A)	
3.46	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 2 (ambiente 4A)	
3.47	Coefficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 4A)	
3.48	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 5A.....	107
3.49	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 5A)	
3.50	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 5A)	
3.51	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 5B.....	109
3.52	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 5B)	
3.53	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 5B)	
3.54	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 6A.....	111
3.55	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 6A)	
3.56	Coefficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 6A)	
3.57	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 6B.....	113

3.58	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 6B)	
3.59	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 6B)	
3.60	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7A.....	114
3.61	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7A)	
3.62	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7A)	
3.63	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7B.....	116
3.64	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7B)	
3.65	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7B)	
3.66	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7C.....	118
3.67	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7C)	
3.68	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7C)	
3.69	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8A.....	120
3.70	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8A)	
3.71	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8A)	
3.72	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 8A)	
3.73	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8B.....	123
3.74	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8B)	
3.75	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8B)	
3.76	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 8B)	
3.77	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8C.....	127
3.78	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8C)	
3.79	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8C)	
3.80	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8C)	
3.81	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8D.....	129
3.82	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8D)	
3.83	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8D)	
3.84	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8D)	
3.85	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8E.....	132

3.86	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8E)	
3.87	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8E)	
3.88	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8E)	
3.89	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9A.....	136
3.90	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9A)	
3.91	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9A)	
3.92	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9A)	
3.93	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9B.....	139
3.94	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9B)	
3.95	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9B)	
3.96	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9B)	
3.97	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9C.....	143
3.98	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9C)	
3.99	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9C)	
3.100	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9C)	
3.101	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9D.....	146
3.102	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9D)	
3.103	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9D)	
3.104	Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9D)	
3.105	Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 10A.....	149
3.106	Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 10A)	
3.107	Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 10A)	
3.108	Cuadro resumen de los ambientes de trabajo y su correlación con la altura, temperatura y humedad relativa.....	151

MEDICIÓN DE RADÓN 222 EN LUGARES DE TRABAJO UBICADOS EN SÓTANOS

INTRODUCCIÓN

El Radón-222 es un carcinógeno pulmonar reconocido al que la exposición humana debe ser limitada. Los principales emisores de Radón en los edificios se encuentran en el suelo y en los materiales de construcción, por contener cantidades diminutas de Uranio y Radio, que se descomponen radiactivamente en gas Radón. Los lugares de trabajo ubicados en sótanos tienen una mayor cercanía con el suelo y algunos presentan escasa ventilación, por lo tanto, es probable que los sótanos tengan un mayor nivel de concentración de Radón en comparación con otros tipos de ambientes. Desde hace algún tiempo se ha venido evaluando los niveles de Radón-222 en algunas viviendas, pero hace relativamente poco tiempo que se ha prestado atención a lugares de trabajo distintos de minas. Hasta el momento la UNSCEAR, en su informe del 2008 titulado: Fuentes y Efectos de Radiaciones Ionizantes, ha presentado una estimación aproximada de la dosis efectiva anual mundial que recibe un trabajador, que no labora en minas, debido a Radón-222, siendo este valor de 4.8 mSv [1]. La Agencia de Salud Pública de Inglaterra (PHE, Public Health England) y la Agencia Ejecutiva para la Salud y Seguridad (HSE, Health and Safety Executive) del Reino Unido aconsejan a los empleadores que evalúen rutinariamente las concentraciones de Radón en lugares de trabajo ubicados en sótano, independientemente de su ubicación geográfica, con la finalidad de evaluar los riesgos de salud y seguridad de sus empleados [2]. En Perú, actualmente no contamos con una normativa que regule los niveles de concentración de Rn-222 en diferentes locaciones; además existe precaria información sobre las concentraciones de Rn-222 en centros de trabajo ubicados en sótanos.

Por lo antes expuesto, es que la presente tesis tuvo por objetivo principal:

- Determinar la concentración de Rn-222, en lugares de trabajo ubicados en sótanos.

Y como objetivos específicos:

- Evaluar la influencia de la ventilación en la distribución de la concentración de Rn-222.
- Evaluar la variación de concentración de Rn-222 con la altura de medición.
- Correlacionar la temperatura y humedad relativa con la concentración de Rn-222.

Este trabajo de investigación se encuentra estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: Fundamento teórico.

Capítulo 2: Materiales y metodología

Capítulo 3: Resultados y análisis

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas y los Anexos 1, 2 y 3.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 NÚCLEOS ATÓMICOS INESTABLES

Para 1911 los experimentos de dispersión de Ernest Rutherford habían demostrado que el átomo está formado por un núcleo muy pequeño ($\sim 10^{-14}m$) y electrones girantes alrededor del núcleo. El núcleo es aproximadamente 10^4 veces más pequeño que el tamaño general del átomo, pero contiene la mayor parte de su masa. Las partículas que conforman el núcleo, los protones y neutrones, son conocidos como nucleones [3].

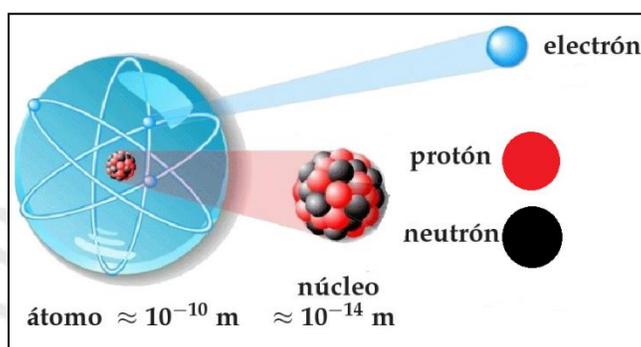


Figura 1.1: Núcleo atómico [4]

Una especie de átomos se representa esquemáticamente por A_ZX , donde Z es el número atómico e indica el número de protones, A es el número másico e indica el número total de protones (Z) más neutrones (N). Como ejemplo de átomo tenemos el helio 4_2He .

Se denominan isótopos a los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto difieren en número másico. En la Tabla 1.1, mostramos ejemplos de isótopos naturales del gas Radón.

Tabla 1.1: Isótopos del elemento Radón [5]

Isótopos de radón		Z	N	A
Radón 222	Rn-222	86	136	222
Radón 220 o Torón	Rn-220	86	134	220
Radón 219 o Actinón	Rn-219	86	133	219

Un núcleo atómico se le considera inestable si sufre desintegración radiactiva espontáneamente, mediante la emisión de partículas alfa, beta o gamma, para luego convertirse en otro núcleo. La inestabilidad de un núcleo puede evaluarse por su proporción entre el número de neutrones y el número de protones (N/Z). Esta proporción N/Z se puede graficar, obteniendo la denominada banda de estabilidad, la cual se representa con los recuadros negros de la figura 1.2. En los núcleos ligeros ($Z < 20$) la estabilidad se consigue cuando tienen aproximadamente el mismo

número de protones que de neutrones ($N/Z=1$). En cambio, en los núcleos pesados ($Z>20$), la estabilidad se consigue con mayor número de neutrones y la relación entre N y Z puede llegar a ser superior a 1 ($N/Z > 1$). Esto se debe a que es necesario un mayor número de neutrones (N) para compensar el gran aumento de las fuerzas de repulsión protón-protón a medida que aumenta Z . Sin embargo, sea cual sea el número de neutrones presentes, parece existir un límite al número de protones que se puede empacar en un núcleo, ya que el núcleo más grande estable es el ${}^{209}_{83}\text{Bi}$, y todos los núcleos más pesados que éste ($Z>83$) son inestables, como por ejemplo los isótopos del Radón ($Z=86$), los cuales se ubica en los recuadros amarillo de la figura 1.2, debido a que tiene un exceso de protones, neutrones y busca lograr su estabilidad (disminuir su relación N/Z) mediante la emisión de partículas alfa (proceso de desintegración radiactiva) [6].

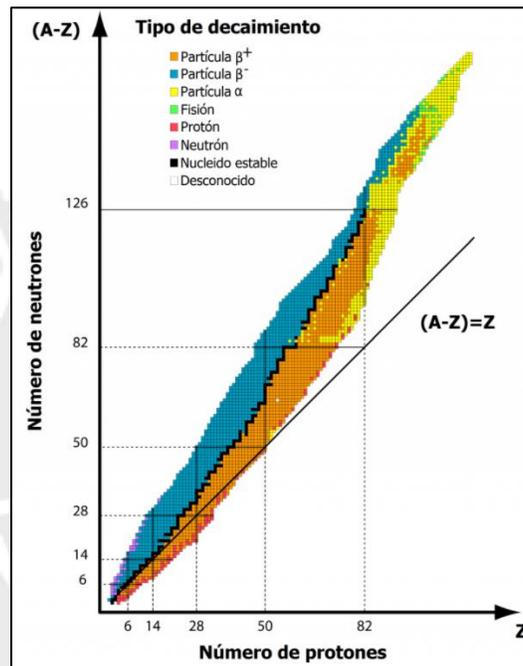


Figura 1.2: Gráfica de estabilidad nuclear [7]

1.1.1 DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Proceso mediante el cual, un núcleo libera partículas y energía de manera espontánea y aleatoria, con la finalidad de buscar una configuración más estable. Las formas básicas de desintegración radiactiva son: la desintegración alfa (α), la desintegración beta (β), la desintegración gamma (γ).

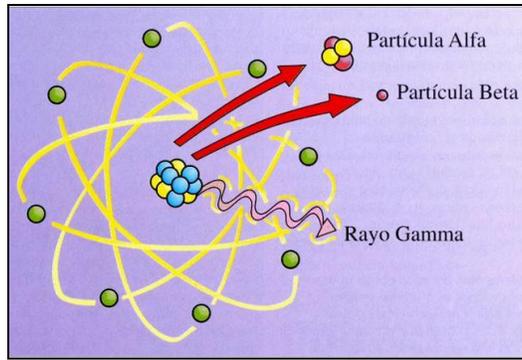


Figura 1.3: Esquema de una desintegración radiactiva [8]

Si suponemos que tenemos un conjunto de núcleos inestables o radiactivos “ N ” presentes en un tiempo dado y “ dN ” representa el número de núcleos que se desintegran durante un intervalo de tiempo “ dt ”, entonces:

$$\text{La probabilidad de desintegración} = -\frac{dN}{N}$$

El signo menos de la ecuación anterior indica que el número de núcleos disminuye con el tiempo. La probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es:

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \text{constante}$$

Donde “ λ ” se identifica como la constante de desintegración. La ecuación anterior puede escribirse en una manera diferente, y si existen N_0 átomos en el tiempo $t=0$, entonces:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_{t=0}^t -\lambda dt \rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

Que puede tomar la forma exponencial, conocida como la Ley de Desintegración Radiactiva [3]:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

1.1.1.1 ACTIVIDAD RADIATIVA

La actividad de un conjunto de núcleos radiactivos representa la razón a la cual ocurren las desintegraciones de los núcleos por unidad de tiempo y se define por:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

Si la ecuación (1.1) se multiplica por λ , se convierte en: $\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$, donde $\lambda N_0 = A_0$ es la actividad inicial, y $\lambda N = A$ es la actividad en el tiempo t .

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

La unidad para medir la actividad es el Becquerelio (Bq), siendo 1 Bq = 1 desintegración por segundo.

Concentración: La concentración, también conocida como actividad específica, es la magnitud que permite medir y dar a conocer cuánta cantidad o actividad de sustancia se puede encontrar en una unidad de volumen o masa. Las unidades de concentración empleadas para núcleos radiactivos, como por ejemplo los isótopos de Radón, pueden ser: $\text{átomos}/\text{cm}^3$, Bq/m^3 , Bq/kg , etc. [3,7].

1.1.1.2 TIEMPO DE SEMIDESINTEGRACIÓN ($T_{1/2}$)

Tiempo de semidesintegración, también conocido como vida media, se define como el tiempo transcurrido en el cual el número de núcleos de una muestra decae a la mitad del número inicial. Cuando $t = T_{1/2}$, el número de átomos presentes de una clase dada es $N = \frac{N_0}{2}$, reemplazando estos valores en la ecuación (1.1) y despejando obtenemos la vida media $T_{1/2}$ [3,7]:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.639}{\lambda} \quad (1.3)$$

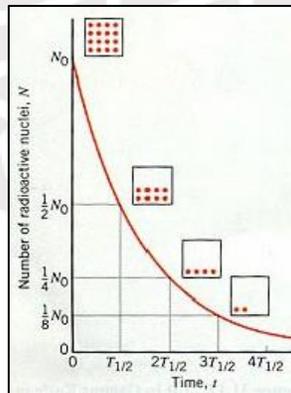


Figura 1.4: Tiempo de semidesintegración [9].

1.1.1.3 MEDIA VIDA (\bar{T})

También conocida como vida promedio de un núcleo radiactivo, es el tiempo de vida promedio de todos los núcleos de una muestra dada. Por lo tanto, si hay dN_1 átomos con un tiempo de vida t_1 ,

dN_2 átomos con un tiempo de vida t_2 , y así sucesivamente, entonces la vida media se define en la forma [3]:

$$\bar{T} = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + \dots}{dN_1 + dN_2 + \dots}$$

En términos de cálculo integral, obtenemos:

$$\bar{T} = \frac{\int_{N_0}^0 t dN}{\int_{N_0}^0 dN} = \frac{\int_0^\infty t \frac{dN}{dt} dt}{\int_0^\infty \frac{dN}{dt} dt} = \frac{1}{\lambda}$$

El tiempo de semidesintegración ($T_{1/2}$) y la media vida (\bar{T}) están relacionadas por:

$$\bar{T} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \quad \text{ó} \quad T_{1/2} = 0.693\bar{T} \quad (1.4)$$

Tabla 1.2: Tiempo de semidesintegración y media vida de algunos núcleos [5]

Núcleo	Tiempo de semidesintegración $T_{1/2}$	Media Vida \bar{T}
U-238	4.47x10 ⁹ años	3.10x10 ⁹ años
Ra-226	1.6x10 ³ años	1.11x10 ³ años
Rn-222	3.82 días	2.65 días
Po-218	3.05 minutos	2.11 minutos
Po-214	0.00164 s	0.00114 s
Th-232	14.04x10 ⁹ años	9.73x10 ⁹ años
Ra-224	3.64 días	2.52 días
Rn-220	55.6 s	38.53 s
Po-216	0.145 s	0.100 s
Po-212	3x10 ⁻⁷ s	2.07x10 ⁻⁷ s

1.1.2 DESINTEGRACIÓN ALFA

Este proceso se presenta cuando los núcleos contienen muchos nucleones, tal que la fuerza nuclear fuerte de corto alcance que las mantiene unidas, son difícilmente capaces de equilibrar la repulsión mutua de los protones. La desintegración alfa en tales núcleos se presenta como un medio de aumentar su estabilidad por reducción de su tamaño. Clásicamente, una partícula alfa atrapada dentro de una barrera de potencial nuclear no puede escapar hacia afuera de la barrera; sin embargo, en 1928 Gamow desarrolló la teoría de la desintegración alfa, tomando como base la mecánica cuántica, la cual suministra una explicación directa sobre el escape de la partícula alfa desde el

núcleo. Los principios básicos de esta teoría son los siguientes: (1) Una partícula alfa puede existir como una entidad dentro del núcleo; (2) La partícula alfa está en constante movimiento y está encerrada en el núcleo por medio de una barrera de potencial que lo rodea; (3) Existe una pequeña probabilidad, pero definida, de que la partícula alfa pueda pasar a través de la barrera (efecto túnel) [3].

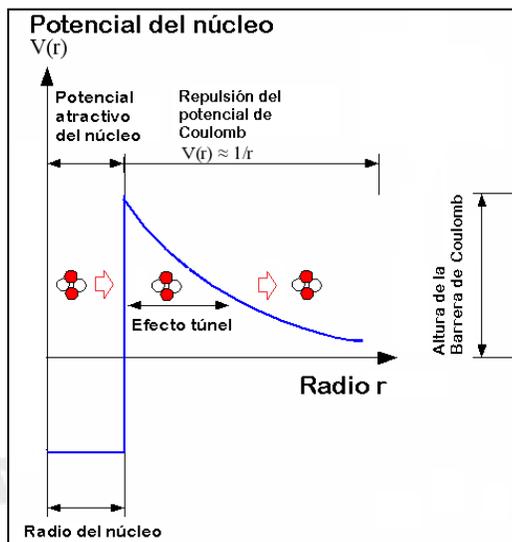
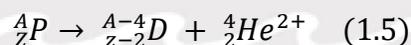


Figura 1.5: Esquema del efecto túnel para las partículas alfa [10].

En la desintegración alfa, hay un núcleo padre inestable “P” que se desintegra en un núcleo hijo “D” (con un número atómico dos unidades más pequeño y un número de masa cuatro unidades más pequeño) más una partícula α (que es un núcleo de helio, compuesto por dos protones y dos neutrones).



Como ejemplo de un elemento que sufre este tipo de decaimiento, tenemos al Rn-222, el cual se transforma en Polonio-218 más una partícula alfa.

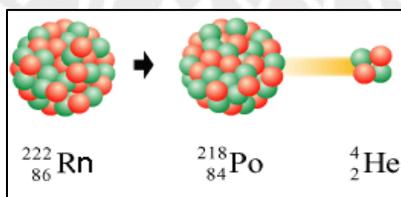


Figura 1.6: Esquema del decaimiento alfa del Rn-222 [11].

En esta desintegración la masa inicial del núcleo padre es mayor que la suma de la masa del núcleo hijo y la masa de la partícula alfa. La energía equivalente a la diferencia de masa aparece como energía cinética del núcleo hijo y la partícula alfa. Pasando por alto los equivalentes de masa de las

energías del amarre electrónico, esta energía de desintegración alfa puede escribirse en términos de masas atómicas (uma), como:

$$E = [M_P - (M_D + M_\alpha)] \quad (1.6)$$

Como la energía liberada en la desintegración alfa es alrededor de mil veces menor que la energía en reposo de las partículas alfa $\sim 4\text{GeV}$, las partículas alfa siempre son no relativistas. La ecuación de la conservación de la masa - energía puede escribirse entonces:

$$E = K_D + K_\alpha = [M_P - (M_D + M_\alpha)]$$

Donde K_D y K_α son las energías cinéticas de la partícula hijo y la partícula alfa respectivamente. La energía cinética del padre no se ha incluido, ya que se supone en reposo. La conservación del momento lineal requiere que:

$$M_\alpha V_\alpha = M_D V_D \rightarrow \frac{M_\alpha^2 V_\alpha^2}{2} = \frac{M_D^2 V_D^2}{2} \rightarrow M_\alpha K_\alpha = M_D K_D$$

De aquí podemos despejar las energías cinéticas alfa y del hijo:

$$K_\alpha = \frac{M_D K_D}{M_\alpha} ; K_D = \frac{M_\alpha K_\alpha}{M_D}$$

Reemplazando estas últimas expresiones en $E = K_D + K_\alpha$, y luego en la ecuación (1.6), obtengo la energía cinética de la partícula alfa y el núcleo hijo, que obtienen como consecuencia del decaimiento alfa que se produjo en el núcleo padre. Para convertir la energía de unidades uma a unidades de MeV debemos multiplicarla por el factor 931.5 [3]

$$K_\alpha = \left[\frac{M_D}{M_D + M_\alpha} \right] E ; K_D = \left[\frac{M_\alpha}{M_D + M_\alpha} \right] E \quad (1.7)$$

Con la ayuda de las ecuaciones 1.6 y 1.7, determinamos la energía cinética del núcleo hijo y partícula alfa de la desintegración del Ra-226, Rn-222, Po-218 y el Po-214 (que pertenecen a la serie de decaimiento del U-238); de la misma forma determinaremos la energía cinética del núcleo hijo y partícula alfa de la desintegración del Ra-224, Rn-220, Po-216 y el Po-212 (que pertenecen a la serie de decaimiento del Th-232). Los resultados se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3: Energía cinética del núcleo hijo y partícula alfa de diversas desintegraciones

Serie Radiactiva U^{238}			
Desintegración alfa	Energía de la desintegración alfa	Energía cinética del núcleo hijo	Energía cinética alfa
	$E(\text{MeV})^a$	$K_D(\text{KeV})^b$	$K_\alpha(\text{MeV})^b$
${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	4.87065594	86.25	4.78
${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	5.59034774	100.79	5.49

${}^{218}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	6.11471517	112.27	6.00
${}^{214}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{210}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	7.83351338	146.53	7.69
Serie Radiactiva Th^{232}			
Desintegración alfa	Energía de la desintegración alfa	Energía cinética del núcleo hijo	Energía cinética alfa
	$E(\text{MeV})^a$	$K_D(\text{KeV})^b$	$K_\alpha(\text{MeV})^b$
${}^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{220}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	5.78888672	103.43	5.69
${}^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{216}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	6.40470696	116.52	6.29
${}^{216}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{212}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	6.90636256	127.98	6.78
${}^{212}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}^{2+}$	11.7762259	222.36	8.78 (64%)

^aEcuación (1.6)

^bEcuación (1.7)

1.1.2.1 PODER DE FRENADO DE LA PARTÍCULA ALFA (S)

Durante el movimiento de la partícula alfa a través de un medio, ésta experimenta diversas interacciones antes de perder toda su energía cinética. El poder de frenado es el parámetro usado para describir la pérdida gradual de la energía de la partícula alfa conforme esta va penetrando en el medio. Su unidad está en función de energía por unidad de longitud, por ejemplo: MeV/cm [12].

$$S = -\frac{dE}{dx} \quad (1.8)$$

Desde un punto de vista energético, estas partículas pierden su energía provocando excitaciones e ionizaciones en los electrones de los átomos del medio (poder de frenado electrónico, P.F.E.) y emitiendo fotones, que resultan de la interacción de la partícula alfa con el núcleo de los átomos del medio (poder de frenado nuclear, P.F.N.). Por tanto, la pérdida total de energía por unidad de recorrido se expresa como:

$$\left[\frac{dE}{dx}\right] \approx \left[\frac{dE}{dx}\right]_{P.F.E.} + \left[\frac{dE}{dx}\right]_{P.F.N.}$$

En el caso de partículas pesadas como las alfa, la pérdida de energía por colisiones radiativas es despreciable. En 1932, usando la mecánica cuántica relativista, Bethe derivó la siguiente expresión para el poder de frenado en un medio uniforme [12]:

$$S = -\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k_0^2 z^2 e^4 n}{mc^2 \beta^2} \left[\text{Ln} \frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right]$$

Donde:

$$k_0 = 8.99 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$$

z = número atómico de la partícula alfa

e = carga del electrón

n = número de electrones por unidad de volumen en el medio

m = masa en reposo del electrón

c = velocidad de la luz en el vacío

$\beta = v/c$ = velocidad de la partícula alfa relativa a c

I = energía de excitación promedio del medio

Al dividir el poder de frenado lineal por la densidad del medio en el cual se propaga la partícula, se obtiene el poder de frenado másico en unidades de $\text{MeV cm}^2/\text{g}$ [12].

$$\frac{S}{\rho} = - \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

Con la ayuda del programa ASTAR, determinamos el poder de frenado de partículas alfa en diferentes tipos de materiales [13].

Tabla 1.4: Poder de Frenado [13]

Núcleo Padre	Energía alfa (MeV)	Poder de Frenado (MeV/cm)				
		Aire Seco	Agua Líquida	Sílice SiO ₂	Nitrato de Celulosa	A-150 Tejido Equiv. Plástico
		$\rho=1.2048 \times 10^{-3}$ g/cm ³	$\rho=1$ g/cm ³	$\rho=2.32$ g/cm ³	$\rho=1.49$ g/cm ³	$\rho=1.127$ g/cm ³
Ra-226	4.78	0.95	914.00	1576.21	1201.39	1057.69
Rn-222	5.49	0.92	885.50	1530.04	1164.73	1024.56
Ra-224	5.69	0.86	828.60	1437.70	1091.57	958.63
Po-218	6.00	0.86	827.50	1435.85	1090.23	957.27
Rn-220	6.29	0.84	807.80	1403.60	1064.75	934.28
Po-216	6.78	0.81	777.70	1354.18	1026.01	899.35
Po-214	7.69	0.78	751.70	1311.50	992.34	869.14
Po-212	8.78	0.76	734.00	1282.26	969.39	848.63

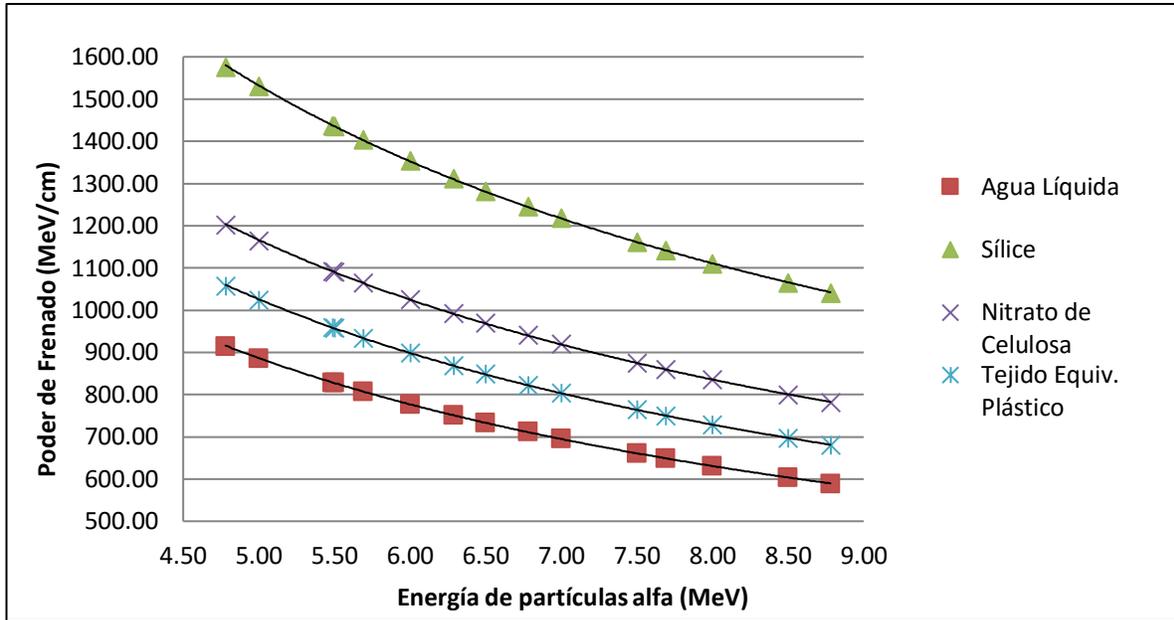


Figura 1.7: Poder de frenado de partículas alfa en diferentes materiales

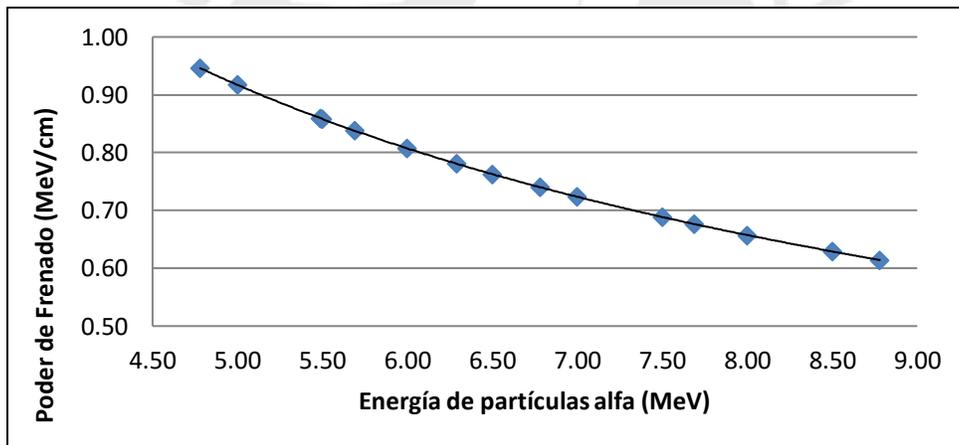


Figura 1.8: Poder de frenado de partículas alfa en aire seco

1.1.2.2 RANGO DE UNA PARTÍCULA ALFA (R)

El Rango de una partícula cargada como la alfa es un concepto que proporciona la distancia total que recorre la partícula hasta quedar en reposo dentro de un medio absorbente. La mayoría de las interacciones electrónicas y nucleares que sufre una partícula alfa transfieren de manera gradual y continua sólo una pequeña fracción de su energía cinética inicial (E_{K0}). El rango se obtiene al integrar el recíproco del poder de frenado total con respecto a la energía [14,15].

$$R = \int_{E_{K0}}^0 \left[-\frac{dE}{dx} \right]^{-1} dE \quad (1.9)$$

La proyección del Rango sobre el eje de incidencia de una partícula alfa en el medio absorbente se denomina Rango Proyectado, que es valor promedio de la profundidad a la cual una partícula alfa penetrará hasta llegar a un estado de reposo. El Rango siempre es mayor que el Rango Proyectado y esto se debe a que el número de colisiones por unidad de distancia recorrida y la energía perdida en cada colisión son variables aleatorias, por lo que no todas las partículas alfas irán a penetrar la misma distancia desde la superficie del medio absorbente, sino que existirá una distribución espacial de estas partículas, que tienen la misma energía cinética inicial [16].

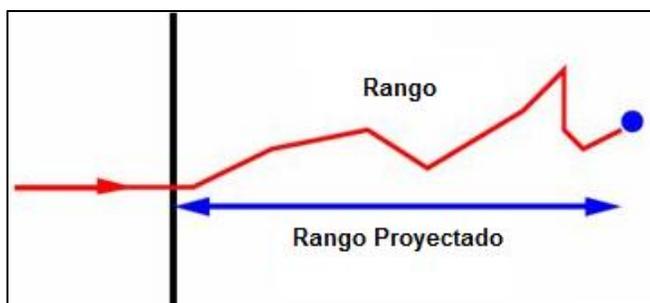


Figura 1.9: Rango y rango proyectado [14].

Para estimar el Rango Proyectado de las partículas alfa en el aire se puede usar la siguiente fórmula empírica $R = 0.318E^{3/2}$, donde R está dado en [cm] y la energía E en [MeV]. El Rango proyectados en sólidos se obtiene a partir de la ecuación $R = 3.2 \times 10^{-4} (A/\rho)^{1/2}$, donde A es el número de masa del sólido y ρ es su densidad en g/cm^3 [14,15].

Con la ayuda del software SRIM se calculó el rango proyectado alcanzado por partículas alfas que atraviesan diferentes tipos de materiales [17].

Tabla 1.5: Energía de partículas alfa y rango proyectado [17]

Núcleo Padre	Energía alfa (MeV)	Rango Proyectado					
		Aire Seco ^a (mm)	Agua ^b (um)	A-150 Tejido Equiv. Plástico ^c (um)	Nitrato de Celulosa ^d (um)	Concreto ^e (um)	Silice ^f SiO ₂ (um)
		$\rho=1.2048 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$	$\rho=1 \text{ g/cm}^3$	$\rho=1.127 \text{ g/cm}^3$	$\rho=1.49 \text{ g/cm}^3$	$\rho=2.34 \text{ g/cm}^3$	$\rho=2.32 \text{ g/cm}^3$
Ra-226	4.78	33.57	34.02	28.88	26.23	19.45	20.46
Rn-222	5.49	41.36	41.93	35.67	32.22	23.90	25.03
Ra-224	5.69	43.69	44.30	37.70	34.01	25.23	26.39
Po-218	6.00	47.42	48.08	40.96	36.87	27.34	28.55
Rn-220	6.29	51.04	51.75	44.13	39.64	29.39	30.65
Po-216	6.78	57.43	58.24	49.72	44.54	33.00	34.33
Po-214	7.69	70.20	71.20	60.95	54.32	40.18	41.66
Po-212	8.78	87.02	88.19	75.73	67.16	49.59	51.22

^aICRU-276; ^bICRU-104; ^cICRU-099; ^dICRU-138; ^eSRIM; ^fICRU-245. ρ =densidad.

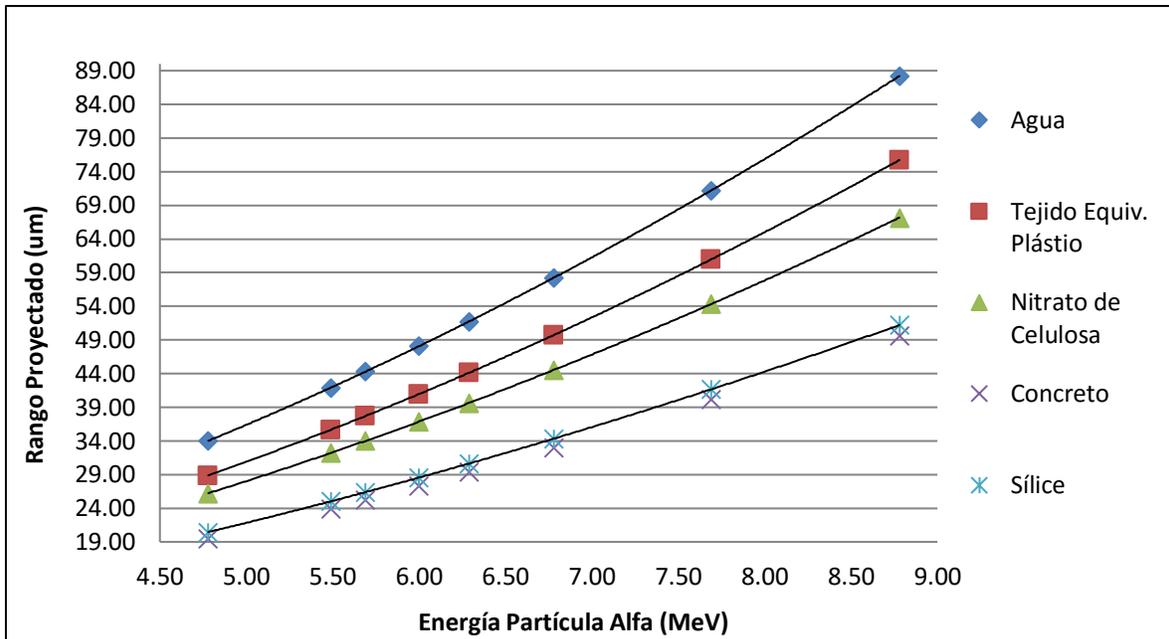


Figura 1.10: Rango proyectado de partícula alfa en diferentes materiales

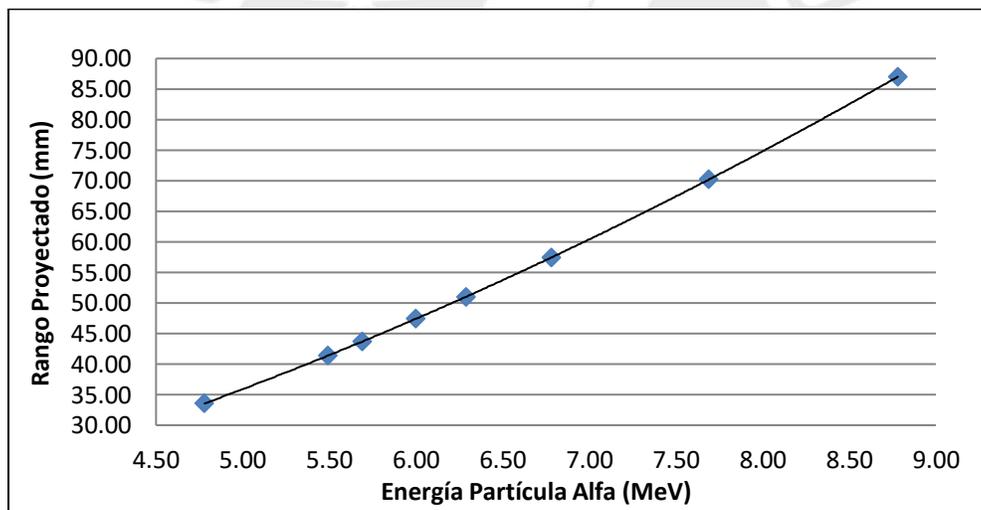


Figura 1.11: Rango proyectado de partícula alfa en aire seco

1.1.2.3 CURVA DE BRAGG

Si graficamos el poder frenado de la partícula alfa con respecto a su distancia de penetración obtenemos la curva de Bragg, la cual alcanza su máximo, conocido como pico de Bragg, a una distancia de penetración que depende de la energía cinética original de la partícula. La forma de esta curva se explica a que el fenómeno de interacción se da de la siguiente manera: durante el recorrido en el medio la partícula cargada tiene su carga desnuda, y su pérdida de energía dE/dx

aumenta al disminuir su velocidad. Al llegar a velocidades bajas parte de la carga de la partícula cargada se recombina, reduciendo por completo su valor de dE/dx [14]. Con la ayuda del software SRIM, graficamos la curva de Bragg de una partícula alfa de energía 4.78 MeV en aire seco (ICRU), cuyo rango proyectado es 33.57 mm [17].

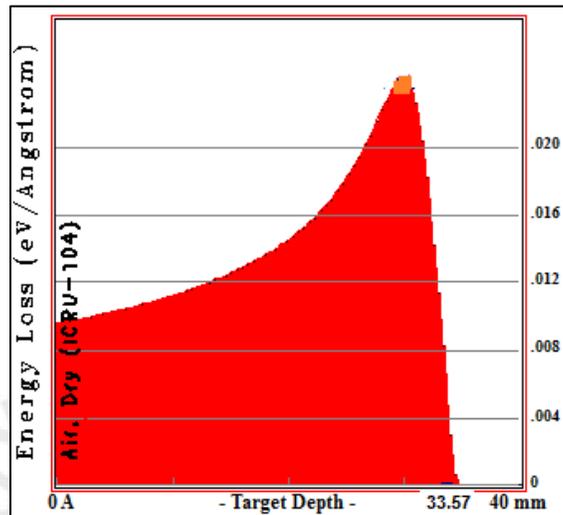


Figura 1.12: Curva de Bragg de la atenuación de una partícula alfa de energía 4.78 MeV, en aire [17]

1.2 RADÓN

Radón es un gas natural y de núcleos inestables o radiactivos que se origina como producto de la desintegración de isótopos de Radio en el seno de la corteza terrestre, desde donde migra hacia la atmósfera; una vez en esta se dispersa y desintegra emitiendo partículas alfa y núcleos hijos o progenie (también radiactivos), estos últimos se adhieren a pequeñísimas partículas, aerosoles atmosféricos, que siempre están presentes en el aire. Cuando las personas inhalan una fracción de estos núcleos hijos se fijan en los diversos tramos del tracto respiratorio y decaen emitiendo partículas alfa que bombardean y ocasionalmente lesionan las células epiteliales, lo que a la larga puede ocasionar un cáncer de pulmón. Afortunadamente, sus concentraciones en la atmósfera exterior suelen ser tolerables a los efectos señalados; sin embargo, en el interior de recintos como: viviendas, oficinas, sótanos, etc. las concentraciones alcanzadas son varias veces superiores a las de la atmósfera exterior. Ello es debido a que el Radón desprendido del piso, paredes y techo de los recintos, a causa del reducido espacio disponible y de la escasa ventilación, experimenta una acumulación superior a la de la atmósfera exterior. Esta circunstancia justifica que el Radón haya merecido la atención por parte de muchos países, incluido el nuestro [18].

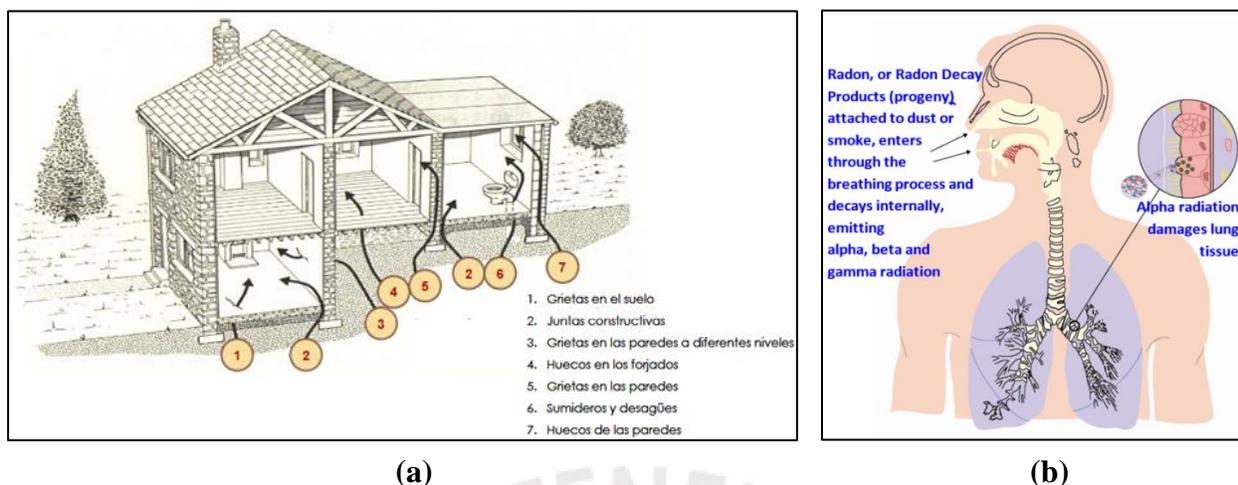


Figura 1.13: (a) Ingreso de Radón a recintos [19]. (b) Daño del tejido pulmonar por la progenie del Radón [20].

1.2.1 ISÓTOPOS DE RADÓN

Los isótopos del radón en la naturaleza (Rn-222, Rn-220 y Rn-219), son producidos en minerales por el decaimiento de isótopos de radio (Ra-226, Ra-224 y Ra-223), que a su vez son productos de las series radiactivas naturales que empiezan con el Uranio-238 (U-238), Torio-232 (Th-232) y Uranio-235 (U-235) [5,18].

El U-238, Th-232 y U-235 son núcleos inestables o radiactivos, que existen en la corteza terrestre desde la existencia de la tierra; sus periodos de semidesintegración o vida media ($T_{1/2}$) son: 4.468×10^9 , 14.04×10^9 , 0.7×10^9 años respectivamente; y estos son del orden de magnitud de la edad de la tierra (aproximadamente 4.47×10^9 de años), lo cual explica que existan en la actualidad cantidades apreciables de los tres y, en consecuencia, de sus descendientes que continuamente origina cada uno [5,18].

En la figura 1.14-(a), representamos esquemáticamente la serie de decaimiento radiactivo del U-238, dentro del cual encontramos el isótopo Rn-222 ó Radón ($T_{1/2} = 3.82$ días). El Rn-222, a su vez tiene dos descendientes de estado sólido y de vida corta los cuales son: El Polonio-218 ($T_{1/2} = 3.05$ minutos) y el Polonio-214 ($T_{1/2} = 0.00164$ s). El Rn-222, por su carácter de gas inerte, se encuentra libre en la naturaleza originándose dondequiera que existan minerales de U-238 [5,18].

En la figura 1.14-(b), representamos esquemáticamente la serie de decaimiento radiactivo del Th-232, dentro del cual encontramos el isótopo Rn-220 ó Torón ($T_{1/2} = 55.6$ s). El Rn-220, a su vez tiene dos descendientes de estado sólido y de vida corta los cuales son: El Polonio-216 ($T_{1/2} = 0.145$ s) y el Polonio-212 ($T_{1/2} = 3 \times 10^{-7}$ s). El Rn-220, por su carácter de gas inerte, al igual que el Rn-222 se encuentra libre en la naturaleza, originándose dondequiera que existan minerales de Th-232 [5,18].

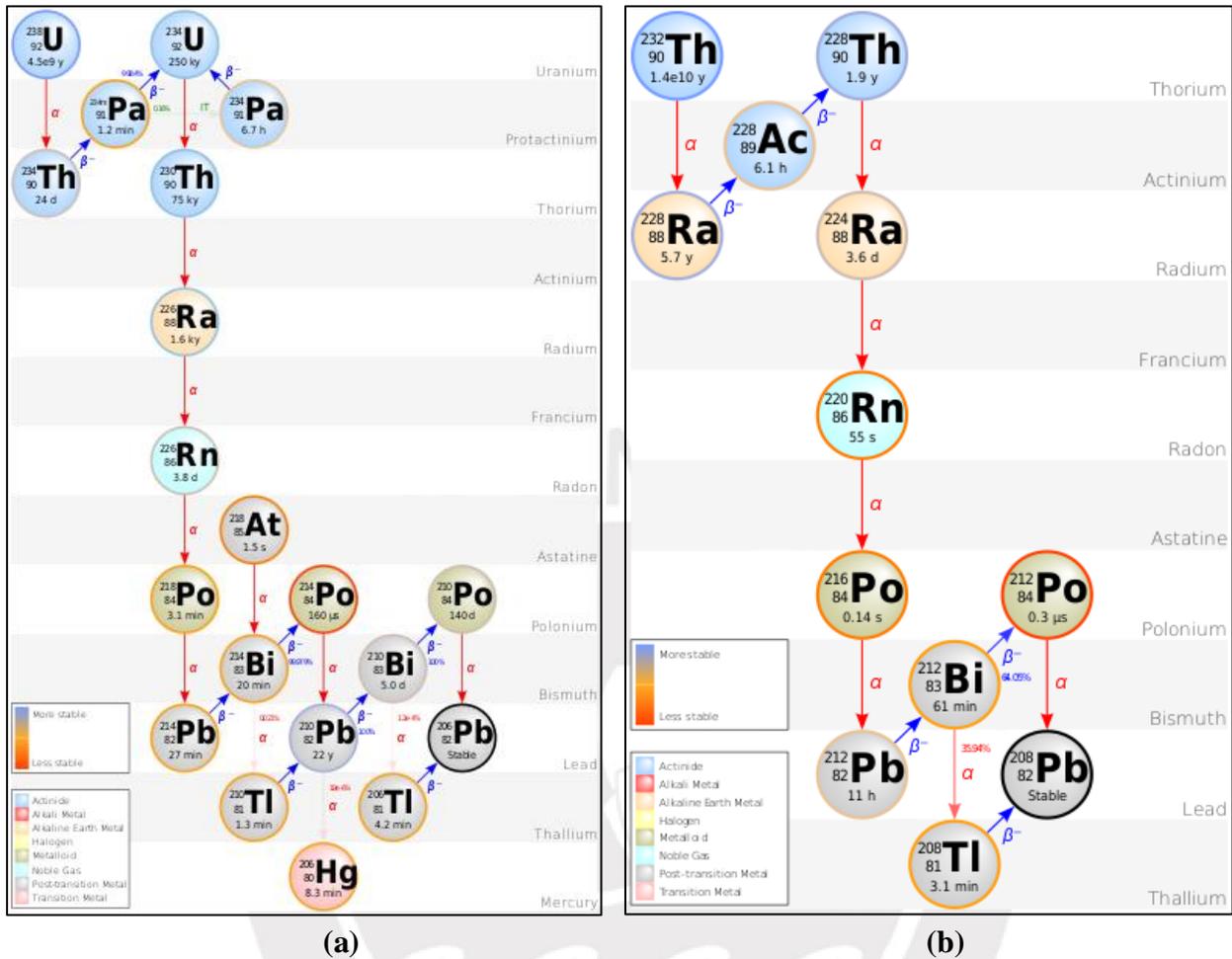


Figura 1.14: (a) Serie Radiactiva U-238 [21]. (b) Serie Radiactiva Th-232 [22].

En la serie de decaimiento radiactivo del U-235 encontramos el isótopo Rn-219 o Actinón. La presencia del Rn-219 en la naturaleza es insignificante y esto se debe a que tiene una vida media muy corta ($T_{1/2} = 3.96$ s.) y a las generalmente bajas concentraciones de U-235 en la corteza terrestre ($U^{235} / U^{238} = 0.0079$) [5,18].

1.2.2 FORMACIÓN Y EMANACIÓN DE RADÓN

Se define como emanación a la fracción de átomos de Rn-222 y Rn-220 formados en un mineral, por el decaimiento de isótopos de Radio (Ra-226, Ra-224), que salen hacia los poros. Como la emanación ocurre en una manera similar para ambos Rn-222 y Rn-220, sólo los principios de la desintegración y emanación de Rn-222 se tratan aquí. Cuando el Ra-226 se desintegra se forman un átomo de Rn-222 y una partícula alfa. Cuando la partícula alfa es eyectada desde el Ra-226, un

efecto de retroceso surge en el átomo de Rn-222. Esto disloca al átomo de Rn-222 del lugar de la red del mineral o molécula donde el átomo de Ra-226 estuvo. La distancia que el átomo de Rn-222 puede ser movido en el grano del mineral de densidad normal es: 20 – 70 μm . Es este mismo movimiento lo que permite que del átomo de Rn-222 emane de un grano mineral. Las diferentes teorías sobre los casos de emanación que se podrían presentar en el mineral son las siguientes [5]:

Caso 1: El átomo de Radón es trasladado dentro del cristal adyacente por el efecto de retroceso de la partícula alfa eyectada.

Caso 2: El átomo de Radón es trasladado a través del cristal.

Caso 3: El átomo de Radón es trasladado del cristal a una micro-fisura o al aire en un poro adyacente. El transporte adicional en la microfisura es por difusión.

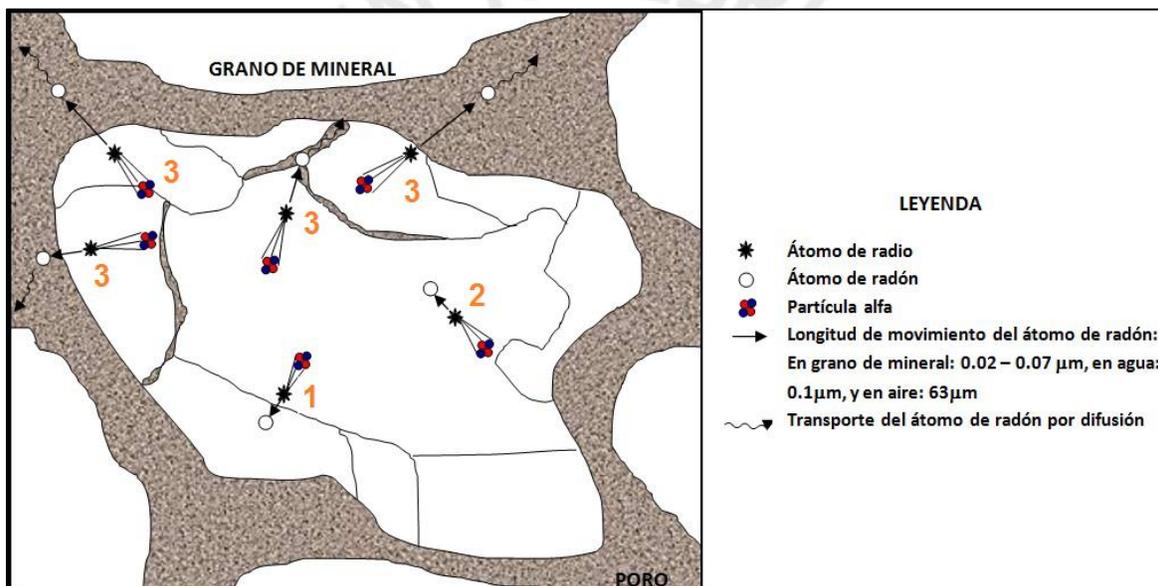


Figura 1.15: Esquema de los principios de emanación de Radón en un grano de mineral [5].

1.2.3 CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN SUELO

El suelo está formado por granos de diferentes tamaños, producto de la fragmentación de las rocas, entre ellas tenemos: la arcilla, limo, arena y grava.

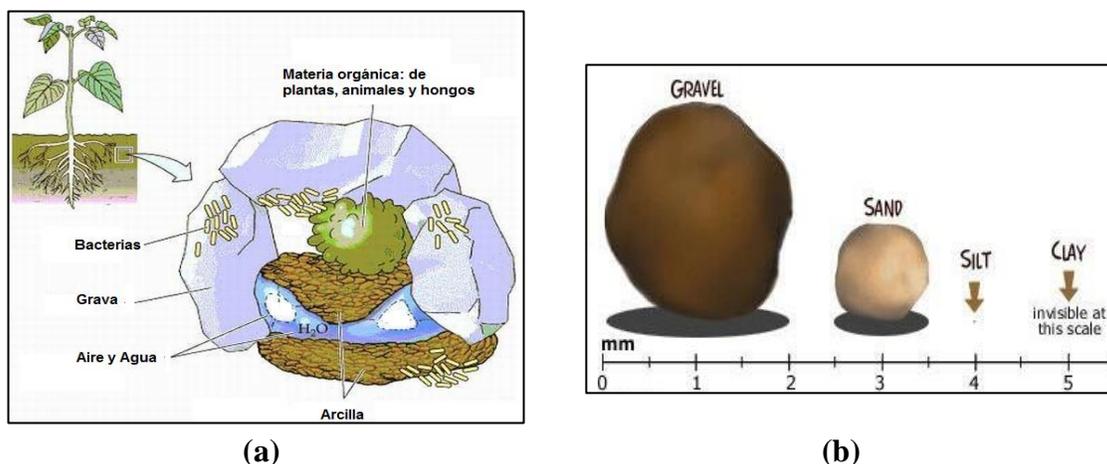


Figura 1.16: (a) Estructura del suelo [23]. (b) Tipos de granos: Grava (gravel), arena (sand), limo (silt), arcilla (clay) [24].

Estos granos están compuestos por varios minerales, siendo el más abundante entre ellas el cuarzo SiO_2 (Sílice). Los minerales (tamaño 50 – 800 μm) a su vez varían ampliamente en sus contenidos de U-238 y Th-232, quienes generan el Ra-226 y Ra-224 los cuales son núcleos padres del Rn-222 y Rn-220 respectivamente [5].



Figura 1.17: Granos de arena que contienen minerales de Sílice SiO_2 (cuarzo), el cual a su vez contiene Uranio que finalmente da origen al gas Radón.

La UNSCEAR (Comité científico de Naciones Unidas sobre el efecto de la radiación) presentó en su informe del año 2008, volumen I, titulado: “Fuentes y efectos de la radiación ionizante”, que el valor promedio mundial de la actividad específica o concentración de U-238 y Th-232 en el suelo es $37 \pm 4 \text{ Bq/Kg}$ y $33 \pm 3 \text{ Bq/Kg}$ respectivamente. También desarrollaron el mapa mostrado en la figura 1.18, donde se puede ver la variación de la razón U-238 / Th-232 en diferentes países del mundo. En algunos países el norte de África y Europa U-238 / Th-232 > 1 , lo que indica que en esos lugares hay mayor concentración de U-238. En la mayoría de países en el Asia U-238 / Th-232 < 1 , lo que indica que predomina la presencia de Th-232. Y en la mayoría de ciudades de Norte

América U-238 / Th-232 = 1. Como se puede apreciar este estudio no involucra a América del Sur [1].

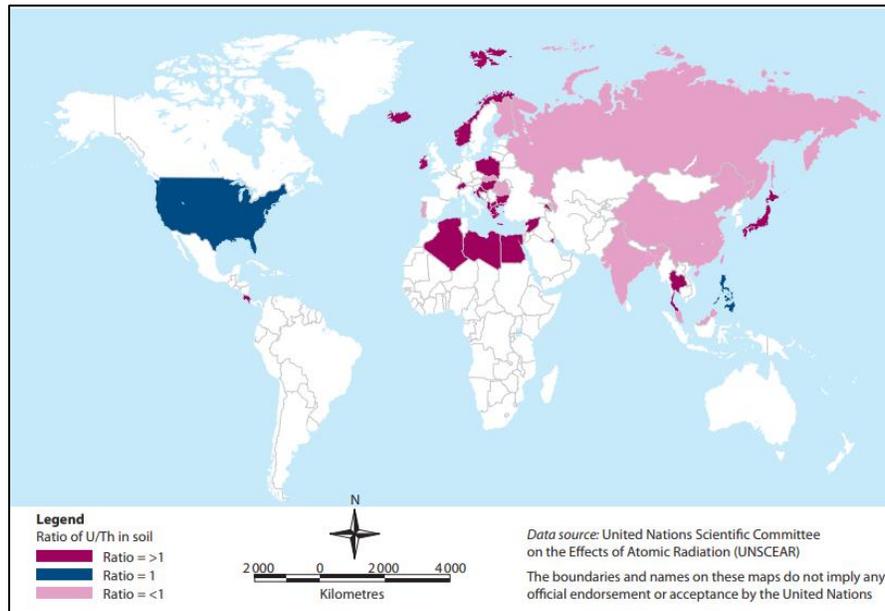


Figura 1.18: Razón U-238 / Th-232 en el suelo [1]

Mientras más pequeña y porosa sea la partícula en que el átomo de Radón es formado, hay mayor oportunidad que el átomo escape de este y se genere así una mayor concentración de Radón en el suelo [5].

Tabla 1.6: Tamaño y porosidad de granos de suelo [5]

Tipos de suelo y roca	Tamaño del grano	Porosidad (%)
Arcilla fina	<0.6 um (la mayoría de los granos de arcilla son < 0.06 um)	40-70
Arcilla gruesa	0.6-2 um	
Limo	2-60 um	35-50
Arena	60-2000 um	25-50
Grava	2000-60000 um	25-40
Roca	---	5-50

Como se puede apreciar en la tabla 1.6, las partículas de arcilla son tan pequeñas que una gran fracción de átomos de Radón formados deberían emanar de ellos al aire o agua en los poros cuando los átomos de Radio se desintegran. Esto explica por qué existe una alta emanación del 30 – 70% de todos los átomos de Radón, han sido medidos en arcilla.

Es más difícil explicar cómo la emanación de la arena seca y grava pueden llegar al 30 %. Algo más que el efecto de retroceso es requerido para explicar tal figura. Ek y Ek (1995) han estudiado la concentración de Radio en diferentes tamaños de partículas de grava y arena gruesa. Ellos

encontraron que una de las explicaciones de la mejorada emanación se debe a que los átomos de Radio han sido precipitados sobre la superficie de los granos y sus fisuras [5].

La emanación del Torón en suelo ha sido estudiada por Megumi y Mamuro (1974). Ellos encontraron que alrededor del 10 % del torón formado es emanado de la arena, limo y arcilla producida por la erosión de granito [5].

Tabla 1.7: Emanación de átomos de Radón de poros con aire en varios suelos y roca triturada [5].

Tipo de suelo y roca triturada	e (%)
Grava	15-40
Arena	15-30
Arcilla	30-70
Roca triturada (tamaño de la partícula 1 – 8 mm)	5-15
Uranio triturado, enriquecido con granito (tamaño de la partícula 1 – 8 mm)	15-30

Las concentraciones de Radón y Torón en el aire del suelo o aguas subterráneas son determinadas por su concentración de Radio, cuántos de los átomos de Radón y Torón se emanan a los poros desde el grano del mineral en el cual ellos son formados, la porosidad, contenido de agua del suelo y además por la forma en como estos son transportados desde el suelo hacia la atmósfera.

Si la concentración de Radio, porosidad y emanación para un tipo de suelo son conocidos, la máxima concentración de Radón que puede ocurrir en los poros cuando están completamente llenos de ya sea de agua o de aire puede ser calculada a partir de la ecuación 1.10.

$$C_{max} = Aed(1 - p)/p \quad (1.10)$$

Donde C_{max} es la concentración o actividad específica del Radón (Bq/m^3) en el volumen del poro con nada de ventilación (0 ach, ach significa cambio de aire por hora); A es la actividad específica del Radio (Bq/kg), e es la emanación; d es la densidad compacta (kg/m^3) de los minerales del suelo (el valor común para minerales del suelo: $2700 kg/m^3$), p es porosidad (razón del volumen del poro al volumen total). Esta fórmula no es plenamente universal, cuando la concentración de los átomos de Radón por unidad de volumen en el poro iguala a los que están alrededor del grano de mineral, el paso del Radón a los poros cesa. En otras palabras, la concentración de gas Radón por unidad de volumen en el poro no puede ser mayor que su concentración en el grano de mineral. Esto ocurre cuando $p < e$.

Si un suelo cuyos poros están completamente llenos de aire, con una actividad específica de 10 Bq/kg de Radio-226, 0.03 (30%) de porosidad, densidad compacta del mineral de $2700 kg/m^3$ y 25 % de emanación. La concentración de Radón-222 (C_{max}) es aprox. $16\ 000 Bq/m^3$ por 10 Bq/kg de Radio-226. Si mantenemos las mismas condiciones anteriores, pero cambiando la actividad específica a 50 Bq/kg de Radio-226, la concentración de Radón-222 (C_{max}) es aprox. $80\ 000$

Bq/m³. Con estos resultados podemos darnos cuenta que la concentración de Radón aumenta con el aumento de la concentración de Radio en el suelo [5].

Tabla 1.8: Concentraciones normales de Ra^{226} y Rn^{222} en aire de suelo, medido a un metro de profundidad [5].

Tipo de Suelo	Ra^{226} (Bq/Kg)*	Rn^{222} (Bq/m ³)
Tierra cultivada o residual con contenido de radio normal.	15-65	5 000 – 30 000
Tierra cultivada o residual con fragmentos de granito.	130 – 125	10 000 – 60 000
Cultivo con fragmentos de uranio enriquecido con granito.	125 – 360	10 000 – 200 000
Grava	30-75	10 000 – 150 000
Arena	5-35	2 000 – 20 000
Limo	10-50	5 000 – 60 000
Arcilla	10-100	10 000 – 100 000
Suelo que contiene fragmentos de pizarra de alumbre.	175 – 2 500	50 000 > 10 ⁶

*12.3 Bq/Kg de Ra^{226} es equivalente a 1 ppm (parte por millón) de Uranio.

1.2.4 CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

El U-238 y Th-232 y sus descendientes se hallan presentes, en concentraciones diversas en todos los materiales que conforman la corteza terrestre. Los materiales de construcción, que utilizamos en nuestra vida diaria, proceden directa o indirectamente de esa corteza, por lo tanto, ocurrirá que también estos tendrán cantidades diversas de estos mismos núcleos. Finalmente, todo esto quiere decir que los materiales de construcción también son emisores de los isótopos de Radón. En la Tabla 1.9 y 1.10 presentamos valores promedios de concentración de Ra-226, Th-232 en diferentes tipos de materiales de construcción que provienen de Suecia y Alemania [5, 18]. Cabe mencionar que, en nuestro país, aún no se han realizado evaluaciones de los contenidos de material radiactivo como el Ra-226 y Th-232, en materiales de construcción.

Tabla 1.9: Contenidos de Ra-226 y Th-232 en algunos materiales de construcción suecos. Los materiales reflejan la posible emisión de Radón y Torón [5].

Material	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)
Concreto liviano, en base de alúmina	788-2 627	19-96
Clínker de arcilla	137-189	161-184
Ladrillo	40-164	71-180
Concreto liviano, a base de arena	3-132	4-157
Concreto	31-63	46-127
Caliza	7-15	4-10
Yeso, natural	2-9	0-12

Tabla 1.10: Contenidos de Ra-226 y Th-232 en algunos materiales de construcción alemanes. Los materiales reflejan la posible emisión de Radón y Torón [5]

Material	Ra-226 (Bq/kg)	Th-232 (Bq/kg)
Granito	30-500	17-311
Ladrillo	10-200	12-200
Concreto liviano	6-80	1-60
Yeso	2-70	2-100
Concreto	7-92	4-71
Caliza	4-41	2-20

1.2.5 TRANSPORTE DE RADÓN

El Radón se transporta en un medio básicamente por dos medios: difusión y convección.

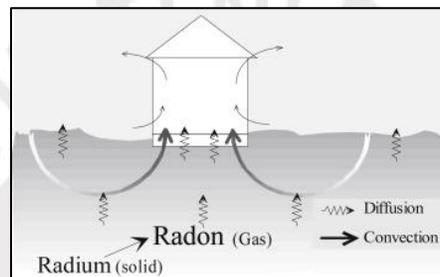


Figura 1.19: Transporte de Radón [25]

1.2.5.1 DIFUSIÓN

Se da cuando las moléculas migran desde el lugar de máxima concentración a otros lugares de menor concentración. Por ejemplo, si en un extremo de una habitación cerrada colocamos un frasco de colonia, al poco tiempo percibiremos el aroma en todo el recinto y esto se debe a que las moléculas aromáticas han emigrado por difusión. Un parámetro importante para este tipo de transporte es la determinación del **Constante de Difusión D** para diferentes tipos de suelos y rocas, que es el que muestra la facilidad con que el radón se mueve en un determinado medio. El significado de D se puede obtener a partir de la Ley de Fick (en valor absoluto) [18].

$$\phi = D \frac{dc}{dz} \quad (1.11)$$

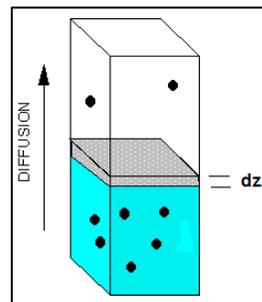


Figura 1.20: Difusión [26]

Siendo \emptyset la intensidad de la corriente de átomos de radón (N° átomos Rn/cm^2s), D el coeficiente de difusión (característico del medio); dC/dz es el gradiente de concentración (N° átomos Rn/cm^3). De la ecuación 1.11, se deduce que:

$$[D] = \frac{\left(\frac{\text{átomos } Rn}{cm^2s}\right)}{\frac{\frac{\text{átomos } Rn}{cm^3}}{cm}} = cm^2/s \quad (1.12)$$

Por consiguiente, D representa la intensidad de la corriente de átomos, normalizada a un gradiente de concentración unidad. Como vemos en la tabla 1.11, la constante de difusión en agua es menor por un factor de 10 0000 que la constante de difusión en aire. El movimiento difusivo en el suelo y roca está controlado por la extensión de la porosidad abierta y conectada. En general, una mayor porosidad permite un transporte difusivo más extenso [18].

A partir del coeficiente de difusión se puede obtener una expresión sencilla relacionada con él y que es útil en la descripción del proceso de transporte. Así, podemos determinar la **distancia de difusión L** promedio del movimiento de un isótopo de radón antes de que este desaparezca por decaimiento, dada por la siguiente ecuación [18]:

$$L = \sqrt{D\bar{T}} \quad (1.13)$$

Donde $L[cm]$ es la distancia de difusión promedio, $\bar{T}[s]$ es la media vida del isótopo y $D [cm^2/s]$ es la constante de difusión.

Así, la distancia de difusión promedio que recorre el Radón es alrededor de 155 cm en un suelo poroso seco, pero sólo 1.55 cm en un suelo poroso saturado con agua. En el caso del Torón recorre una distancia promedio de 2.0 cm en un suelo poroso seco, pero sólo 0.02 cm en un suelo poroso saturado con agua [5].

Tabla 1.11: Distancia de difusión promedio de los isótopos de Radón en diferentes medios [5]

Medio	Distancia de difusión $L [cm]$		Constante de difusión $D[cm^2/s]$
	Rn^{222}	Rn^{220}	
Aire	220	2.85	10^{-1}
Suelo poroso seco	155	2.0	5×10^{-2}
Agua	2.2	0.0285	10^{-5}
Suelo poroso saturado con agua	1.55	0.020	5×10^{-6}

Las distancias de difusión promedio dadas en la tabla 1.11 son importantes para establecer límites en el movimiento efectivo del $Rn-222$ y el $Rn-220$ en la ausencia de mecanismos de transporte especiales. Según la tabla 1.11, las entradas de Radón a las bases de las casas u otros recintos provienen principalmente del suelo que está, no más allá, de 1 o 2 metros de la casa (una fuente muy local). También se podría decir que, el $Rn-222$ es hasta ahora el núcleo dominante, y $Rn-220$

proporciona solo un fondo local; pero debemos tomar en cuenta que las relaciones Th / U excepcionalmente altas, sin embargo, pueden conducir a una mayor difusión de Rn-220 en comparación con el Rn-222. Un ejemplo famoso es en el estado de Kerala en India, donde las arenas de monacita ($ThPO_4$) pueden producir abundante liberación de Rn-220 que es potencialmente importante para la salud. En un trabajo realizado por Silker y Kalkwarf (1983), encontraron diferentes valores de D de los presentados en la tabla 1.12. Ellos encontraron que para un grupo de 32 suelos que se extienden desde la arcilla hasta la arena sedimentosa, los valores de D varían desde 0.005 a $0.062 \text{ cm}^2/\text{s}$, con un promedio de $0.03 \text{ cm}^2/\text{s}$. La considerable variabilidad implica que cuando se desea un valor preciso de D , el suelo real de interés debería ser medido utilizando muestras múltiples [5].

Tabla 1.12: Valores experimentales promedio del coeficiente de difusión y la distancia de difusión de Rn-222 en algunos materiales [27]

Material	Espesor [cm]	Constante de difusión D [cm^2/s]	Distancia de difusión L [cm]	Valoración
Yeso	10	23.5	110	Permeable
Piedra pómez	15	15.0	85	Permeable
Caliza	15	03.4	40	Permeable
Ladrillo	15	03.5	40	Permeable
Arenisca	10	22.0	100	Permeable
Concreto poroso	10	13.0	80	Permeable
Concreto	10	0.07	6	Permeable
Polímero de concreto PPC	4	$<10^{-5}$	0.7	Impermeable
Granito	3	0.53	16	Permeable
Placas de vidrio	7	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Asfalto, asbesto	0.3	10^{-5}	0.07	Impermeable
Betún	0.3	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Lámina PEHD	0.1	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Goma de silicona	0.3	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Lámina de plomo	0.01	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Goma de butilo	0.15	10^{-4}	0.2	Permeable
Revestimiento de poliuretano	0.5	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Lámina de plástico	0.3	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable
Resina epoxy	0.3	$<10^{-5}$	<0.07	Impermeable

1.2.5.2 CONVECCIÓN

Los gradientes de presión en el suelo pueden causar el flujo de gas o líquido en el espacio intersticial en la tierra, la facilidad de dicho flujo está dada por la permeabilidad hidráulica k .

$$k = \left[\frac{\eta(dV/dt)}{A(dP/dz)} \right] \quad (1.14)$$

Donde η es la viscosidad, $(dV/dt)/A$ es el volumen movido por unidad de tiempo y por unidad de área, y (dP/dz) el gradiente de presión. K está en unidades de longitud al cuadrado, ya sea

cm^2 o un darcy = $10^{-8} cm^2$. La tabla 1.13 muestra el amplio espectro de valores que son encontrados para la permeabilidad hidráulica [5].

Tabla 1.13: Valores representativos de la permeabilidad hidráulica [5]

Sustancia	Rango de permeabilidad (cm^2)
Polvo de pizarra negra	$4.9 \times 10^{-10} - 1.2 \times 10^{-9}$
Polvo de sílice	$1.3 \times 10^{-10} - 5.1 \times 10^{-10}$
Arena	$2.0 \times 10^{-7} - 1.8 \times 10^{-6}$
Suelo	$2.9 \times 10^{-9} - 1.4 \times 10^{-7}$
Arenisca	$5.0 \times 10^{-12} - 3.0 \times 10^{-8}$
Piedra caliza, dolomita	$2.0 \times 10^{-11} - 4.5 \times 10^{-10}$
Ladrillo	$4.8 \times 10^{-11} - 2.2 \times 10^{-9}$
Concreto bituminoso	$1.0 \times 10^{-9} - 2.3 \times 10^{-7}$
Tablero de corcho	$3.3 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-5}$
Fibra de vidrio	$2.4 \times 10^{-7} - 5.1 \times 10^{-7}$

1.2.6 EXHALACIÓN

Una vez que los átomos de los isótopos de Radón han migrado hacia la superficie de un medio, estos son expulsados hacia la atmósfera exterior o hacia un recinto. Existe una magnitud llama exhalación que me proporciona el número de átomos de radón emitidos en un segundo por una superficie terrestre de $1 cm^2$, y se puede expresar por la siguiente ecuación [18]:

$$\phi_0 = 0.037 CdeL \quad (1.15)$$

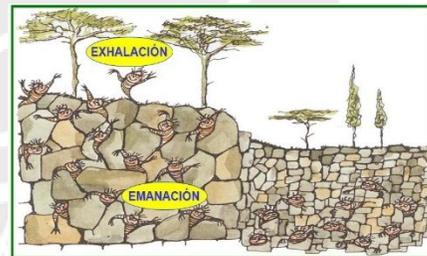


Figura 1.21: Esquema del proceso de exhalación del gas Radón [28]

Donde:

ϕ_0 [átomo de radón/($cm^2 \cdot s$)] = exhalación

C [pCi/g] = actividad específica o concentración de radio en el suelo

d [g/cm³] = densidad del material

e = emanación

L [cm] = distancia de difusión

Vemos que Φ_0 depende de las características físicas del medio difusor (d,e,L) y de la concentración de Radio. En general, las características físicas de la corteza suelen ser parecidas de unos lugares a otros, por lo que el parámetro más influyente en la exhalación es la concentración del Radio. Para tener una idea acerca del valor de Φ_0 vamos a tomar valores típicos de concentración de Radio $C=1$ (10^{-12} gRa/g = 1 pCi/g = 0.037 Bq/g), $d=1$, $e=0.36$ y $L=100$ cm. Resulta así un valor de $1.33 \text{ átomos}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \cong 10000 \text{ átomos}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, que coincide bastante bien con el valor medio experimental asignado a los continentes. En particular se viene aceptando el valor dado por Wilkening, que no difiere prácticamente del anterior: $0.8 \text{ átomos}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cong 0.45 \text{ pCi}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. El valor dado por Guedalia es muy parecido $0.5 \text{ pCi}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Se puede comprobar que la intensidad de la fuente de radón $10000 \text{ átomos}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ equivale a $18 \text{ Ci}/(\text{Km}^2 \cdot \text{año})$, es decir cada Km^2 de superficie emite anualmente 18 Ci, que como actividad representa una cifra importante. Los 18 Ci de Radón desprendidos en un año por cada Km^2 de superficie terrestre equivalen a unos 2500 millones de Ci para el área de todos los continentes (aproximadamente 140 millones de Km^2) [18].

Tabla 1.14: Valores de la exhalación anual de Rn-222 [18]

Origen	Ci/año	%
Exhalación continental	2×10^9	78.7
Aguas subterráneas	5×10^8	19.7
Exhalación oceánica	3×10^7	1.2
Residuos de fosfatos	3×10^6	0.12
Minería de uranio	2×10^6	0.11
Escorias y cenizas del carbón	2×10^4	0.001
Combustión del carbón	9×10^2	3.5×10^{-5}
Exhalación humana	10	4×10^{-7}
Total	2.54×10^9	

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

1.3 RADÓN EN INTERIORES

Las contribuciones principales de Radón en interiores provienen del piso, paredes y techo; otros parámetros que determinan su permanencia son el aire que fluye, temperatura y humedad de dicho ambiente.

1.3.1 INFLUENCIA DE LA VENTILACIÓN

En el trabajo desarrollado por Neetika Chauhan y col. (2014) [29], se hizo la estimación por simulación de la distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 en planos horizontales a diferentes distancias desde el piso (1.22, 1.83 y 2.44 m) dentro de un recinto cerrado (dimensiones $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$), con tres puertas; también se consideró que una de las puertas estaba en contacto con el entorno exterior y las otras dos se consideraban internas. Ellos encontraron que la concentración de Rn-222 dentro del recinto no es uniforme, a pesar de estar cerrada y que está vinculada a la distribución del campo vectorial del viento (o corriente de aire) dentro del recinto. Estos resultados fueron validados con medidas experimentales.

Tabla 1.15: Comparación de la simulación con las mediciones experimentales a un $Z= 1.22$ de la concentración de Rn-222 en Bq/m^3 [29]

Locación	Medición experimental		Simulación
	Detector activo	Detector pasivo	
Esquina 1	27 (35%)	30 (50%)	20
Esquina 2	24 (14.3%)	30 (42.9%)	21
Esquina 3	27 (0%)	30 (11.1%)	27
Esquina 4	18 (38.5%)	8 (38.5%)	13
Centro	22 (4.3%)	42 (82.6%)	23
Promedio	23.6 (13.5%)	28 (34.6%)	20.8

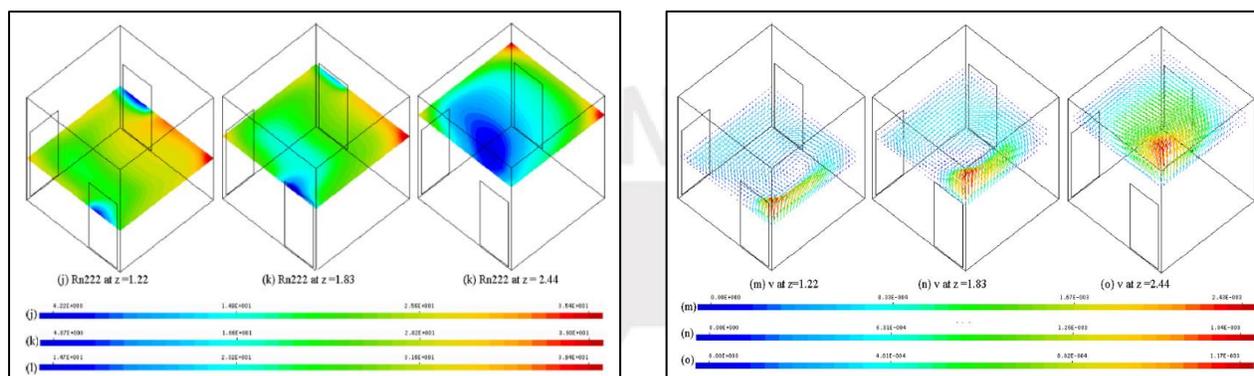


Figura 1.22: (a) Distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 en planos a diferentes distancias desde el piso [29]. (b) Campo vectorial del movimiento del aire, que asocia a cada punto de la superficie un vector velocidad y la dirección del viento en dicho punto [29].

En otro trabajo, Keramatollah Akbari y col. [30] evaluaron el impacto de la tasa de ventilación en la distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 en un plano horizontal a una distancia desde el piso de 2.1 m dentro de un recinto, por medio de mediciones experimentales, simulación y solución analítica. Los resultados obtenidos muestran que los niveles de Radón-222 fueron inversamente proporcionales a la tasa de cambio de aire.

Tabla 1.16: Influencia de la tasa de ventilación en los resultados de concentración de Rn-222 en Bq/m^3 [30]

Tasa de cambio de aire (ach)	Mediciones	Solución analítica	Simulación
0.0	3580	3582	--
0.25	90	106	107
0.5	45	53	55
1.2	25	22	20

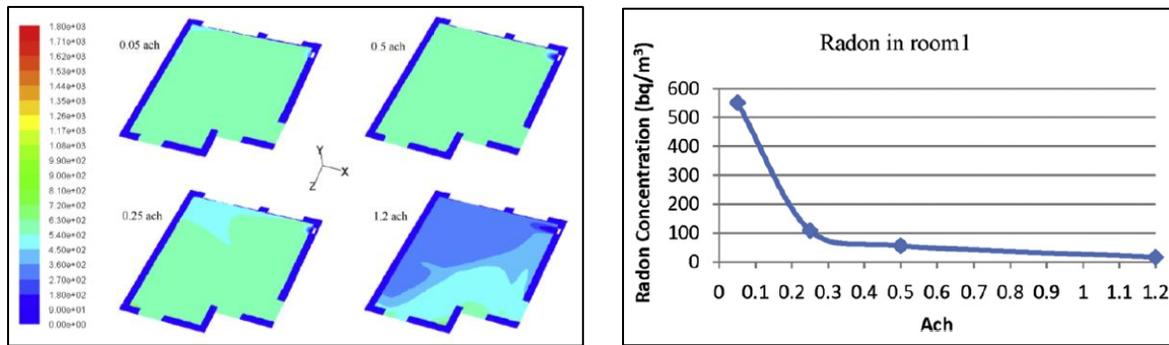


Figura 1.23: Impacto de la tasa de ventilación en la distribución espacial de los perfiles de concentración de Rn-222 [30]

Por otro lado, V. Urosevic y col. desarrollaron una simulación para evaluar el comportamiento de Rn-222 en un recinto ($3 \times 4 \times 3 \text{ m}^3$) que tiene ventilación por un área de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. Sus resultados mostraron que la distribución de este isótopo es no homogénea [31].

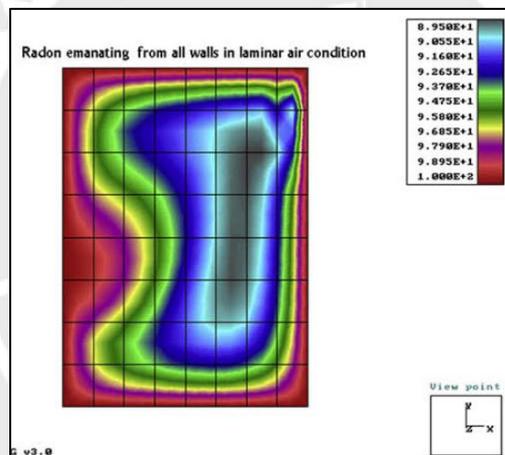


Figura 1.24: Distribución no homogénea de Rn-222 en un recinto [31]

1.3.2 INFLUENCIA DE LA EXHALACIÓN DE RADÓN DESDE EL PISO, PAREDES Y TECHO

En un trabajo desarrollado por Neetika Chauhan y col. (2014) [29], se midieron la exhalación de paredes, piso y techo de un recinto, donde encontraron que la exhalación de Rn-222 generada en las paredes fue mayor comparado con el piso y el techo. Las paredes estaban formadas por ladrillo enlucido y el piso, techo estaban hechos de concreto.

Tabla 1.17: Exhalación de Radón de paredes, piso y techo [29].

Barrera	Material	Área de la barrera	Exhalación de Rn-222 [Bq/(m ² .h)]
Paredes	Ladrillo enlucido	30.9	1.59 ± 0.10
Piso	Concreto	09.1	0.96 ± 0.07
Techo	Concreto	09.1	0.99 ± 0.19

Del trabajo presentado por R. Raby y col. (2017) [32], también determinaron la exhalación de las paredes, piso y techo de un recinto, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 1.18. En este caso podemos observar que la mayor exhalación también lo generan las paredes.

Tabla 1.18: Exhalación de Radón de paredes, piso y techo.

Barrera	Exhalación de Rn-222 [Bq/(m ² .h)]
Paredes	0.260 ± 0.03
Piso	0.180 ± 0.03
Techo	0.140 ± 0.02

De los resultados mostrados en las últimas dos tablas (1.17 y 1.18), podemos darnos cuenta que hay una diferencia entre los niveles de exhalación de las paredes, piso y techo de un recinto, lo que podría generar que la distribución de Radón en interiores sea no uniforme. Los investigadores Winter y Wicke (1993) determinaron la distribución de concentración de Rn-222 en casas en Eslovaquia que tienen diferentes materiales de construcción. Como podemos observar el ladrillo genera mayores concentraciones de Rn-222 que el concreto dentro de un recinto y esto se debe probablemente a que el ladrillo presenta una mayor concentración de Ra-226 y Th-232 y capacidad de difusión (ver tabla 1.9, 1.10 y 1.12) [5].

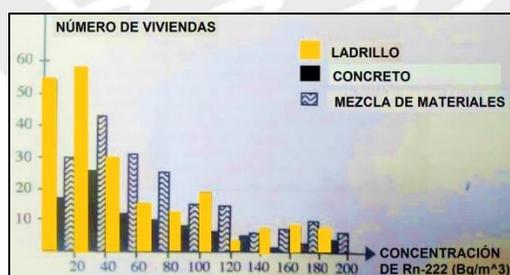


Figura 1.25: Niveles de concentración de Rn-222, en viviendas de diferentes materiales de construcción [5]

Hesham A. Yousef y col. [33] empleando detectores pasivos CR-39, determinaron la concentración y exhalación de Rn-222 de diferentes materiales de construcción en Dacalia (Cairo- Egipto). Los resultados se muestran en la tabla 1.19. Se obtuvo valores altos de concentración y exhalación para el granito.

Tabla 1.19: Concentración y exhalación de Rn-222 de diferentes materiales de construcción [33]

Material de construcción	Granito	Piedra	Arena	Mármol	Cemento Negro
Concentración de Radón C_{Rn} (Bq/m^3)	820.51 ± 10.49	363.22 ± 9.87	257.09 ± 5.88	219.59 ± 5.30	185.92 ± 4.08
Tasa de exhalación de área E_A (mBq/m^2h)	1059.92 ± 12.95	467.68 ± 12.32	331.14 ± 7.07	270.23 ± 6.54	239.42 ± 4.83
Material de construcción	Ladrillo	Grava	Cerámica	Yeso	Cemento Blanco
Concentración de Radón C_{Rn} (Bq/m^3)	108.69 ± 3.82	88.39 ± 3.44	83.49 ± 2.99	65.10 ± 2.96	47.88 ± 2.92
Tasa de exhalación de área E_A (mBq/m^2h)	140.43 ± 4.56	113.69 ± 4.13	107.44 ± 3.64	83.74 ± 3.46	61.84 ± 3.74

1.3.3 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y TEMPERATURA

En el trabajo desarrollado por Keramatollah Akbari (2013) y col. [30], evaluaron por medio de una simulación el cambio de la concentración de Radón con la temperatura en el interior de un recinto, considerando que la tasa de cambio de aire (0.5 ach) y la humedad absoluta son constantes y la temperatura del recinto varía de 15 °C a 25 °C. El valor inicial de la humedad relativa fue 30 %. La temperatura exterior se estableció en 18 °C. Sus resultados se muestran en la figura 1.26 y la explicación que dieron fue la siguiente:

Caso 1: Cuando la temperatura interior es menor que la temperatura exterior, el calor se transfiere de afuera hacia adentro; por lo tanto, la temperatura interior aumenta, esto causa que las moléculas que conforman el aire estén más dispersadas y desordenadas por el aumento de energía y al mismo tiempo generan dispersión en los átomos que conforman el gas Radón y su progenie, generando así que su concentración disminuya; también genera una disminución de su humedad relativa, debido al aumento de la humedad de saturación con la temperatura (humedad absoluta del aire/ humedad absoluta del aire saturado).

Caso2: Por otra parte, cuando la temperatura interior es mayor que la exterior, el calor se transfiere de adentro hacia afuera, causando que la temperatura en el interior disminuya, aumentando la concentración de Radón y su progenie, y la humedad relativa aumente, debido a la disminución de la humedad de saturación con la temperatura.



Figura 1.26: Esquema de la influencia de la temperatura (T) en la concentración de Radón (C-Rn), a una humedad absoluta constante (Ha) y humedad de saturación (Hs) que varía con la temperatura.

De lo antes mencionado determinaron que la concentración de Radón disminuyó a medida que la temperatura varió desde 15 °C a 21 °C, y luego aumentó ligeramente después de 21 °C, debido a que la temperatura exterior es de 18 °C.

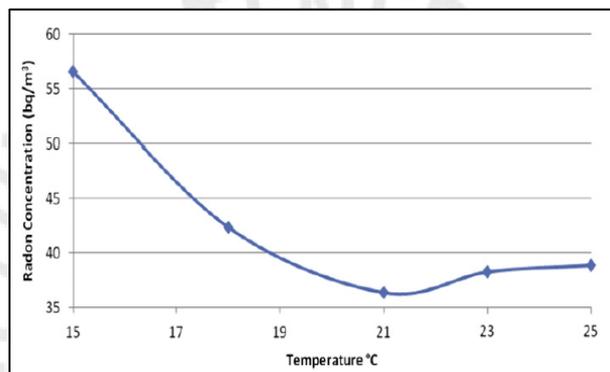


Figura 1.27: Concentración de Rn-222 versus temperatura [30].

Evaluaron cómo cambia el perfil de distribución de Radón en el recinto con la temperatura, en un plano horizontal ubicado a 210 cm de distancia desde el piso.

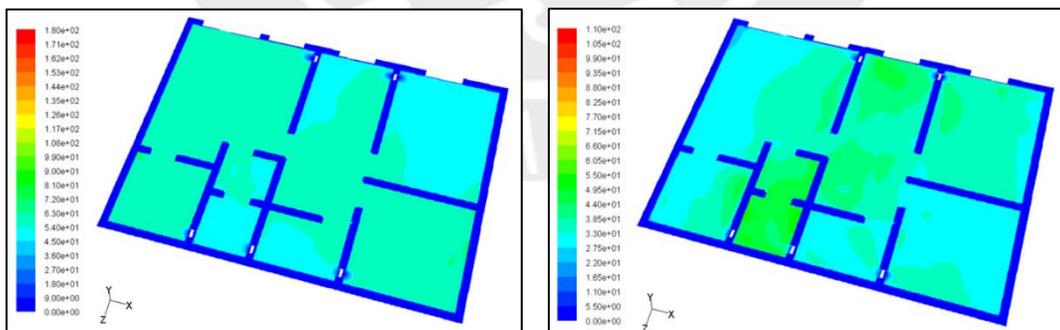


Figura 1.28: (a) Perfil de distribución de Rn-222 a una temperatura de 15 °C (b) Perfil de distribución de Rn-222 a una temperatura de 25 °C [30].

También desarrollaron una simulación con el propósito de investigar el efecto de la humedad relativa en la concentración de Radón en interiores, consideraron varios valores de humedad

relativa para un valor constante de la tasa de cambio de aire (0.25 ach) y una temperatura constante (18 °C) que trae como consecuencia que la humedad de saturación también sea constante.

Caso 1: Los resultados muestran que cuando la humedad relativa aumenta, se incrementa el contenido de agua en el recinto (humedad absoluta) y decrece la concentración de Radón, esto se debe a que el aumento del contenido de agua en el aire conduce a un menor coeficiente de difusión y por lo tanto a una longitud de difusión más corta para el Radón.

Caso 2: Por otro lado, si la humedad relativa disminuye, disminuye el contenido de agua en el recinto (humedad absoluta) y aumenta la concentración de Radón, puesto que el coeficiente de difusión de Radón en aire es mayor.



Figura 1.29: Esquema de la influencia de la humedad relativa (HR) en la concentración de Rn-222 (C-Rn), a una humedad de saturación (HS) y temperatura (T) constantes.

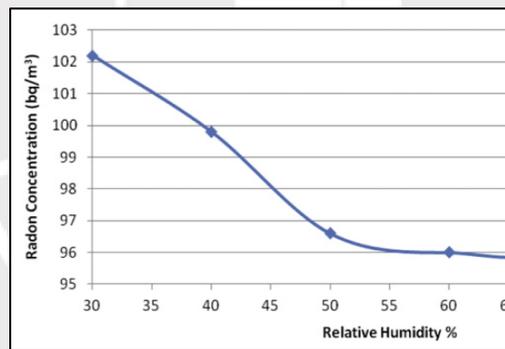


Figura 1.30: Concentración de Rn-222 versus humedad relativa, a temperatura constante [30]

Diversos investigadores han evaluado experimentalmente cómo afectan en conjunto la humedad relativa, absoluta y temperatura en la concentración de Radón. Por ejemplo: Arabzedegan y col. estimaron que el flujo de Radón no tiene correlación con la temperatura y la humedad. Porstendorfer, Bochicchio y col., Ortega y Vargas reportaron que existe una correlación negativa entre los niveles de Radón y temperatura. Nagaraja y col. encontraron que los niveles de Radón y su progenie exhiben una correlación positiva con la humedad relativa y una correlación negativa con la temperatura. Singh y col. encontraron una correlación positiva con la humedad relativa, pero negativa con la temperatura y la humedad absoluta. Kirandeep Kaur y col. observaron que la concentración de Radón crece con el incremento de la humedad relativa, pero decrece con la humedad absoluta y temperatura. Chen y col., indicaron que existe una correlación positiva de la

concentración de Radón con la humedad relativa y negativa con la temperatura. Blaauboer y Smetsers, encontraron que existe una correlación positiva entre la concentración y la humedad absoluta [34].

1.4 EXPOSICIÓN OCUPACIONAL DEBIDO A RADÓN

Desde hace algún tiempo se ha venido evaluando los niveles de Rn-222 y Th-220 en algunas viviendas, pero hace relativamente poco tiempo que se ha prestado atención a lugares de trabajo distintos de minas. Hasta el momento la UNSCEAR, en su informe del 2008, ha presentado una estimación aproximada de la dosis efectiva anual mundial que recibe un trabajador, que no labora en minas, debido a Rn-222, siendo este valor de 4.8 mSv. En este informe también se estimó que en Alemania alrededor de 50 000 personas están expuestas a concentración de Rn-222 que van desde 1 000 a 3000 Bq/m³. En el Reino Unido, las concentraciones de Rn-222 se midieron en 4 800 lugares de trabajo, la concentración media fue de 210 Bq /m³, y en 710 casos la concentración excedió 400 Bq /m³. De lo estimado 1.7 millones de lugares de trabajo en el Reino Unido, 5 000 lugares de trabajos con 50 000 trabajadores se esperarían excedan el nivel de 400 Bq /m³ [1]. En la tabla 1.20 se presenta un resumen de lugares de trabajo evaluados a nivel mundial, desarrollados por diferentes investigadores [35].

Tabla 1.20: Estudios de exposición ocupacional debido a Rn-222 en lugares de trabajo ubicados arriba del terreno y en sótanos.

País	Número y tipo de lugar de trabajo	Concentración de Rn-222 (Bq/m ³)
Bélgica		
[36]	02 escuelas (incluido sótanos y pisos a nivel del suelo)	160-1150, 200-550
China		
[37]	166 hoteles, restaurantes, tiendas, oficinas, salas de ent+retenimiento, fábricas y almacenes en casas (51 en sótanos, 115 arriba del terreno)	3-618 (sótano) 1-3 (arriba del terreno)
[38]	88 hoteles, restaurantes, mercados, almacenes (48 sótanos, 40 arriba del terreno)	75 (media geométrica) (sótanos) 13 (media geométrica) (arriba del terreno)
Finlandia		
[39]	4500 lugares de trabajo municipal y privados.	510 lugares de trabajo municipal, 260 en privados
India		
[40]	77 almacenes, tiendas, restaurantes y talleres	Debajo de 60 en el 79% de los lugares de trabajo.
Italia		
[41]	03 oficinas (arriba del terreno)	20-300
[42]	47 lugares en escuelas (arriba del terreno)	7-97
[43]	166 jardines (19 sótanos, 10 parcialmente debajo del terreno, 67 por encima del terreno)	13-1181
Japón		
[44]	52 habitaciones HVAC, cuarto de máquinas, sala para trabajadores, etc. (principalmente en sótanos)	3-185
[45]	05 oficinas (sobre el terreno)	21-66 (promedio anual)

Korea		
[46]	74 estaciones de metro (sótano)	677
Rusia		
[47]	136 habitaciones en pre- escuela	5-268
Reino Unido		
[48]	39 hospitales (sobre el terreno)	<50 – 1770
[49]	3000 lugares de trabajo (no identificado)	10% exceden 400 Bq/m ³
[50]	158 mediciones en ambientes en sótanos	9-13 639
Estados Unidos		
[51]	Salones de clase en escuelas (arriba del terreno)	<37 – alrededor 1200
[52]	7047 salas del primero piso de edificios	5-147 (promedio)
[53]	Más de 70 000 salones de clase.	Hasta 3700 Bq/m ³

1.4.1 NIVELES DE ACCIÓN EN INTERIORES

El nivel de acción es definido por la IAEA Basic Safety Standards (1994) [5] como el nivel de concentración por encima del cual acciones de protección radiológica o remediación deberían llevarse a cabo. Los niveles de acción establecidos por algunos países e instituciones se muestran en la tabla 1.21. En el Reino Unido existe el Reglamento de Radiaciones Ionizantes de 1999 (IRR99) en el cual se establece que si un lugar de trabajo tiene un nivel de Rn-222 superior a 400 Bq/m³, los empleadores deben actuar para reducir este nivel. También se debe poner en claro, que los valores de concentración de Rn-222 mostrados en la tabla 1.21 son niveles de referencia anual.

Tabla 1.21: Niveles de acción en interiores, establecidos en diferentes países [5]

País	Nivel de acción	
	Construcciones antiguas (Bq/m ³)	Construcciones nuevas (Bq/m ³)
Australia	200	200
Austria	400	400
Canadá	800	-
Dinamarca	200	200
Alemania	250	250
Irlanda	200	200
Suecia	200	70
Reino Unido (viviendas)	200	200
Reino Unido (lugares de trabajo)	400	
Estados Unidos	150	150
ICRP-65	200-600	200-600
IAEA-BSS	200-600	200-600
CEC	400	200
WHO	200-300	200-300

1.5 TÉCNICA DE MEDICIÓN DE RADÓN

Los detectores usados en esta tesis son los LR-115 Tipo 2, empleados en modo desnudo, de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ de área. Estos detectores consisten de una película delgada de nitrato de celulosa de $12 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor, de color rojo; además tienen una base de poliéster transparente de $100 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor (ver figura 1.31) [5].

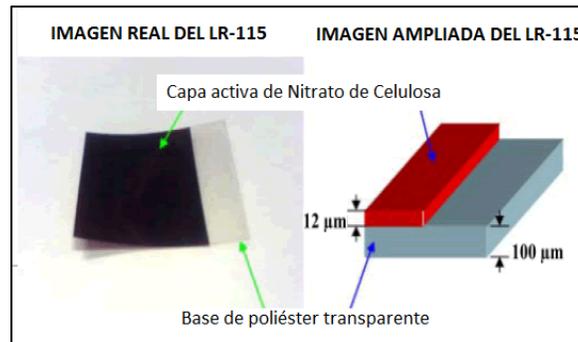


Figura 1.31: Detector LR-115 Tipo 2 [54]

Estos detectores son dispositivos pasivos que se colocan en el lugar que se desea evaluar (bajo condiciones naturales) y las partículas alfas que provienen de los isótopos de Radón y/o hijas impactan en el detector; luego, según la energía y ángulo con que cada partícula alfa incide sobre el detector algunas partículas alfa generaran escisiones de algunas de las cadenas de los polímeros que forman la estructura del detector LR-115 (ver figura 1.32), debido a la transferencia lineal de energía (LET) alfa sobre su trayectoria. Esto también produce especies reactivas tales como los radicales libres, que pueden ser de larga vida.

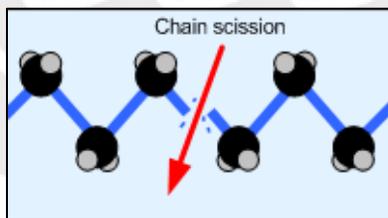


Figura 1.32: Diagrama esquemático de la cadena de escisión en el detector causado por el paso de una partícula alfa [5].

Cuando el detector es subsecuentemente tratado con un apropiado baño químico (NaOH), el área de escisión es disuelta y el agujero resultante (de tamaño original $20\text{-}50 \text{ }\text{Å}$) puede ser agrandado por un factor de $10^2 - 10^3$. El rastro del daño dejado por la partícula alfa se vuelve así fijo como traza. La microscopía óptica luego permite diferenciar entre los diferentes tipos y geometrías de las trazas, y determinar la energía asociada a las partículas alfas incidentes. El baño químico recomendado para el registro de trazas es un 10 % (2.5N) de solución en agua destilada de hidróxido de sodio (NaOH) con un tiempo de grabado que puede variar desde 75 a 100 minutos, a

una temperatura estable de 60 ° C (con fluctuaciones < 0.5 °C). Después del baño químico el detector debe ser enjuagado con agua acificada o destilada. Las ventajas de emplear los detectores LR -115, son [5]:

- Dimensiones pequeñas (típicamente 1 cm x 1 cm, ~ 100-500 um de espesor).
- Facilidad de uso, no necesitan de una fuente de energía ya que su propiedad de detección es una cualidad intrínseca del material del que están hechos.
- Bajo costo (una hoja que produce alrededor de 400 detectores cuesta aproximadamente US \$ 40).
- Simples de procesar y leer (un baño de grabado termostático, reactivos químicos simples y un microscopio óptico, son los requisitos mínimos).
- Son dispositivos integradores, es decir se dejan in situ por un periodo de tiempo para acumular cuentas. Esta propiedad ofrece además la ventaja extra de dar una lectura promedio en caso que la señal varíe con el tiempo.
- El LR-115 no es afectado por electrones.
- El LR-115 puede ser guardado hasta más de 10 años. Esto permite que el detector pueda ser releído en el caso que se necesite.

1.5.1 RESPUESTA DEL LR-115 TIPO 2 A LAS PARTÍCULAS ALFA

La distancia que recorren las partículas α en el aire depende de sus energías, siendo sus rangos de unos pocos centímetros. Para que las partículas alfa sean registradas en el detector LR-115 Tipo 2, éstas deben llegar al detector con energías comprendidas dentro de la ventana de 0,8 - 4,5 MeV. Debido a que las partículas alfa el Radón y su progenie se emiten con energías superiores al umbral superior de la ventana, éstas deberán recorrer cierta distancia en el aire para ser detectadas. En la figura 1.33 se muestran cinco casos de incidencia que pueden llegar o no a generar una traza a lo largo del camino de la partícula alfa [55,56].

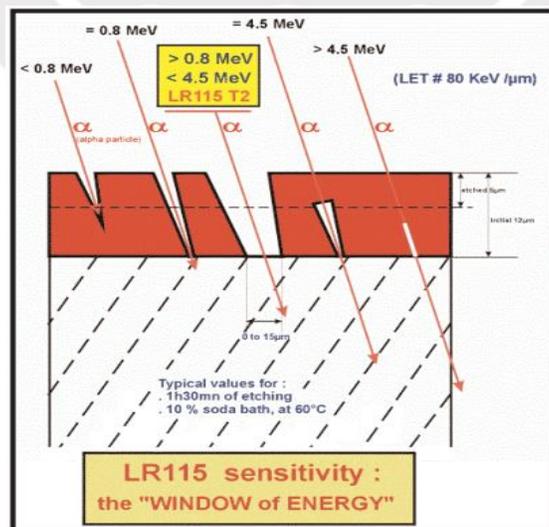


Figura 1.33: Sensibilidad del detector LR-115 Tipo 2 a una ventana de energía de 0,8 - 4,5 MeV [56]

De todo esto podemos concluir que una mínima y máxima distancia son requeridos entre el detector LR-115 y la fuente de la partícula alfa. En la tabla 1.22 se muestran valores de la distancia mínima y máxima para el Rn-222 y su hija más energética Po-214, que deben recorrer para generar una traza revelada (o grabada) visible al microscopio óptico.

Tabla 1.22: Distancia mínima y máxima para el Rn-222 y Po-214 [56]

Núcleo	Energía Alfa (MeV)	Distancia mínima (mm)	Distancia máxima (mm)
Rn-222	5.59	5	35
Po-214	7.83	30	60

Existe las llamadas regiones de influencia (también denominados volúmenes efectivos), en la cual las partículas alfa confinadas en ella, tiene la probabilidad no nula de ser registrada en el detector LR-115. La figura 1.34 muestra las regiones típicas de influencia para el Rn-222, Rn-220 y sus progenies, cuando el detector LR-115 Tipo 2 está expuesto en modo desnudo.

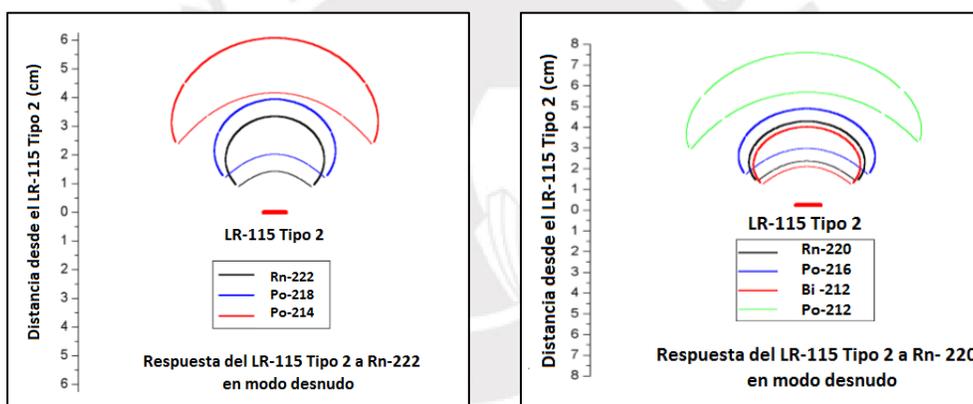


Figura 1.34: Regiones de influencia para el Rn-222, Rn-220 y sus progenies, para detector LR-115 Tipo 2 en modo desnudo [57]

Existe un fenómeno llamado "Efecto Plateout" que describe la deposición de la progenie del Radón en la superficie de la capa sensible de la película LR-115. Son principalmente los monitores que utilizan detectores CR39 los que se ven afectados por el Efecto Plateout, mientras que afectan de menor manera a los monitores que usan películas de LR-115. La razón del por qué los LR-115 no son sensibles a los productos de desintegración (progenie) depositados en su superficie es debido a que las partículas alfa generadas demasiado cerca de la superficie del detector no pueden ser detectarse debido a sus altas energías que están fuera de la ventana de energía a la cual es sensible el LR-115 (0,8 - 4,5 MeV) [56].

1.5.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS TRAZAS

La forma y el diámetro de la traza dependen básicamente de dos parámetros: Las características de grabado del detector (tipo de grabador empleado, molaridad y temperatura), representado por la velocidad de grabado de la región no dañada (V_B), y las características de la interacción de la partícula alfa con el medio, representado por la velocidad de grabado de la traza (V_T) a lo largo de la trayectoria de la partícula [5, 58].

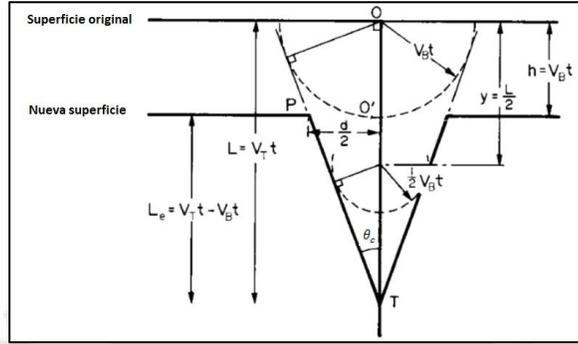


Figura 1.35: Trazas formadas por una partícula alfa que incide de manera normal sobre la superficie de un detector LR-115.

Inicialmente haremos una simplificación considerando, que las partículas alfa tienen una incidencia normal a la superficie del detector (ver figura 1.35), la velocidad de grabado de la región dañada es V_T , tal que dentro del tiempo de revelado de la traza t la traza se puede extenderse una distancia L desde el punto de origen; al mismo tiempo la región no dañada del detector está siendo removida a una velocidad V_B . De esto podemos obtener una expresión que representa el ángulo crítico de grabado θ_c .

$$\sin \theta_c = \frac{V_B t}{L} = \frac{V_B t}{V_T t} = \frac{V_B}{V_T} \rightarrow \theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{V_B}{V_T} \right] \quad (1.16)$$

Del triángulo O'PT en la figura N° es evidente que:

$$\frac{d/2}{L_e} = \tan \theta_c = \frac{V_B}{\sqrt{V_T^2 - V_B^2}} \rightarrow d = \frac{2V_B L_e}{\sqrt{V_T^2 - V_B^2}} = \frac{2V_B t (V_T - V_B)}{\sqrt{V_T^2 - V_B^2}} = 2V_B t \sqrt{\frac{V_T - V_B}{V_T + V_B}} \quad (1.17)$$

Considerando la fracción $V = V_T/V_B$ y el espesor removido $h = V_B t$, la ecuación (1.17) finalmente toma la siguiente forma:

$$d = 2h \sqrt{\frac{V-1}{V+1}} \quad (1.18)$$

Precisamente d representa el diámetro de la traza grabada por incidencia normal de una partícula alfa en el detector y V es llamada la razón de grabado, que es un parámetro muy útil para determinar las propiedades de registro de partículas alfa en polímeros como el LR-115. Esta razón también nos da parámetros tales como "la eficiencia de grabado" y "ángulo crítico de grabado (θ_c)", etc. Es fácil medir V_B y se puede determinar a partir de la capa removida de detector en un tiempo de

grabado t , $h = V_B t$, que se determina empleando un micrómetro. La medición de V_T para partículas con bajos V , tales como las partículas alfa, no es tan sencillo. Se puede demostrar, a partir de la ecuación (2.18), que:

$$V = \frac{1 + \left[\frac{d}{2h}\right]^2}{1 - \left[\frac{d}{2h}\right]^2} \quad (1.19)$$

Con V_B y V conocidos, esto nos permite calcular V_T para las partículas alfas que inciden de manera normal en un detector.

1.5.3 NIVEL DE SATURACIÓN

El nivel de saturación indica la máxima densidad de trazas nucleares en el detector en la que todavía se puede distinguir trazas individuales. Las altas densidades de trazas son causadas por altas concentraciones de Radón y/o largos tiempos de exposición. La sobresaturación de los detectores causa superposición de las trazas y puede conducir a resultados inexactos. El nivel de saturación para el LR-115 es de aproximadamente 600 trazas/mm², con trazas cuyos diámetros varían desde 1-15 μm . La exposición total indicada en unidades de kBq.h/m³ es un parámetro importante en la dosimetría de Radón. Este se calcula multiplicando la concentración de Radón con el tiempo de exposición. Por ejemplo: la exposición total es la misma si un detector es expuesto por 2000 horas a 50 Bq/m³ o por 50 horas a 2000 Bq/m³, en ambos casos la exposición total es 100 kBq.h/m³. La máxima exposición que tolera un detector LR-115 es alrededor de 70 MBq.h/m³. La mínima exposición es sólo 2 kBq.h/m³. Estos valores máximos y mínimos pueden ser usados para calcular de manera aproximada el tiempo de exposición máxima y mínima del detector LR-115 [56].

1.5.4 INCERTIDUMBRES DE MEDIDA DEL DETECTOR LR-115

La tabla 1.23 indica los valores típicos para las incertidumbres de medición de los dosímetros de Radón Kodak, formados por detectores LR-115 tipo 2, a un nivel de confianza 2σ . Las incertidumbres de medición en % y Bq/m³ están correlacionadas con diferentes tiempos de exposición y concentraciones de Radón. Los valores exactos dependen del lote de producción de las películas y la temperatura del baño químico. De acuerdo con los estándares internacionales y normas, las incertidumbres de medición de los dispositivos de medición de Radón deben ser inferiores a $\pm 20\%$ [56].

Tabla 1.23: Incertidumbres de medida del detector LR-115 Tipo 2 [56]

Exposición (días)	±	±	±	±	±	±
90	8-11 17% - 21%	12-15 12% - 15%	24-30 6% - 8%	34-42 4% - 5%	38-47 4% - 5%	46-58 4% - 5%
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	12-15 24% - 30%	17-21 17% - 21%	34-42 8% - 11%	47-60 6% - 8%	53-67 5% - 7%	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/m³	100 Bq/m³	400 Bq/m³	800 Bq/m³	1000 Bq/m³	1500 Bq/m³



CAPÍTULO 2: MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS LUGARES DE ESTUDIO

Se escogieron como recintos de estudio, lugares de trabajo u ocupacionales, localizados en sótanos de diferentes edificios en la ciudad de Lima – Perú. Como los sótanos tienen más contacto con el suelo que otras partes de un edificio, y a menudo tienen una ventilación limitada, hay un mayor potencial de que se produzcan altos niveles de concentración de Rn-222 en ellos, además que hay una permanencia de aproximadamente 08 horas diarias por parte del personal de trabajo en estos recintos. Para poder realizar las mediciones de Rn-222 en diversos tipos de edificios (edificios médicos, académicos, etc.), se presentaron solicitudes de permiso y una carta de confidencialidad a cada representante legal donde nos comprometimos a no divulgar el nombre y la dirección de las instituciones donde se hicieron las medidas. Finalmente pudimos acceder a 27 lugares de trabajo ubicados en sótanos de 10 edificios.

Tabla 2.1: Identificación de los lugares de estudio

EDIFICIO	LUGARES DE TRABAJO	TIPO DE LUGAR	UBICACIÓN EN EL EDIFICIO	UBICACIÓN GEOGRÁFICA
1	1A	Oficina	Sótano 1	Distrito de San Miguel
	1B	Laboratorio	Sótano 1	
	1C	Auditorio	Sótano 1	
	1D	Salón de estudio	Sótano 1	
2	2A	Estacionamiento	Sótano 1	
	2B	Estacionamiento	Sótano 2	
	2C	Estacionamiento	Sótano 3	
3	3A	Biblioteca	Sótano 1	
	3B	Biblioteca	Sótano 2	
4	4A	Biblioteca	Sótano 2	
5	5A	Oficina	Sótano 1	
	5B	Oficina	Sótano 1	
6	6A	Oficina	Sótano 1	
	6B	Sala de comer	Sótano 1	
7	7A	Oficina	Sótano 1	Distrito de Cercado de Lima
	7B	Oficina	Sótano 1	
	7C	Oficina	Sótano 1	
8	8A	Oficina	Sótano 1	Distrito de San Borja
	8B	Búnker de braquiterapia	Sótano 1	
	8C	Oficina	Sótano 1	
	8D	Oficina	Sótano 2	
	8E	Búnker de radioterapia	Sótano 2	
9	9 ^a	Búnker de radioterapia	Sótano 1	Distrito de Miraflores
	9B	Consola del operador	Sótano 1	
	9C	Búnker de braquiterapia	Sótano 1	
	9D	Consola del operador	Sótano 1	
10	10A	Lactario	Sótano 1	Distrito de Santiago de Surco

2.1.1 TIPO DE SUELO

Los lugares donde se evaluó concentración de Rn-222, tienen un tipo de suelo similar que posee afloramientos rocosos, estratos de grava que conforman los conos de eyección de los ríos Rimac y Chillón y los estratos de grava coluvial – eluvial de los pies de las laderas, como se aprecia en la figura 2.1.

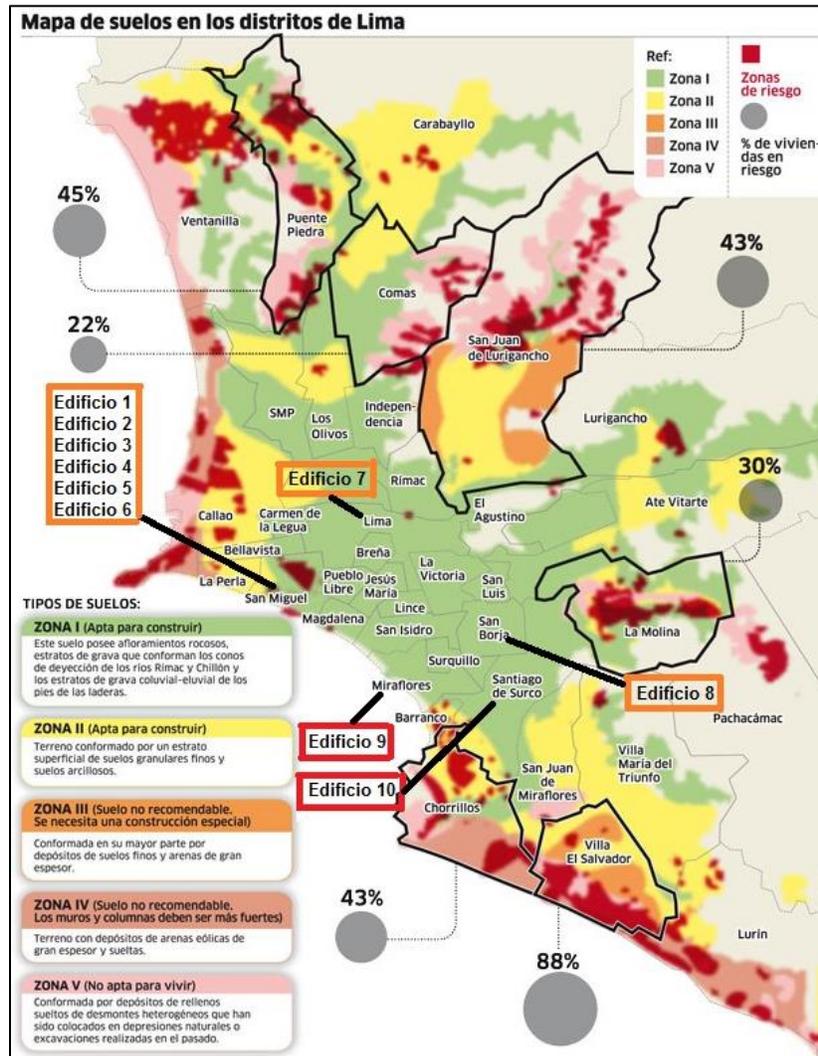


Figura 2.1: Mapa de suelos en los distritos de Lima [59]

2.2 UBICACIÓN Y RECOLECCIÓN DE DETECTORES

Se acordó colocar detectores a diferentes alturas desde el piso. Las alturas seleccionadas fueron: 160 cm, 100 cm y 40 cm. La altura de 160 cm se seleccionó, pues representa la altura promedio de los peruanos según la Dirección de Vigilancia Alimentaria y Nutricional del Instituto Nacional de Salud de Perú, por lo tanto, esta altura llega a la zona de respiración de las personas considerando que se encuentran de pie en el lugar de trabajo. La altura 100cm sobre el piso se considera aquí

aproximadamente como una altura a la zona de respiración de una persona sentada en el lugar de trabajo. El procedimiento seguido para la ubicación y recolección de detectores fue el siguiente:

- Se procedió a colocar los 03 detectores LR-115 (en modo desnudo de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ de área), a alturas de 160, 100 y 40 cm de distancia desde el piso. Los detectores fueron pegados sobre la pared o columna, con la superficie sensible hacia el exterior. En cada lugar a evaluar contamos con el apoyo del personal de vigilancia, quienes se encargaron de cuidar que los detectores permanecieran en su lugar.
- Se recopiló información sobre el diseño, materiales de construcción, condiciones de ventilación de los lugares de trabajo a evaluar.
- Luego de un mes en promedio, se recogieron los detectores y se procedió al cambio por unos nuevos.

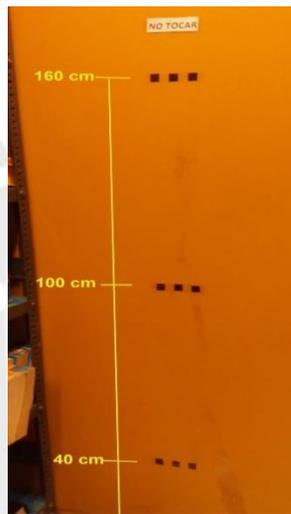


Figura 2.2: Arreglo de detectores colocados a alturas desde el piso de 40, 100 y 160 cm.

2.3 GRABADO QUÍMICO DE DETECTORES

El procedimiento de grabado químico se desarrolló con las siguientes instrucciones:

Paso 1: Primero, se prepara la solución de hidróxido de sodio NaOH a una normalidad de 2.5 N (esto quiere decir que se ha incorporado 2.5×40 gramos (el peso molecular en gramos del NaOH) = 100 gramos de NaOH en un litro de agua destilada).

Paso 2: Luego, se vierte 110 ml de NaOH en un vaso de vidrio de Pyrex (de 150 ml de capacidad).

Paso 3: A cada detector LR-115, con la ayuda de un alfiler se le hace un agujero en una de sus esquinas, por el cual se le introduce un trozo de cable, lo cual permitirá suspender el detector dentro de los recipientes de Pyrex (de 150 ml de capacidad) que contienen NaOH. En el extremo libre del trozo de cable se le pegó un pedazo de cinta en el cual se le escribe el código del detector.

Paso 4: Se vertió 200 ml de agua en un vaso de vidrio Pyrex (de 500 ml de capacidad).

Paso 5: Luego se incorpora el vaso de Pyrex de 150 ml de capacidad, en el Pyrex de 500 ml de capacidad. De este tipo de arreglo se preparan 06, colocando en cada uno de ellos 05 detectores.

Paso 6: Se prende el baño térmico y se pone a una potencia de 40 %; esperamos aproximadamente una hora hasta que su temperatura se estabilice a 60 ± 0.5 °C. Luego se procede a colocar los 06 arreglos ya preparados en el baño térmico. El tiempo que dura el grabado químico es de 90 minutos.

Paso 7: Se extraen los detectores para someterlos a un enjuague con agua destilada por un tiempo de 30 minutos, luego se les enjuaga una vez más con agua destilada a chorros varias veces y así retiramos la solución de NaOH. Después se les deja secar por periodo mínimo de 24 horas y finalmente los detectores están listos para ser leídos empleando un microscopio óptico de transmisión.

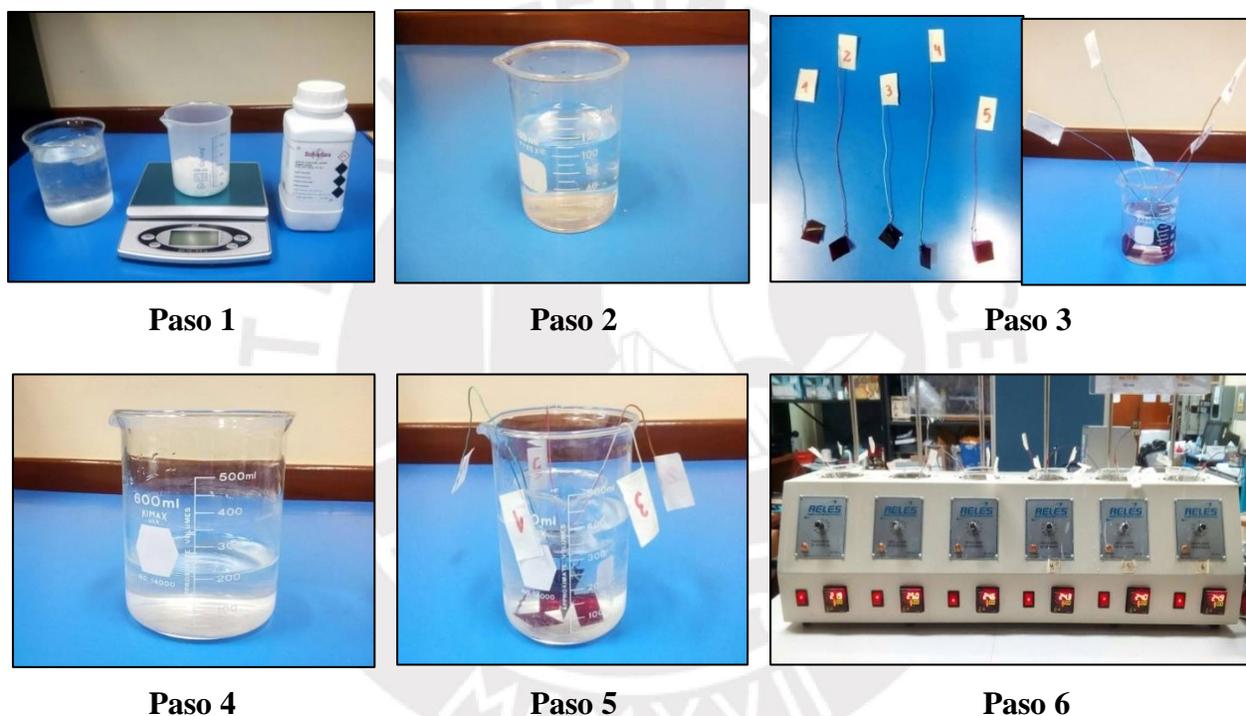


Figura 2.3. Procedimiento de grabado químico de detectores LR- 115 Tipo 2

2.4 LECTURA DE TRAZAS EN LOS DETECTORES

El sistema de conteo de las trazas se realiza a través de un microscopio óptico, marca LEICA, modelo DM LM que proporciona aumentos de 5X, 10X y 20X. Este sistema tiene incorporado una cámara CCD. Para realizar las lecturas de las trazas se procedió de la siguiente manera:

Paso 1: Primero se calibró el campo de visión del microscopio empleando un calibrador GRATICULES LTD. Para el enfoque de 10X las dimensiones del campo de visión obtenidas fueron de 1.19 mm×0.891 mm.

Paso 2: Se coloca el detector LR-115 en un porta muestras y luego se le coloca en el microscopio. Se enfoca el lente objetivo del microscopio con aumento de 10X sobre la superficie del detector, para poder observar las trazas reveladas generadas por las partículas alfas. El microscopio se encuentra acoplado a una cámara CCD la cual permite transmitir la imagen a una PC, y a través de esta se realiza el conteo de las trazas con el Software Leica Application Suite.

Paso 3: Para el conteo de las trazas se realizó mediante un escaneo sistemático por un microscopio óptico equipado con una plataforma movable. En este tipo de método de conteo de trazas, la plataforma se mueve de izquierda a derecha a lo largo del eje x para el conteo de trazas en los consecutivos campos de visión; se debe garantizar que las áreas de los campos de visión no se superpongan. Al final de la primera fila, la plataforma es movida hacia lo largo del eje Y, y luego la plataforma es movida de derecha a izquierda para evaluar los siguientes campos de visión y de esta manera hasta leer un total de 25 campos de visión en todo el detector. Este método nos permite asegurarnos de no contar las mismas trazas dos veces [5].

Paso 4: En el momento de contar las trazas en el detector, es necesario distinguir entre una traza genuina, las trazas de fondo y artefactos, que están siempre presente es un detector LR-115 y que también se agrandan bajo el proceso de grabado. La traza genuina se puede identificar por un movimiento lento del foco fino del microscopio hacia arriba y hacia abajo buscando un punto brillante de la luz internamente reflejada en el fondo de la traza grabada. Una traza genuina debería tener una forma bien definida (con una abertura circular o elíptica en la superficie del detector). Hay siempre trazas genuinas de fondo sobre la superficie del detector, resultante (raramente) de ciertas impurezas radiactivas en el detector plástico o de rayos cósmicos/neutrones rápidos incidentes sobre este, o (comúnmente) de exposición al Radón ambiental desde el tiempo que fue fabricado hasta su exposición deliberada al Radón para propósitos experimentales/medición. Por tales motivos por cada lote de detectores que se empleó se evaluaron las trazas de fondo en los detectores, las cuales fueron luego restadas al total de trazas contadas [5].

Paso 5: Las trazas contadas por cada detector fueron registradas en tablas de Excel.



Paso 1

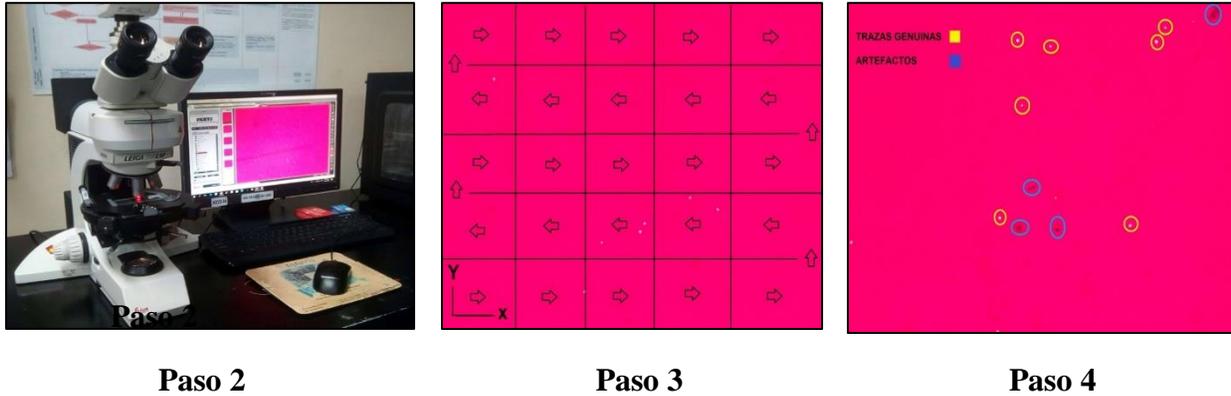


Figura 2.4. Procedimiento de lectura de trazas en los detectores LR- 115 Tipo 2

2.5 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE Rn-222

2.5.1 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CALIBRACIÓN DEL DETECTOR LR-115

El grupo de investigación de técnica de huellas nucleares GITHUNU, construyó una cámara de calibración de Rn-222, que es un sistema que me permite obtener un factor de calibración para diversos tipos de detectores, empleados sólo para la medición de Rn-222, entre ellos los LR 115 en modo desnudo. Este factor de calibración permite asociar la concentración de Rn-222 a la densidad de trazas. Los materiales empleados en la cámara de calibración fueron un depósito de plástico cilíndrico (de una altura de 0.85 m y un diámetro de 0.46 m; su volumen es de 0.14 m^3), fuente de Radón: uranita y tierra, monitor de Radón Alphaguard. El diseño de la cámara de calibración se muestra en la figura 2.5:

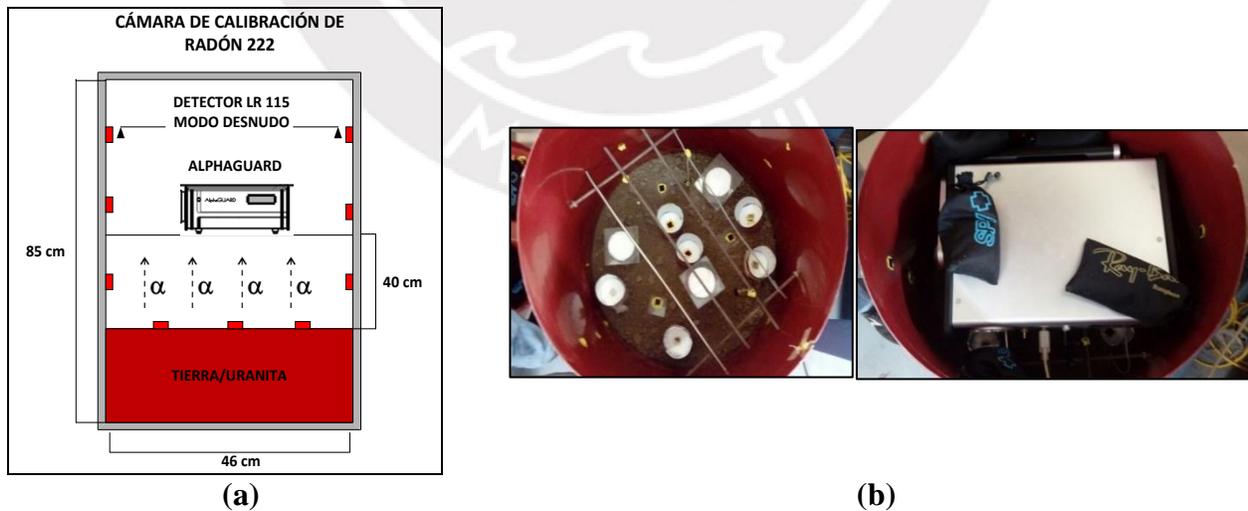


Figura 2.5: (a) Esquema de la cámara de calibración de Rn-222. (b) Fotos de la cámara de Radón donde se pueden observar detectores LR-115 en diferentes configuraciones y bolsas de silicagel para disminuir la humedad.

El procedimiento se desarrolló en dos periodos; en el primero se hizo empleando tierra como fuente de radón, la cual fue colocada en el fondo de la cámara. Los detectores LR-115 tipo 2 se pegaron en la pared de la cámara (esto reproduce de manera aproximada las condiciones de exposición de un detector desnudo LR-115 que está pegado en la pared de un recinto); y el monitor Alphaguard se colocó sobre un soporte que estaba a unos 40 cm desde la tierra. La exposición generada por la tierra fue de $700 [kBq.m^{-3}.h]$. En el segundo periodo se generó el mismo sistema, pero emplearon como fuente de radón la uraninita. La exposición generada por la uraninita, fue de $8000 [kBq.m^{-3}.h]$. El Alphaguard fue empleado en modo difusión, lo cual le permite medir sólo concentración de radón 222 dentro de la cámara de calibración. El factor de calibración del detector LR 115, se obtuvo a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{\rho}{ct} \quad (2.1)$$

Donde:

k = factor de calibración $[(trazas.mm^{-2})/(kBq.m^{-3}.h)]$.

Ct = exposición $[kBq.m^{-3}.h]$

ρ = densidad de trazas nucleares $[trazas.mm^{-2}]$

La cantidad de trazas encontradas en los detectores LR 115 fueron determinadas mediante el empleo del software ImageJ, el cual permitió el conteo automático de las trazas mediante el análisis de imágenes tomada de los detectores empleando la cámara incorporada en el microscopio. Es importante mencionar que el método de conteo de trazas en los detectores de calibración debe ser similar al empleado en los detectores del estudio. Con los datos de exposición al Radón-222, medidos por el Alphaguard y las densidades de trazas calculadas a partir de las lecturas hechas en los detectores LR-115, se desarrolló la gráfica mostrada en la figura 2.6 , cuya pendiente es numéricamente igual al factor de calibración k : $0.0112 \pm 0.0005 [(trazas.mm^{-2})/(kBq.m^{-3}.h)]$. Este el valor que se empleó para determinar la concentración de Rn-222, en los lugares bajo evaluación.

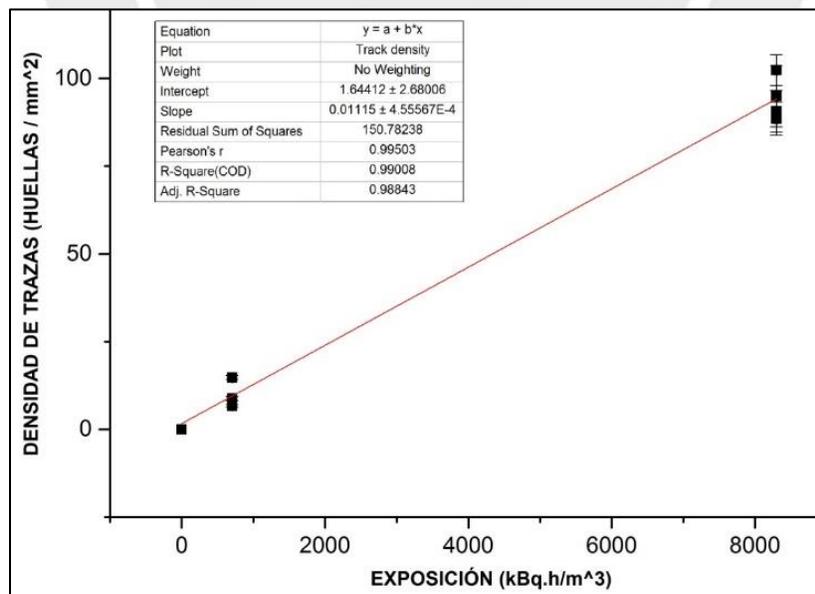


Figura 2.6: Densidad de trazas versus exposición

2.5.2 CÁLCULO DE LA DENSIDAD DE TRAZAS

La densidad de trazas, por cada detector, se calcula mediante la siguiente expresión [5]:

$$\rho = \frac{N-N_f}{nA} \quad (2.2)$$

Donde:

ρ = es la densidad de trazas nucleares [trazas. cm^{-2}].

N = número total de trazas analizadas en todos los campos ópticos de visión del microscopio.

N_f = número total de trazas de fondo

n = número total de campos de visión.

A = área del campo óptico cm^2 .

El conteo de las trazas en los detectores se hizo manualmente, esto implicó que se agregase un factor de corrección a la cantidad de trazas, puesto que el factor de calibración de conversión de densidad de trazas a concentración, se determinó haciendo un conteo automatizado de la cantidad de trazas en los detectores, los detalles de la determinación de este factor de corrección y su incertidumbre se muestran en el Anexo 3. Por lo tanto, la ecuación (2.2), queda expresada de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{k_s(N-N_f)}{nA} \quad (2.3)$$

k_s = factor de corrección de conteo manual de trazas

Cálculo de la incertidumbre estándar combinada de la densidad de trazas

La incertidumbre estándar combinada de la densidad de trazas es [60, 61]:

$$\sigma_\rho = \sqrt{\left[\frac{\partial \rho}{\partial N} \cdot \sigma_N\right]^2 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial N_f} \cdot \sigma_{N_f}\right]^2 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial A} \cdot \sigma_A\right]^2 + \left[\frac{\partial \rho}{\partial k_s} \cdot \sigma_{k_s}\right]^2} \quad (2.4)$$

Donde

σ_ρ = incertidumbre estándar combinada de la densidad de trazas

$\frac{\partial \rho}{\partial N}$ = derivada parcial de la densidad de trazas con respecto al número de trazas

σ_N = incertidumbre estándar del número de trazas

$\frac{\partial \rho}{\partial N_f}$ = derivada parcial de la densidad de trazas con respecto a las trazas de fondo

σ_{N_f} = incertidumbre estándar del número de trazas de fondo

$\frac{\partial \rho}{\partial A}$ = derivada parcial de la densidad de trazas con respecto al área

σ_A = incertidumbre estándar del área de campo de visión

$\frac{\partial \rho}{\partial k_s}$ = derivada parcial de la densidad de trazas con respecto al factor de conversión

σ_{k_s} = incertidumbre del factor de conversión

2.5.3 CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DE Rn-222

La expresión empleada para calcular la concentración de radón es [60, 61]:

$$C = \frac{\rho}{kt} \quad (2.5)$$

Donde:

C = es la concentración de radón [Bq/m^3]

ρ = es la densidad de trazas nucleares [$trazas \cdot mm^{-2}$]

t = es el tiempo que el detector estuvo expuesto [h]

k = es el factor de calibración [$(trazas \cdot mm^{-2}) / (kBq \cdot m^{-3} \cdot h)$]

Cálculo de la incertidumbre estándar combinada de la concentración de Radón

La incertidumbre estándar combinada de la concentración es [60, 61]:

$$\sigma_C = \sqrt{\left[\frac{\partial C}{\partial \rho} \cdot \sigma_\rho\right]^2 + \left[\frac{\partial C}{\partial k} \cdot \sigma_k\right]^2 + \left[\frac{\partial C}{\partial t} \cdot \sigma_t\right]^2} \quad (2.6)$$

Donde:

σ_C = incertidumbre estándar combinada de la concentración

$\frac{\partial C}{\partial \rho}$ = derivada parcial de la concentración con respecto a la densidad de trazas

σ_ρ = incertidumbre estándar de la densidad de trazas

$\frac{\partial C}{\partial k}$ = derivada parcial de la concentración con respecto al factor de calibración

σ_k = incertidumbre estándar del factor de calibración

$\frac{\partial C}{\partial t}$ = derivada parcial de la concentración con respecto al tiempo

σ_t = incertidumbre estándar del tiempo

2.5.4 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON (r)

Se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables. Y se calcula aplicando la siguiente ecuación [62]:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (2.7)$$

Donde:

r = coeficiente de correlación de Pearson

$\sigma_{xy} = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{N}$, es la covarianza o variancia conjunta de X y Y

$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N}}$, es la desviación típica de la variable marginal X

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{N}}, \text{ es la desviación típica de la variable marginal } Y$$

x, y = variables cuya relación se evalúa

\bar{x} = media aritmética de la variable x

\bar{y} = media aritmética de la variable y

N = número de datos

El valor del coeficiente de correlación puede variar de -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables. El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo. Para interpretar el coeficiente de correlación utilizamos la siguiente escala:

Tabla 2.2: Escala para interpretar el coeficiente de correlación

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0,9 a -0,99	Correlación negativa muy alta
-0,7 a -0,89	Correlación negativa alta
-0,4 a -0,69	Correlación negativa moderada
-0,2 a -0,39	Correlación negativa baja
-0,01 a -0,19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0,01 a 0,19	Correlación positiva muy baja
0,2 a 0,39	Correlación positiva baja
0,4 a 0,69	Correlación positiva moderada
0,7 a 0,89	Correlación positiva alta
0,9 a 0,99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Coefficiente de determinación (r^2)

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson e indica el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra y viceversa. El coeficiente es una medida de la bondad de ajuste o fiabilidad del modelo estimado a los datos. Puede adoptar cualquier valor entre 0 y 1.

$$r^2 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 \sigma_y^2} \quad 0 \leq r^2 \leq 1 \quad (2.8)$$

Por ejemplo, si $r^2 = 0,85$ significa que el 85% de la variación de Y puede ser debido a la variación de X si se usa la regresión lineal simple. El 15% restante de la variación de Y puede deberse al azar o a la influencia sobre Y de otras variables distintas de X [63].

2.5.5 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Es un índice que mide la relación lineal entre más de dos variables, en donde solo una es la dependiente. Por ejemplo, se puede aplicar para evaluar cómo afecta en conjunto la humedad y la temperatura en la concentración de Rn-222 (variable dependiente). En modelo de regresión lineal para una variable dependiente Y y dos variables independientes X_1 y X_2 es [64]:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2$$

El coeficiente de correlación múltiple, se determina por la siguiente ecuación:

$$r = \sqrt{\frac{a \sum y + b_1 \sum x_1 y + b_2 \sum x_2 y - N \bar{y}^2}{\sum y^2 - N \bar{y}^2}}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (2.9)$$

Donde:

r = coeficiente de correlación múltiple

y, x_1, x_2 = variables cuya relación se evalúa

\bar{y} = media aritmética de la variable y

N = número de datos

Coefficiente de determinación múltiple ajustado (r^2_{adj})

Se define como:

$$r^2_{adj} = 1 - (1 - r^2) \cdot \frac{n-1}{n-(k+1)} ; r^2_{adj} \leq r^2 \quad (2.10)$$

Donde:

r^2 = coeficiente de determinación múltiple

k = número de variables independientes

n = número de observaciones

Representa la proporción de la variable dependiente que es explicada por la serie de variables independiente.

Tabla 2.3: Criterio para interpretar el coeficiente de determinación múltiple ajustado (r^2_{adj})

Valor	Significado
> 90%	Correlación lineal fuerte
80 % - 90 %	Buena correlación lineal
60 % - 80 %	Correlación lineal media
40 % - 60 %	Correlación lineal débil
< 40 %	No existe correlación lineal



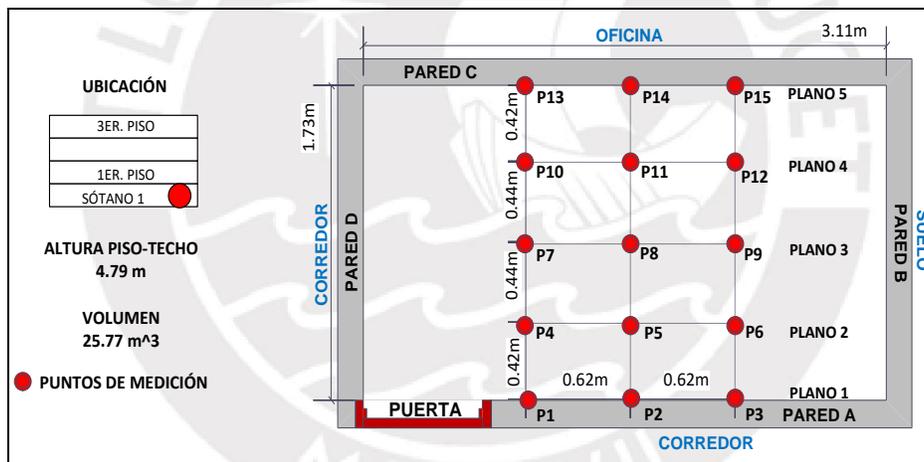
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 EDIFICIO 1

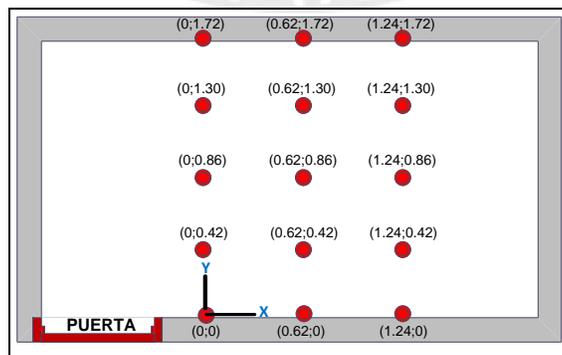
En este edificio se evaluaron 4 lugares de trabajo, definidos como: 1A, 1B, 1C y 1D. Existe una estación meteorológica, muy cerca de este edificio, del cual obtuvimos datos de humedad relativa y temperatura. Con estos datos evaluamos la correlación entre la concentración de Rn-222 con la temperatura y humedad relativa en los lugares de trabajo: 1B,1C y1D.

3.1.1 LUGAR DE TRABAJO 1A (OFICINA CERRADA)

Este lugar de trabajo es una oficina que no estuvo ocupada por ningún trabajador, estaba relativamente sin mobiliario y además permanecía completamente cerrada, por tales motivos cuando se realizaron las mediciones, se pudo colocar un arreglo de 15 puntos de medición. En cada punto de medición se colocaron dos detectores a una altura desde el piso de: 40, 100 y 160 cm. Los detectores se colocaron por un periodo de tiempo de 05 meses, 15 días (168 días, desde la fecha de 06 de setiembre de 2017 hasta el 21 de febrero de 2018). Todo esto se realizó con la finalidad de evaluar la distribución espacial de la concentración de Rn-222 en una oficina cerrada.



(a)



(b)

Figura 3.1: (a) Diseño y puntos de medición. (b) Coordenadas de los puntos de medición.

Tabla 3.1: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	03 años	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura lavable	03 años	Suelo
Pared C	Concreto	Pintura lavable	03 años	Oficina
Pared D	Concreto	Pintura lavable	03 años	Corredor
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Corredor
Puerta	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	Pintura lavable	03 años	Oficina
Antigüedad edificio			Ventilación	
52 años			Esta oficina tuvo la puerta como las ventanas cerradas durante el periodo de medición. La habitación tuvo una ligera ventilación debido a unas ranuras que se ubican en la parte inferior de la puerta de ingreso.	



Figura 3.2: Fachada del lugar de trabajo 1A, donde se puede visualizar unas ranuras que sirven como medio de ventilación, ubicadas en la parte inferior de la puerta de ingreso.

Resultados y análisis de las mediciones en 1A

Las densidades de trazas y concentraciones de Rn-222 obtenidas de los detectores expuestos en el ambiente 1A se presentan en el Anexo 2. Además, ahí también se muestra un análisis estadístico empleando la prueba no paramétrica para k muestras independientes “Kruskal-Wallis”, con lo cual se concluyó que existe diferencia significativa entre las medidas de las concentraciones de Radón-222 en los diferentes puntos de medición (distribución no homogénea de las concentraciones de Rn-222).

Se desarrolló una gráfica de barras donde se puede observar las concentraciones con sus respectivas incertidumbres en los planos horizontales ubicado a 40, 100 y 160 cm de altura desde el piso (ver figuras 3.3, 3.5, 3.7); y para poder tener una idea más clara de las distribuciones de las concentraciones de Rn-222 en este sótano, empleando el software Origin se desarrolló tres gráficas de distribución de concentraciones en planos horizontales ubicados a alturas de: 40, 100 y 160 cm (ver figuras 3.4, 3.6, 3.8).

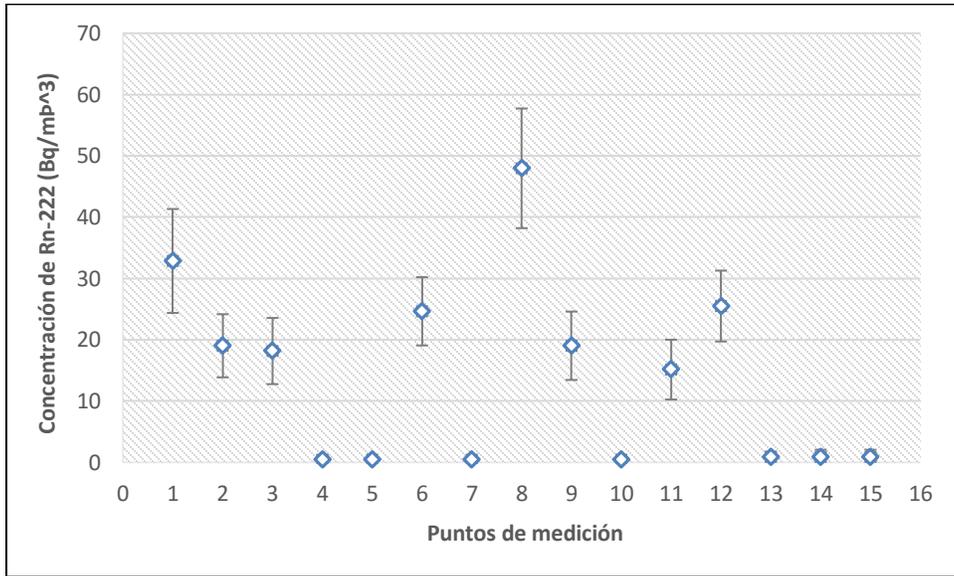


Figura 3.3: Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 40 cm de altura desde el piso

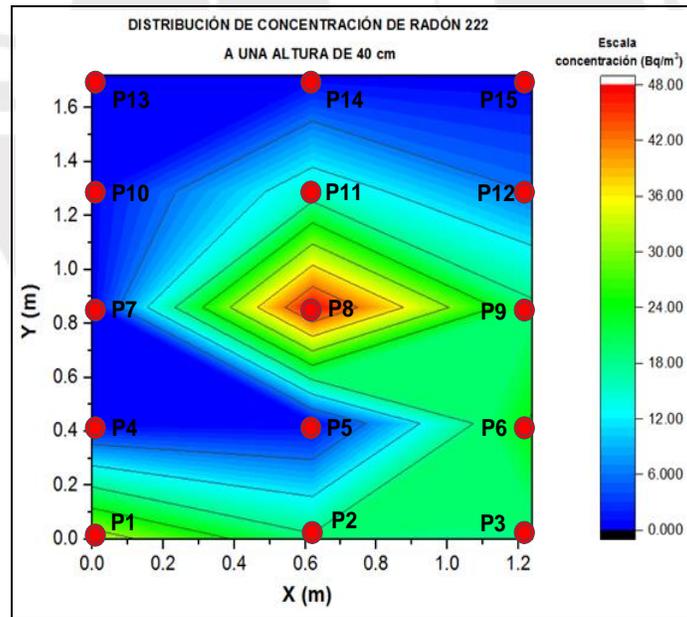


Figura 3.4: Distribución de concentración de Rn 222 en un plano horizontal a 40 cm de altura.

En la figura 3.4, podemos observar que en los puntos P4, P5, P7, P10, P12, P13, P14 y P15 (región azul) se obtienen concentraciones que varían aproximadamente en un intervalo de $[0, 12]$ Bq/m³. Los puntos P1, P2, P3, P6, P9 y P11 (región verde) tienen una concentración que varía

aproximadamente en un intervalo de $[12,36]$ Bq/m³. Y en el punto P8 se midió una concentración de 47.96 Bq/m³, que representa el valor más alto dentro de este ambiente a una altura de 40 cm desde el piso.

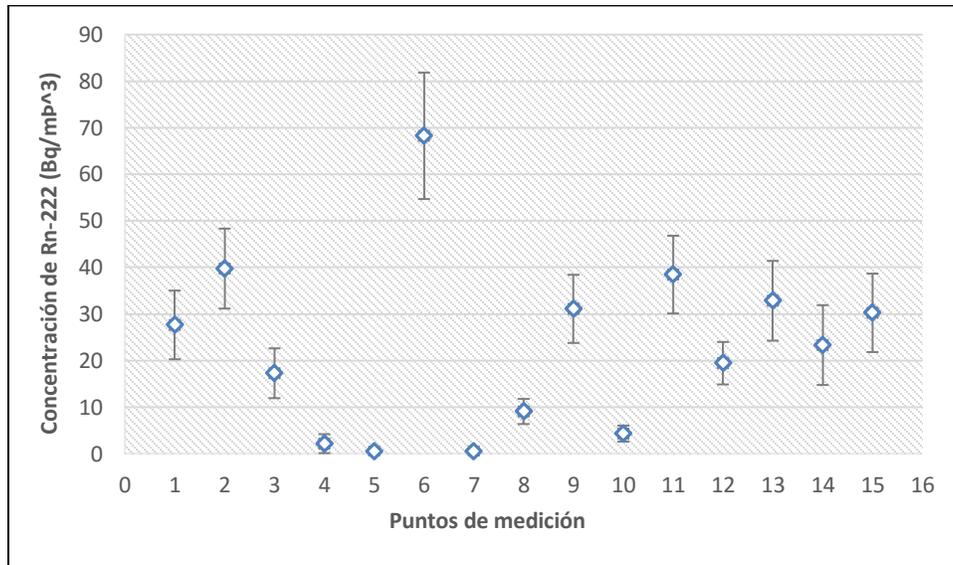


Figura 3.5: Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 100 cm de altura desde el piso

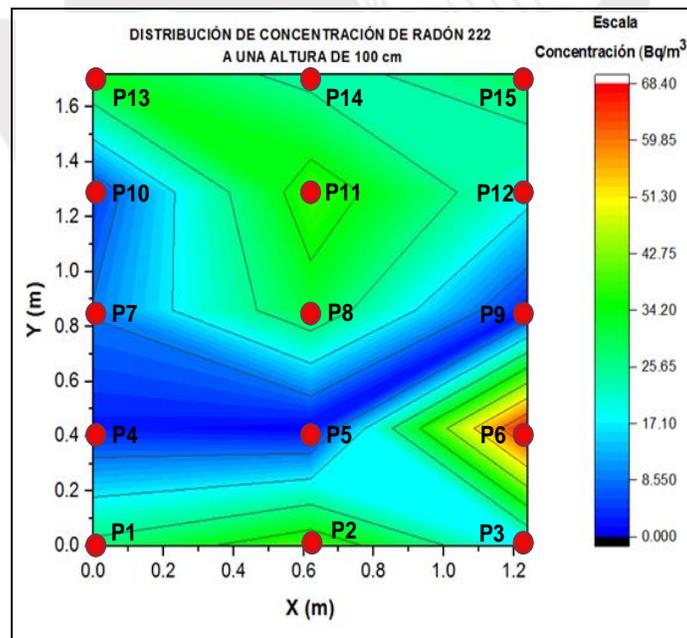


Figura 3.6: Distribución de concentración de Rn-222 en un plano horizontal a 100 cm de altura.

En la figura 3.6, podemos observar que en los puntos P4, P5, P7, P9 y P10 (región azul) se obtienen concentraciones que varían aproximadamente en un intervalo de $[0, 17]$ Bq/m³. Los puntos P1, P2, P3, P8, P11, P12, P13, P14 y P15 (región verde) tienen una concentración que varía aproximadamente en un intervalo de $[17, 51]$ Bq/m³. Y en el punto P6 se midió una concentración de 68.27 Bq/m³, que representa el valor más alto dentro de este ambiente a una altura de 100 cm desde el piso.

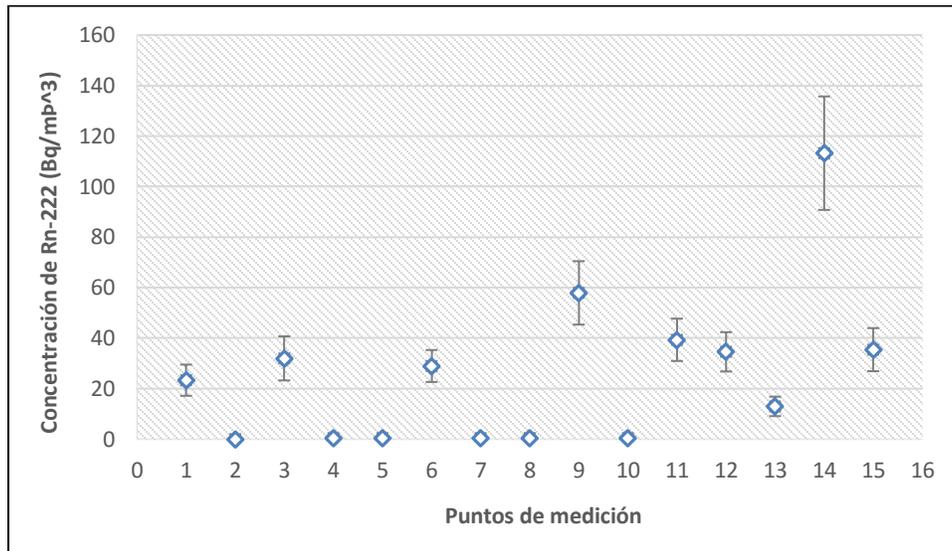


Figura 3.7: Niveles de concentración de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición del plano horizontal ubicado a 160 cm de altura desde el piso

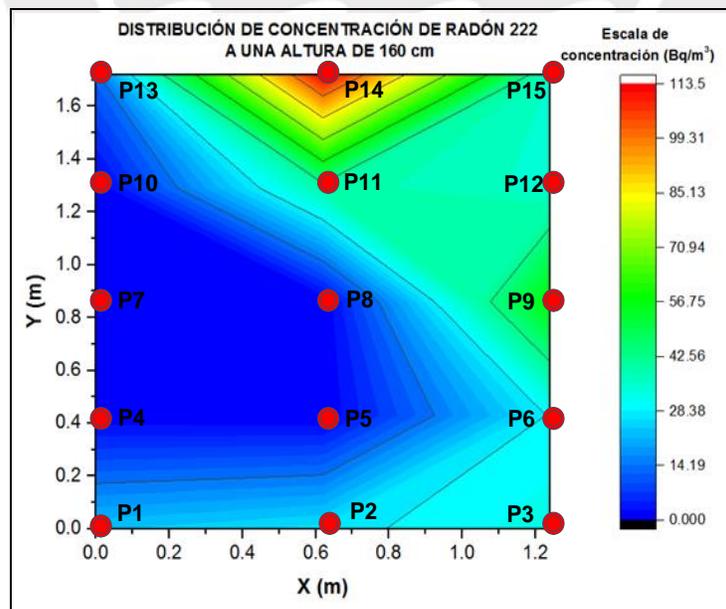


Figura 3.8: Distribución de concentración de Rn-222 en un plano horizontal a 160 cm de altura.

En la figura 3.8, podemos observar que en los puntos P1, P2,P3,P4,P5, P6,P7, P8, P10 y P13 (región azul) se obtienen concentraciones que varían aproximadamente en un intervalo de $[0, 28.38]$ Bq/m³. Los puntos P9, P11, P12 y P15 (región verde) tienen una concentración que varía aproximadamente en un intervalo de $[28.38, 85.13]$ Bq/m³. Y en el punto P14 se midió una concentración de 113.21 Bq/m³, que representa el valor más alto dentro de este ambiente a una altura de 160 cm desde el piso.

Se calcularon las concentraciones promedias en cada punto de medición, y se desarrolló una gráfica de barras donde se puede observar las concentraciones con sus respectivas incertidumbres (ver figura 3.9).

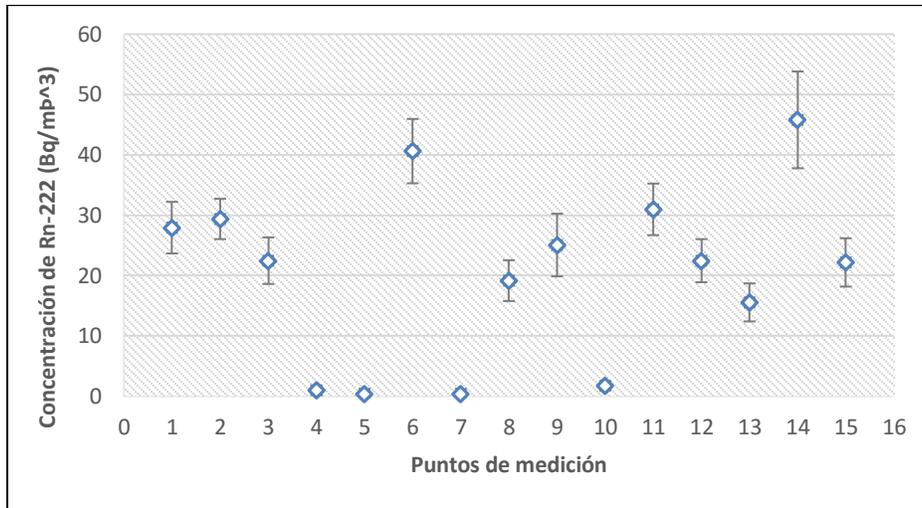


Figura 3.9: Niveles de concentración promedio de Rn-222 con sus incertidumbres en los puntos de medición

Empleando el software Origin, se desarrolló una gráfica de distribución de las concentraciones promedias.

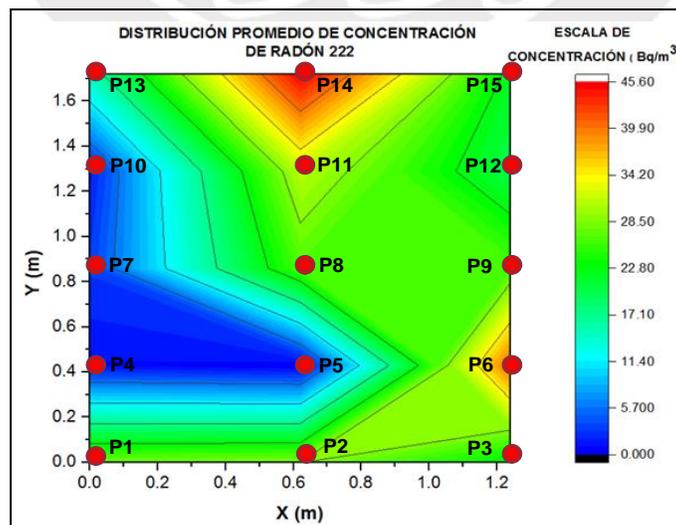


Figura 3.10: Distribución promedio de concentración de Rn-222.

En la figura 3.10, podemos observar que en los puntos P4, P5, P7 y P10 (región azul) se obtienen concentraciones que varían aproximadamente en un intervalo de [0, 11.40] Bq/m³. Los puntos P1, P2, P3, P8, P9, P11, P12, P13, y P15 (región verde) tienen una concentración que varía aproximadamente en un intervalo de [11.40, 34.20] Bq/m³. En los puntos P6 Y P14 se obtuvieron unas concentraciones que varía aproximadamente en un intervalo de [34.20, 45.60] Bq/m³, que representa los valores promedios más altos dentro de este ambiente.

Para evaluar la correlación entre la concentración de Rn-222 en este ambiente con las distancias en el eje X, Y y Z, se determina el coeficiente de correlación de Pearson (r) y el P-valor. Este análisis se desarrolló a un nivel de significancia 0.05 = 5%.

Tabla 3.2: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y el P-valor entre la concentración de Rn-222 y las distancias en el eje X, Y y Z

		Concentración de Rn-222 promedio (Bq/m ³)	Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Eje "X" (cm)	00	14.9 ± 1.5	0.83	68.89	0.38 > α (0.05)
	62	27.4 ± 2.2			
	124	26.3 ± 2.0			
Eje "Y" (cm)	00	26.4 ± 2.5	0.47	22.09	0.42 > α (0.05)
	42	14.0 ± 1.8			
	86	18.5 ± 2.1			
	130	19.7 ± 1.9			
	172	36.8 ± 3.1			
Eje "Z" (cm)	40	13.8 ± 2.3	0.98	95.41	0.14 > α (0.05)
	100	23.0 ± 1.7			
	160	27.1 ± 2.3			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.2, los P- valor son mayores al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y las distancias en los ejes X, Y y Z.

Los resultados obtenidos nos muestran que la distribución de Rn-222 dentro de este ambiente es no homogénea, debido a una ligera ventilación a través de unas ranuras ubicadas en la parte inferior de la puerta. El valor mínimo de concentración de Radón es próximo a cero en los puntos de medición cerca de la puerta y el valor máximo medido fue de 113.21 Bq/m³ en el Punto 14. Estos resultados se deben probablemente a dos causas principales:

- (1) Al campo vectorial del perfil de ventilación dentro de la habitación.
- (2) La diferencia en la tasa de exhalación de Rn-222 en las superficies de las paredes, piso y techo.

Estos resultados son similares a los encontrados por Neetika Chauhan y col., Keramatollah Akbari y V. Urosevic.

3.1.2 LUGAR DE TRABAJO 1B

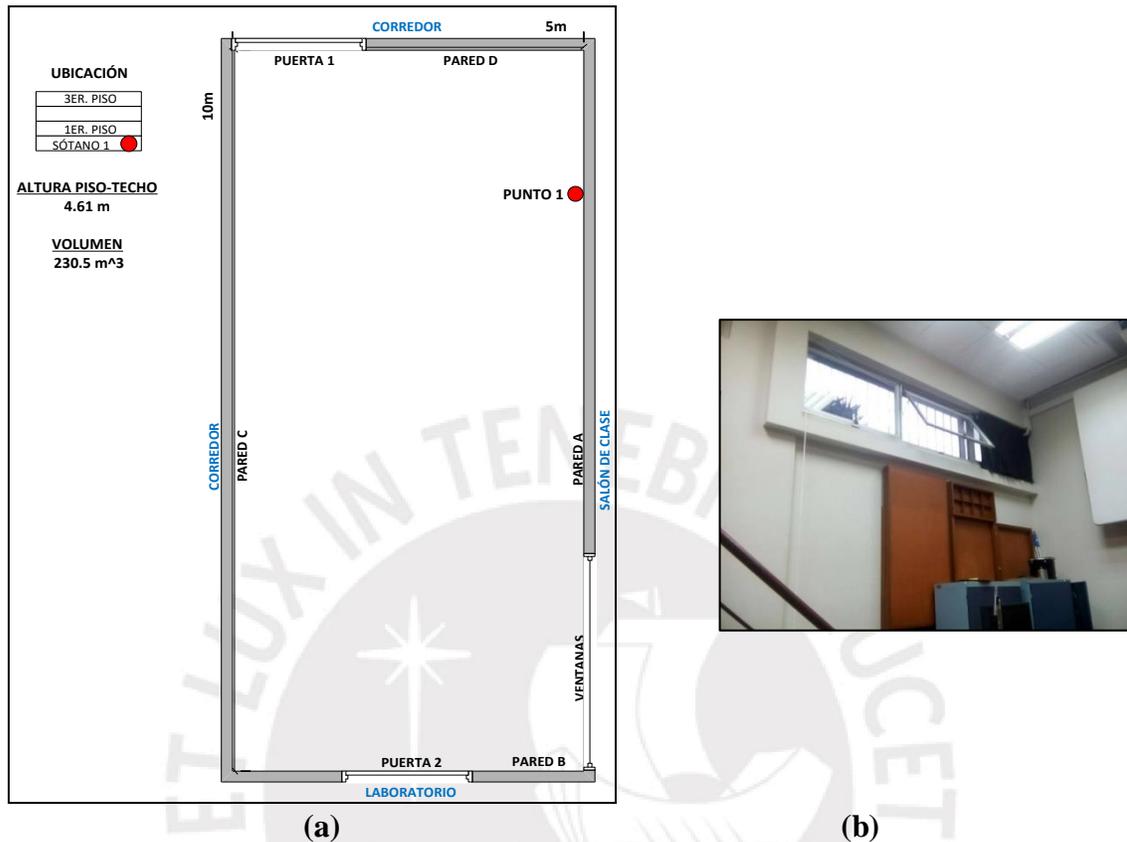


Figura 3.11: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1B. (b) Ventanas del recinto.

Tabla 3.6: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	6 años	Salón de clase
Pared B	Concreto	Pintura lavable	6 años	Laboratorio
Pared C	Concreto	Pintura lavable	6 años	Corredor
Pared D	Concreto	Pintura lavable	6 años	Corredor
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Puerta 1	Madera	No presenta	---	Corredor
Puerta 2	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
52 años	Ventanas	12 horas/día Lunes - sábado		Junio -Noviembre
		00 horas/día Ventanas cerradas		Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en IB

Las densidades de trazas y concentraciones de Rn-222 obtenidas, de los detectores expuestos durante 05 periodos de medición, fueron las siguientes:

Tabla 3.7: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	21/05/2017	40.00	160	0.17 ± 0.06	17.97 ± 6.74	21.89 ± 4.77
	30/06/2017	40.00	100	0.33 ± 0.11	35.26 ± 11.87	
		40.00	40	0.12 ± 0.04	12.44 ± 4.23	
2	30/06/2017	38.00	160	0.41 ± 0.11	40.12 ± 11.38	46.16 ± 6.67
	07/08/2017	38.00	100	0.53 ± 0.12	52.21 ± 12.32	
		38.00	40	0.45 ± 0.11	44.57 ± 10.89	
3	07/08/2017	28.00	160	0.12 ± 0.06	15.55 ± 7.53	21.60 ± 4.97
	04/09/2017	28.00	100	0.08 ± 0.04	10.37 ± 5.42	
		28.00	40	0.29 ± 0.09	38.89 ± 11.69	
4	04/09/2017	61.00	160	0.31 ± 0.09	19.04 ± 5.56	18.64 ± 3.53
	04/11/2017	61.00	100	0.23 ± 0.09	14.28 ± 5.39	
		61.00	40	0.37 ± 0.12	22.61 ± 7.21	
5	04/11/2017	55.00	160	1.57 ± 0.34	106.90 ± 23.53	174.95 ± 25.41
	29/12/2017	55.00	100	5.43 ± 1.03	368.67 ± 71.54	
		55.00	40	0.73 ± 0.17	49.27 ± 11.76	

Como podemos observar en la tabla 3.7 existe una concentración de 174.95 ± 25.41 Bq/m³, en el periodo de medición 5 (entre noviembre y diciembre), esto se debió a que en estas fechas este ambiente tuvo la puerta y ventanas cerradas por estar ausente alumnos y profesores debido a vacaciones.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.8: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	49.90 ± 5.71	0.09	0.81	0.941 > α (0.05)
100	120.20 ± 14.79			
40	41.95 ± 4.31			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.8, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.9, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.9: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1(ambiente 1B)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 1.27	85.10 ± 0.44	21.89 ± 4.77	
17.00 ± 1.76	85.70 ± 2.35	46.16 ± 6.67	
16.60 ± 2.55	87.00 ± 2.81	21.60 ± 4.97	
17.20 ± 0.33	84.95 ± 0.67	18.64 ± 3.53	
19.55 ± 2.61	82.60 ± 1.57	174.95 ± 25.41	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.91	
Coeficiente de determinación r^2		82 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		64 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		75 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		62 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.95	1	
Concentración Rn-222	r = 0.99 r ² = 98 % P-valor = 0.002	r = -0.85 r ² = 72 % P-valor = 0.071	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (64 %) no supera en valor al r^2_{adj} evaluados de manera independiente entre la concentración y la temperatura (75 %).

Evaluando el coeficiente de correlación de Pearson, notamos que la temperatura y la concentración existe una correlación lineal positiva muy alta (0.9) y significativa con un P-valor de $0.002 < \alpha$ (0.05).

3.1.3 LUGAR DE TRABAJO 1C

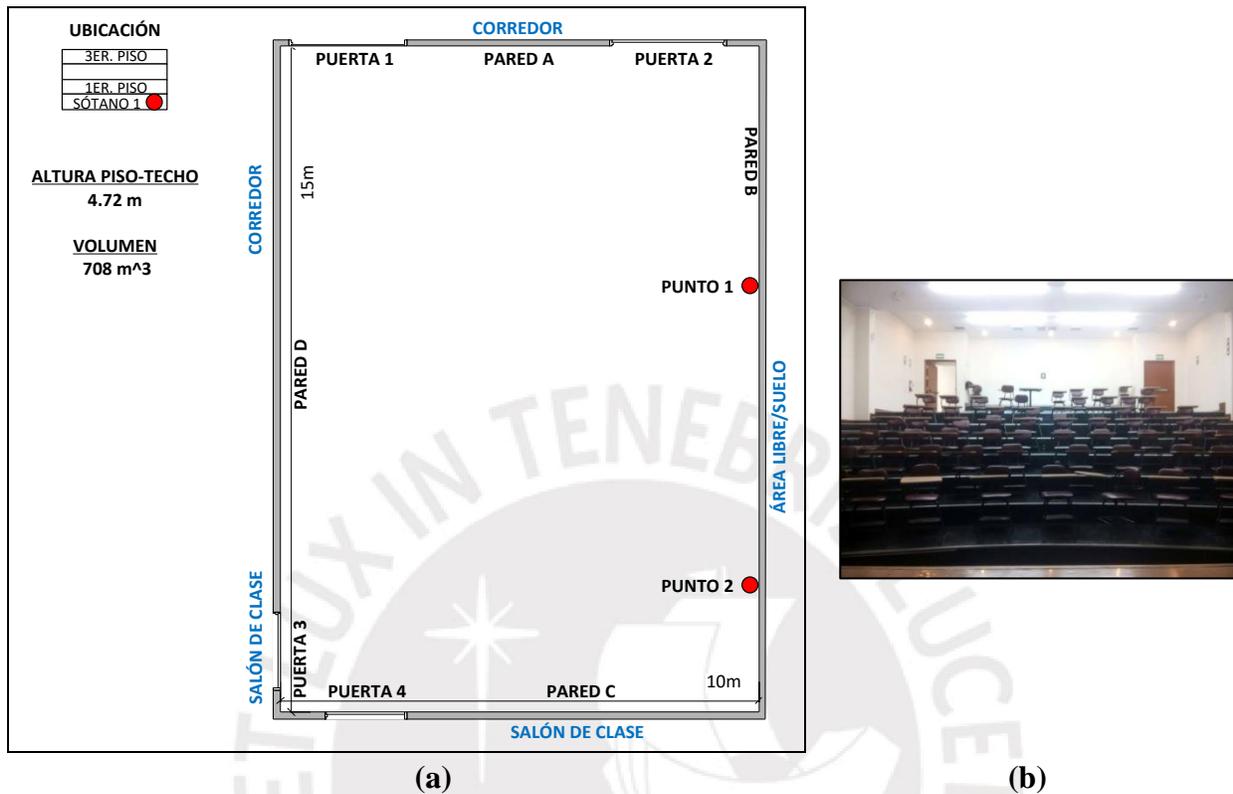


Figura 3.12: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1C. (b) Puerta 1 del recinto

Tabla 3.10: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1C

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	6 años	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura lavable	6 años	Área libre/suelo
Pared C	Concreto	Pintura lavable	6 años	Salón de clase
Pared D	Concreto	Pintura lavable	6 años	Salón de clase /Corredor
Puerta 1	Madera	No presenta	---	Corredor
Puerta 2	Madera	No presenta	---	Corredor
Puerta 3	Madera	No presenta	---	Salón de clase
Puerta 4	Madera	No presenta	---	Salón de clase
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	
52 años	Puerta 1		24 horas/día Lunes – Domingo	Junio -Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 1C

Tabla 3.11: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	26/05/2017	35.00	160	0.22 ± 0.07	23.51 ± 7.11	53.00 ± 8.06
	30/06/2017	35.00	100	0.92 ± 0.18	98.17 ± 20.01	
		35.00	40	0.35 ± 0.11	37.33 ± 11.57	
2	30/06/2017	38.00	160	0.52 ± 0.13	51.58 ± 13.15	49.03 ± 7.81
	07/08/2017	38.00	100	0.56 ± 0.15	55.40 ± 14.72	
		38.00	40	0.41 ± 0.13	40.12 ± 12.60	
3	07/08/2017	28.00	160	0.12 ± 0.05	15.55 ± 6.67	10.37 ± 3.11
	04/09/2017	28.00	100	0.08 ± 0.04	10.37 ± 5.36	
		28.00	40	0.04 ± 0.03	5.18 ± 3.71	
4	04/09/2017	61.00	160	D.N.D.	-	-
	04/11/2017	61.00	100	D.N.D.	-	
		61.00	40	D.N.D.	-	
5	04/11/2017	55.00	160	1.03 ± 0.25	69.95 ± 16.89	56.75 ± 10.52
	29/12/2017	55.00	100	1.20 ± 0.36	81.83 ± 24.87	
		55.00	40	0.27 ± 0.14	18.48 ± 9.56	

D.N.D.: Detector no devuelto.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.12: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	40.15 ± 5.88	0.41	16.73	0.73 > α (0.05)
100	61.44 ± 8.89			
40	25.28 ± 4.97			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.12, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.13, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.13: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 1C)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 1.27	85.10 ± 0.44	53.00 ± 8.06	
17.00 ± 1.76	85.70 ± 2.35	49.03 ± 7.81	
16.60 ± 2.55	87.00 ± 2.81	10.37 ± 3.11	
19.55 ± 2.61	82.60 ± 1.57	56.75 ± 10.52	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.90	
Coeficiente de determinación r ²		82 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		45 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		21 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		41 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.99	1	
Concentración Rn-222	r = 0.69 r ² = 48 % P-valor = 0.31	r = -0.78 r ² = 61 % P-valor = 0.221	1

La correlación múltiple en este caso si está justificada, puesto que r²_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (45 %) supera en valor a los r²_{adj} evaluados de manera independiente (41 % y 21%); pero sólo el 45 % de la variación de Rn-222 puede ser debido a las variaciones de la humedad y la temperatura, en otras palabras, podemos decir que existe probablemente una correlación lineal débil entre estas variables.

Tabla 3.14: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 2 (ambiente 1C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	26/05/2017	35.00	160	0.26 ± 0.08	27.65 ± 9.04	32.72 ± 5.38
	30/06/2017	35.00	100	0.31 ± 0.08	33.18 ± 8.84	
		35.00	40	0.35 ± 0.09	37.33 ± 10.03	
2	30/06/2017	38.00	160	0.62 ± 0.16	61.13 ± 16.19	105.06 ± 16.89
	07/08/2017	38.00	100	0.54 ± 0.15	53.49 ± 15.03	
		38.00	40	2.04 ± 0.46	200.58 ± 45.61	
3	07/08/2017	28.00	160	0.72 ± 0.22	95.92 ± 29.56	61.36 ± 11.87
	04/09/2017	28.00	100	0.29 ± 0.10	38.89 ± 13.67	
		28.00	40	0.37 ± 0.11	49.26 ± 14.42	
4	04/09/2017	61.00	160	0.74 ± 0.19	45.22 ± 11.88	21.42 ± 4.38
	04/11/2017	61.00	100	0.21 ± 0.08	13.09 ± 4.92	
		61.00	40	0.10 ± 0.04	5.95 ± 2.75	
5	04/11/2017	55.00	160	0.78 ± 0.24	52.79 ± 16.34	48.39 ± 7.76
	29/12/2017	55.00	100	0.72 ± 0.17	48.83 ± 11.83	
		55.00	40	0.64 ± 0.17	43.55 ± 11.62	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.15: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 2 (ambiente 1C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	56.54 ± 10.08	-0.36	12.75	0.77 > α (0.05)
100	37.50 ± 6.40			
40	67.33 ± 12.58			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.15, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.16, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.16: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 1C)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 1.27	85.10 ± 0.44	32.72 ± 5.38	
17.00 ± 1.76	85.70 ± 2.35	105.06 ± 16.89	
16.60 ± 2.55	87.00 ± 2.81	61.36 ± 11.87	
17.20 ± 0.33	84.95 ± 0.67	21.42 ± 4.38	
19.55 ± 2.61	82.60 ± 1.57	48.39 ± 7.76	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.32	
Coeficiente de determinación r²		10 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		-79 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		-23 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		-21 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.95	1	
Concentración Rn-222	r = -0.27 r ² = 7 % P-valor = 0.664	r = 0.31 r ² = 10 % P-valor = 0.611	1

El r²_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-79 %) es menor que cero, lo que indica que probablemente no existe correlación lineal entre estas variables.

3.1.4 LUGAR DE TRABAJO 1D



Figura 3.13: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 1D. (b) Puerta 1 y ventanas

Tabla 3.17: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 1D

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	6 años	Salón de clase
Pared B	Concreto	Pintura lavable	6 años	Auditorio
Pared C	Concreto	Pintura lavable	6 años	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura lavable	6 años	Taller
Puerta 1	Madera	No presenta	---	Salón de clase
Puerta 2	Madera	No presenta	---	Auditorio
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Piso	Concreto	Mayólica	---	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
52 años	Puerta 1 Ventanas		10 horas/día Lunes – sábado	Junio- Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 1D

Tabla 3.18: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 1D)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	26/05/2017	35.00	160	1.81 ± 0.39	193.57 ± 42.52	82.50 ± 15.27
	30/06/2017	35.00	100	0.19 ± 0.09	20.74 ± 9.27	
		35.00	40	0.31 ± 0.13	33.18 ± 14.35	
2	30/06/2017	38.00	160	0.53 ± 0.12	52.21 ± 12.24	21.86 ± 4.38
	07/08/2017	38.00	100	0.08 ± 0.03	7.64 ± 3.32	
		38.00	40	0.06 ± 0.03	5.73 ± 3.43	
3	07/08/2017	28.00	160	0.04 ± 0.03	5.18 ± 3.71	29.38 ± 7.86
	04/09/2017	28.00	100	0.06 ± 0.03	7.78 ± 4.53	
		28.00	40	0.56 ± 0.17	75.18 ± 22.84	
4	04/09/2017	61.00	160	0.51 ± 0.13	30.94 ± 8.36	19.83 ± 3.63
	04/11/2017	61.00	100	0.21 ± 0.07	13.09 ± 4.54	
		61.00	40	0.25 ± 0.09	15.47 ± 5.29	
5	04/11/2017	55.00	160	0.10 ± 0.04	6.60 ± 3.05	13.64 ± 2.78
	29/12/2017	55.00	100	0.08 ± 0.04	5.28 ± 2.73	
		55.00	40	0.43 ± 0.11	29.04 ± 7.26	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.19: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 1D)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	57.70 ± 9.06	0.55	30.70	0.63 > α (0.05)
100	10.91 ± 2.41			
40	31.72 ± 5.73			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.19, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.20, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.20: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 1D)

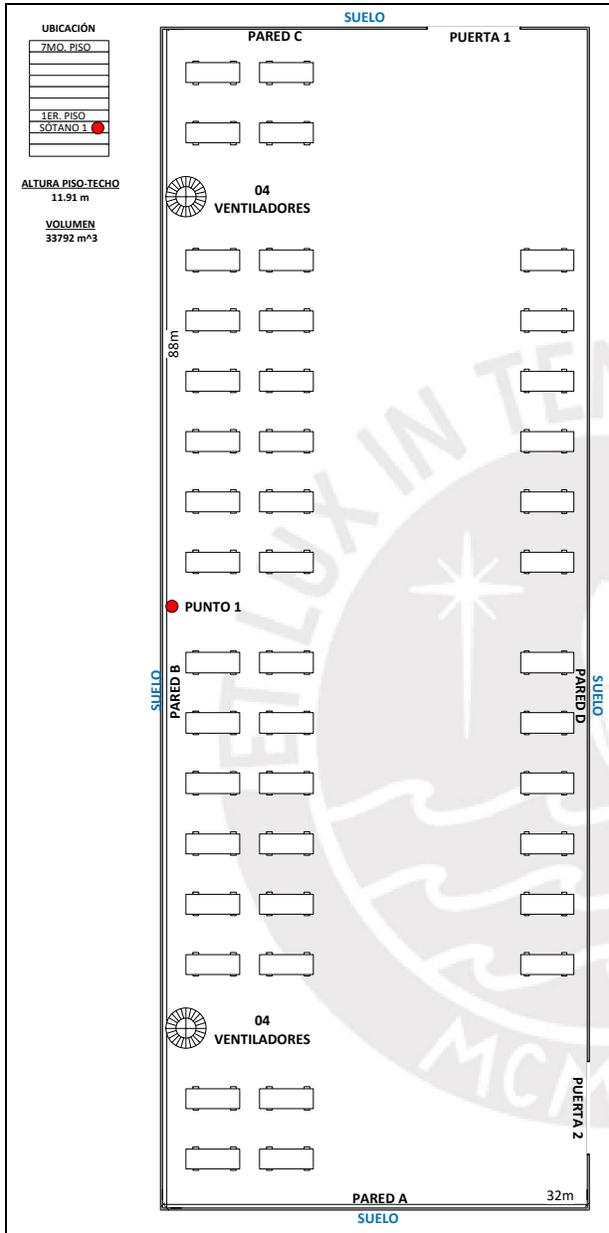
Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 2.09	85.10 ± 2.02	82.50 ± 15.27	
17.00 ± 1.34	85.70 ± 1.59	21.86 ± 4.38	
16.60 ± 2.05	87.00 ± 0.99	29.38 ± 7.86	
17.20 ± 0.96	84.95 ± 1.26	19.83 ± 3.63	
19.55 ± 0.88	82.50 ± 1.33	13.64 ± 2.78	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.40	
Coeficiente de determinación r^2		16 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 68 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		- 32 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		-27 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.95	1	
Concentración Rn-222	r = -0.10 r ² = 1 % P-valor = 0.879	r = 0.21 r ² = 4 % P-valor = 0.732	1

El r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-68 %) es menor que cero, lo que indica que probablemente no existe correlación lineal entre estas variables.

3.2 EDIFICIO 2

En este edificio se evaluaron 3 lugares de trabajo, definidos como: 2A, 2B y 2C. Empleamos un higrómetro digital (Digital Sensor HTC) para obtener datos de humedad relativa y temperatura. Con estos datos evaluamos la correlación entre la concentración de Rn-222 con la temperatura y humedad relativa.

3.2.1 LUGAR DE TRABAJO 2A



(a)

(b)

Figura 3.14: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2A. (b) Ventiladores

Tabla 3.21: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared B	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared C	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared D	Concreto	No presenta	--	Suelo
Puerta 1	No presenta	--	--	Área libre
Puerta 2	No presenta	--	--	Área libre
Piso	Concreto	No presenta	--	Sótano2
Techo	Concreto	No presenta	--	Oficinas/patio de comida
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
04 años	08 ventiladores	16 horas/día Lunes - sábado		Junio –Diciembre
	Puerta 1 Puerta 2	Ventilación constante Espacios abiertos		

Resultados y análisis de las mediciones en 2A

Tabla 3.22: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	14/06/2017	30.00	160	1.81 ± 0.39	225.83 ± 49.37	136.58 ± 20.01
	14/07/2017	30.00	100	1.22 ± 0.26	151.63 ± 32.91	
		30.00	40	0.26 ± 0.07	32.26 ± 9.04	
2	14/07/2017	24.00	160	0.14 ± 0.05	22.18 ± 7.94	25.54 ± 4.85
	07/08/2017	24.00	100	0.17 ± 0.05	26.21 ± 8.22	
		24.00	40	0.18 ± 0.06	28.23 ± 8.99	
3	07/08/2017	28.00	160	0.43 ± 0.16	57.03 ± 21.18	72.59 ± 14.64
	04/09/2017	28.00	100	0.82 ± 0.27	108.88 ± 35.67	
		28.00	40	0.39 ± 0.11	51.85 ± 14.37	
4	04/09/2017	57.00	160	0.68 ± 0.17	44.57 ± 11.08	56.46 ± 7.78
	31/10/2017	57.00	100	1.05 ± 0.24	68.77 ± 15.68	
		57.00	40	0.85 ± 0.20	56.03 ± 13.28	
5	31/10/2017	59.00	160	1.26 ± 0.30	79.97 ± 19.19	68.90 ± 9.44
	29/12/2017	59.00	100	0.95 ± 0.21	60.29 ± 13.79	
		59.00	40	1.05 ± 0.24	66.44 ± 15.62	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.23: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	85.92 ± 11.73	0.90	80.29	0.29 > α (0.05)
100	83.16 ± 10.69			
40	46.96 ± 5.62			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.23, el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

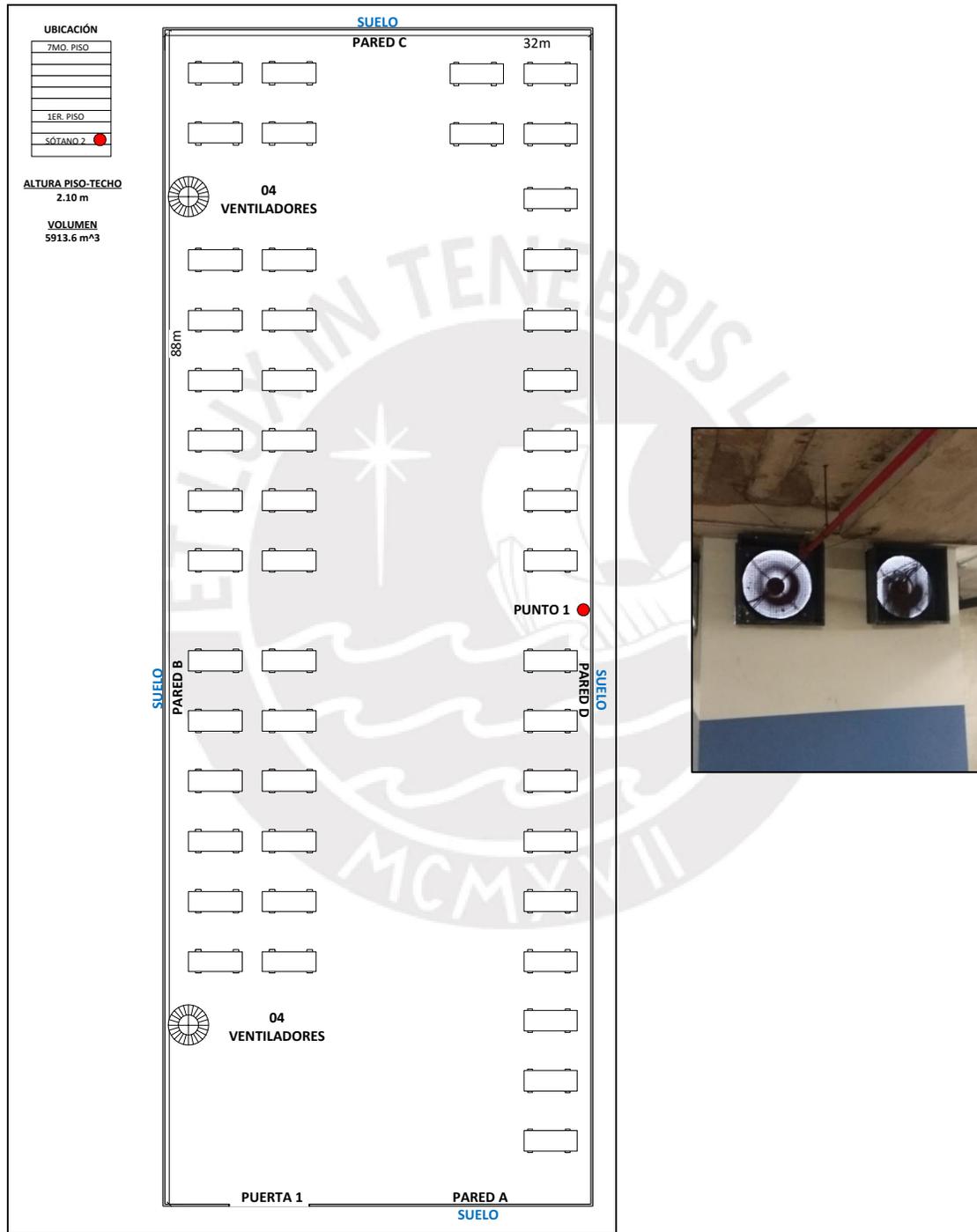
En la tabla 3.24, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.24: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
21.43 ± 1.24	71.67 ± 2.21	136.58 ± 20.01	
21.23 ± 0.23	82.67 ± 1.67	25.54 ± 4.85	
22.17 ± 0.55	70.67 ± 1.47	72.59 ± 14.64	
23.33 ± 2.34	64.67 ± 1.26	56.46 ± 7.78	
24.63 ± 0.77	70.67 ± 0.55	68.90 ± 9.44	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.57	
Coeficiente de determinación r²		33 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		-34%	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		- 31 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		- 14 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.58	1	
Concentración Rn-222	r = -0.13 r ² = 2 % P-valor = 0.836	r = -0.38 r ² = 14 % P-valor = 0.532	1

El r^2_{adj} . entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-34 %) es menor que cero, lo que indica que probablemente no existe correlación lineal entre estas variables.

3.2.2 LUGAR DE TRABAJO 2B



(a) (b)
 Figura 3.15: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2B. (b) Ventiladores

Tabla 3.25: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared B	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared C	Concreto	No presenta	--	Suelo
Pared D	Concreto	No presenta	--	Suelo
Puerta 1	No presenta	--	--	Área libre
Piso	Concreto	No presenta	--	Sótano 3
Techo	Concreto	No presenta	--	Sótano 1
Antigüedad edificio	Ventilación			Junio –Diciembre
	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	
04 años	08 ventiladores	16 horas/día Lunes - sábado		

Resultados y análisis de las mediciones en 2B

Tabla 3.26: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	14/06/2017	30.00	160	1.62 ± 0.35	201.64 ± 44.00	180.13 ± 23.74
	14/07/2017	30.00	100	1.44 ± 0.34	179.05 ± 43.51	
		30.00	40	1.28 ± 0.28	159.70 ± 35.24	
2	14/07/2017	24.00	160	0.19 ± 0.06	30.25 ± 8.90	30.25 ± 5.40
	07/08/2017	24.00	100	0.23 ± 0.07	36.29 ± 10.69	
		24.00	40	0.16 ± 0.05	24.20 ± 8.32	
3	07/08/2017	28.00	160	2.21 ± 0.48	295.54 ± 64.98	133.08 ± 22.97
	04/09/2017	28.00	100	0.47 ± 0.14	62.22 ± 18.36	
		28.00	40	0.31 ± 0.10	41.48 ± 13.74	
4	04/09/2017	57.00	160	0.31 ± 0.09	20.38 ± 5.67	29.29 ± 5.07
	31/10/2017	57.00	100	0.72 ± 0.18	47.12 ± 12.11	
		57.00	40	0.31 ± 0.11	20.38 ± 7.23	
5	31/10/2017	59.00	160	1.36 ± 0.31	86.12 ± 19.66	71.97 ± 12.32
	29/12/2017	59.00	100	0.91 ± 0.23	57.83 ± 14.86	
		59.00	40	-	-	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.27: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	126.79 ± 16.32	0.96	91.17	0.19 > α (0.05)
100	76.50 ± 10.42			
40	61.44 ± 9.85			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.27, el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.28, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.28: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2B)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
21.83 ± 0.99	78.33 ± 2.06	180.13 ± 23.74	
21.50 ± 1.33	67.00 ± 1.65	30.25 ± 5.40	
22.80 ± 1.25	68.67 ± 1.78	133.08 ± 22.97	
23.23 ± 2.01	61.67 ± 0.45	29.29 ± 5.07	
25.00 ± 1.99	71.33 ± 0.33	71.97 ± 12.32	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.84	
Coeficiente de determinación r²		70 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		41 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		-27 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		59 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.14	1	
Concentración Rn-222	r = -0.21 r ² = 4 % P-valor = 0.740	r = 0.83 r ² = 69 % P-valor = 0.079	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (41 %) no supera en valor a los r^2_{adj} evaluados de manera independiente (-27 % y 59 %); pero por medio del coeficiente de correlación de Pearson también observamos que probablemente no hay una correlación lineal entre estas variables.

3.2.3 LUGAR DE TRABAJO 2C

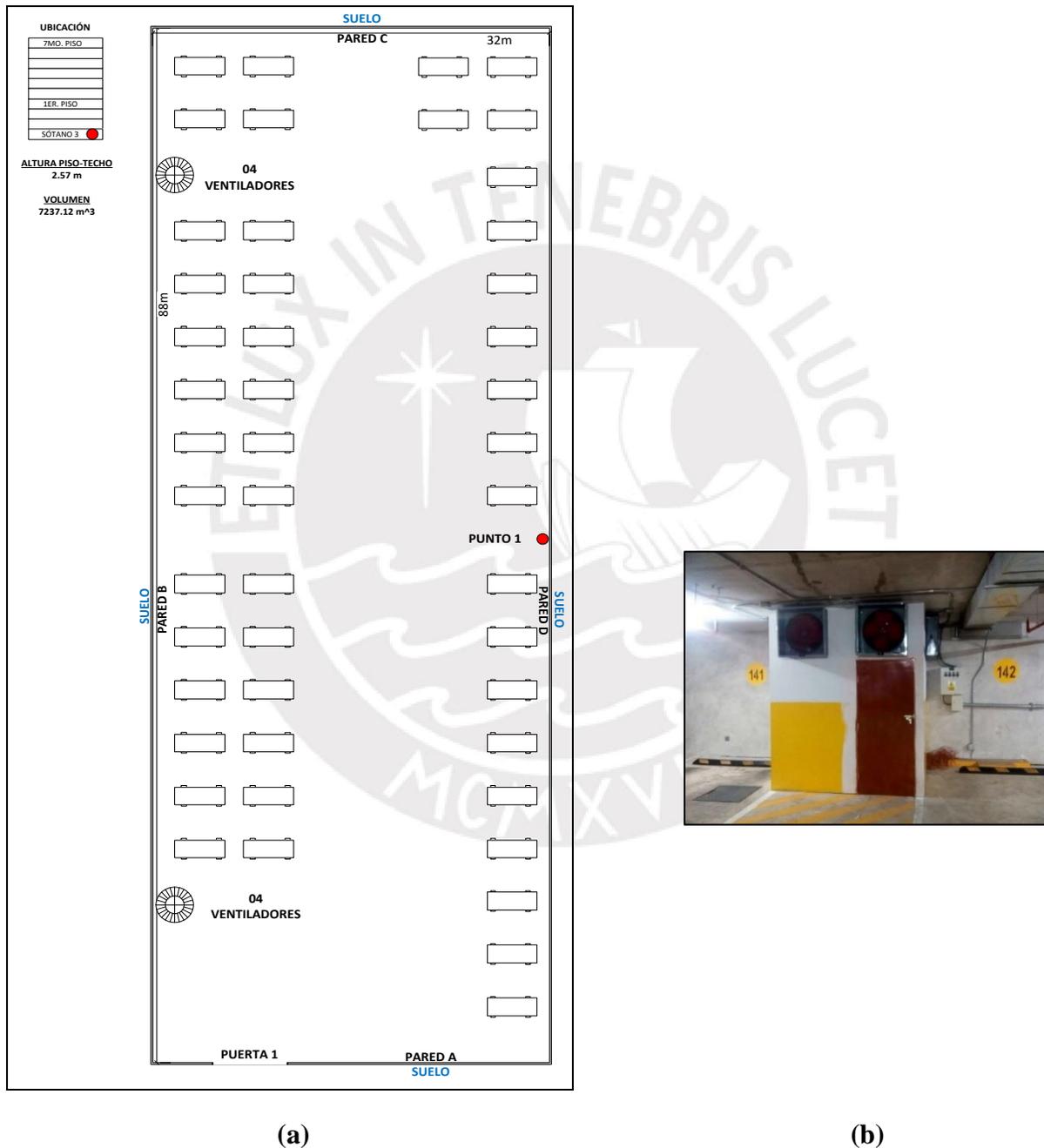


Figura 3.16: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 2C. (b) Ventiladores

Tabla 3.29: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 2C

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	--	--	Suelo
Pared B	Concreto	--	--	Suelo
Pared C	Concreto	--	--	Suelo
Pared D	Concreto	--	--	Suelo
Puerta 1	--	--	--	Salida al sótano 2
Piso	Concreto	--	--	Suelo
Techo	Concreto	--	--	Sótano 2
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
04 años	08 ventiladores	16 horas/día Lunes – Sábado		Junio –Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 2C

Tabla 3.30: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 2C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	14/06/2017	30.00	160	0.17 ± 0.06	20.97 ± 7.18	38.18 ± 6.99
	14/07/2017	30.00	100	0.61 ± 0.15	75.82 ± 18.64	
		30.00	40	0.14 ± 0.05	17.74 ± 6.41	
2	14/07/2017	24.00	160	0.36 ± 0.15	56.46 ± 23.81	38.31 ± 8.73
	07/08/2017	24.00	100	0.13 ± 0.06	20.16 ± 8.65	
		24.00	40	0.12 ± 0.04	18.15 ± 6.65	
3	07/08/2017	28.00	160	0.74 ± 0.18	98.51 ± 24.99	152.09 ± 24.20
	04/09/2017	28.00	100	0.39 ± 0.11	51.85 ± 15.07	
		28.00	40	2.29 ± 0.49	305.91 ± 66.48	
4	04/09/2017	57.00	160	0.58 ± 0.16	38.21 ± 10.43	29.29 ± 5.13
	31/10/2017	57.00	100	0.41 ± 0.12	26.74 ± 7.81	
		57.00	40	0.35 ± 0.12	22.92 ± 8.17	
5	31/10/2017	59.00	160	1.18 ± 0.28	75.05 ± 18.21	103.76 ± 13.57
	29/12/2017	59.00	100	1.50 ± 0.32	94.74 ± 20.75	
		59.00	40	2.23 ± 0.46	141.49 ± 29.90	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.31: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 2C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	57.84 ± 8.21	-0.83	68,89	0,38 > α (0.05)
100	53.86 ± 6.76			
40	101.24 ± 18.48			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.31, el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.32, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.32: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 2C)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
23.07 ± 0.77	69.67 ± 2.45	38.18 ± 6.99	
21.50 ± 1.12	80.33 ± 3.56	38.31 ± 8.73	
27.53 ± 2.01	57.00 ± 0.34	152.09 ± 24.20	
23.37 ± 0.56	66.33 ± 0.67	29.29 ± 5.13	
23.37 ± 1.16	73.33 ± 1.34	103.76 ± 13.57	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.98	
Coeficiente de determinación r ²		96 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		91 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		61 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		15 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.84	1	
Concentración Rn-222	r = 0.84 r ² = 71 % P-valor = 0.07	r = -0.60 r ² = 36 % P-valor = 0.284	1

La correlación múltiple en este caso está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (91 %) supera en valor a los r^2_{adj} evaluados de manera independiente (61 % y 15 %).

3.3 EDIFICIO 3

En este edificio se evaluaron 2 lugares de trabajo, definidos como: 3A y 3B. Empleamos un higrómetro digital (Digital Sensor HTC) para obtener datos de humedad relativa y temperatura. Con estos datos evaluamos la correlación entre la concentración de Rn-222 con la temperatura y humedad relativa.

3.3.1 LUGAR DE TRABAJO 3A

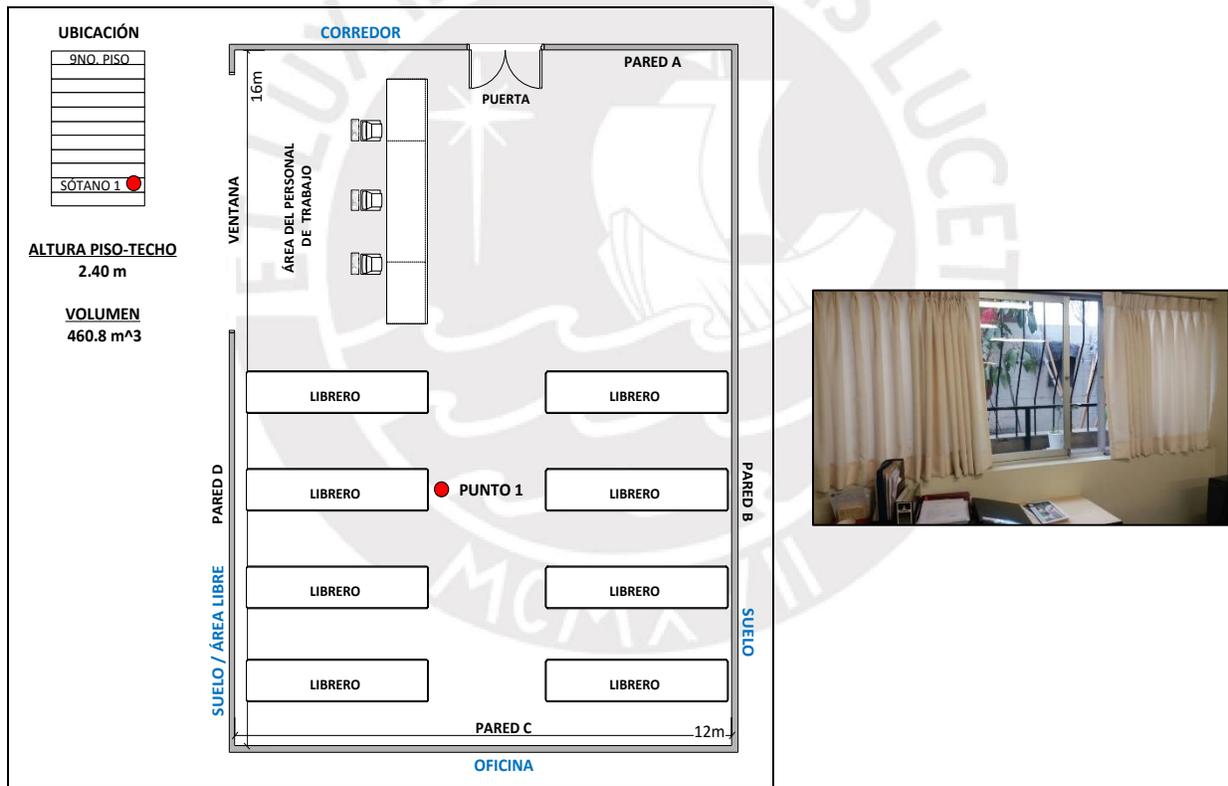


Figura 3.17: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 3A. (b) Ventanas

Tabla 3.33: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 3A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	01 año	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura lavable	01 año	Suelo
Pared C	Concreto	Pintura lavable	01 año	Oficina
Pared D	Concreto	Pintura lavable	01 año	Suelo / área libre
Puerta	Madera	No presenta	--	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Sótano2
Techo	Concreto	No determinado	--	Biblioteca
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
~ 40 años	Ventanas Puerta	10 horas/día Lunes – Sábado		Junio –Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 3A

Tabla 3.34: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 3A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	07/06/2017	24.00	160	0.21 ± 0.07	32.26 ± 11.60	59.15 ± 10.08
	30/06/2017	24.00	100	0.73 ± 0.17	112.92 ± 26.35	
		24.00	40	0.21 ± 0.06	32.26 ± 9.26	
2	30/06/2017	39.00	160	0.16 ± 0.05	14.89 ± 5.08	12.82 ± 2.63
	08/08/2017	39.00	100	0.14 ± 0.04	13.65 ± 4.30	
		39.00	40	0.10 ± 0.04	9.93 ± 4.23	
3	08/08/2017	28.00	160	3.32 ± 0.64	443.32 ± 87.02	437.27 ± 54.50
	04/09/2017	28.00	100	2.16 ± 0.46	287.77 ± 62.02	
		28.00	40	4.35 ± 0.91	580.72 ± 123.74	
4	04/09/2017	62.00	160	0.64 ± 0.15	38.64 ± 9.18	33.95 ± 5.00
	04/11/2017	62.00	100	0.62 ± 0.16	37.47 ± 9.64	
		62.00	40	0.43 ± 0.11	25.76 ± 6.91	
5	04/11/2017	39.00	160	1.18 ± 0.26	113.54 ± 25.70	119.12 ± 15.81
	15/12/2017	39.00	100	1.05 ± 0.23	100.51 ± 22.86	
		39.00	40	1.50 ± 0.34	143.32 ± 32.67	

Existe un nivel de concentración de 437.27 ± 54.5 Bq/m³ durante el mes de agosto y esto se debió a que la única persona que trabaja aquí, estuvo de vacaciones, por tal motivo el ambiente se mantuvo cerrado y sin ventilación.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.35: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 3A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r^2) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m^3)			
160	128.53 ± 18.41	-0.62	38	0,56 > α (0.05)
100	110.46 ± 14.39			
40	158.40 ± 25.71			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.35, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.36, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

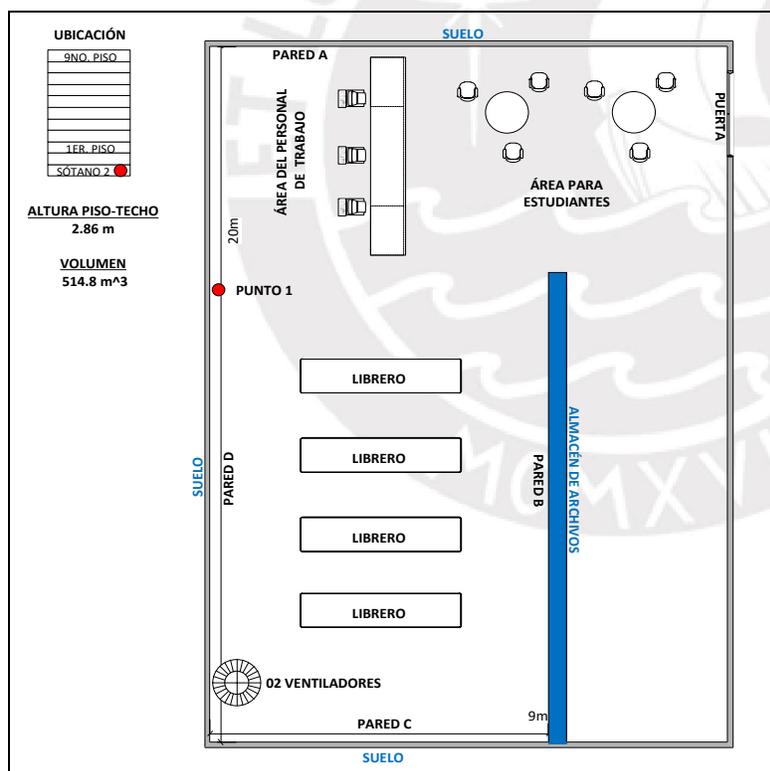
Tabla 3.36: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 3A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m^3)
25.40 ± 0.79	74.00 ± 2.16	59.15 ± 10.08
23.30 ± 1.21	72.00 ± 2.09	12.82 ± 2.63
24.13 ± 0.45	64.33 ± 1.45	437.27 ± 54.5
22.13 ± 1.25	74.64 ± 0.78	33.95 ± 5.00
20.97 ± 0.66	80.33 ± 2.34	119.12 ± 15.81
Estadísticas de la regresión		
Coeficiente de correlación múltiple		0.76
Coeficiente de determinación r^2		58 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		15 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		-28 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		33 %
Coeficiente de correlación Pearson entre variables		

	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.61	1	
Concentración Rn-222	r = 0.20 r ² = 4 % P-valor = 0.742	r = -0.71 r ² = 50 % P-valor = 0.183	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (15 %) no supera en valor a los r^2_{adj} evaluados de manera independiente entre la concentración y la humedad relativa (33 %); pero por medio del coeficiente de correlación de Pearson también observamos que probablemente no hay una correlación lineal entre estas variables.

3.3.2 LUGAR DE TRABAJO 3B



(a)



(b)

Figura 3.18: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 3B. (b) Imagen real del ambiente.

Tabla 3.37: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 3B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	01 año	Suelo
Pared B	Concreto	Pintura lavable	01 año	Almacén de archivos
Pared C	Concreto	Pintura lavable	01 año	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura lavable	01 año	Suelo
Puerta	Madera	No presenta	--	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	No determinado	Biblioteca
Antigüedad edificio	Ventilación			
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	Periodo
~ 40 años	02 ventiladores		14 horas/día Lunes - Sábado	Junio –Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 3B

Tabla 3.38: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 3B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	07/06/2017	38.00	160	0.36 ± 0.09	35.66 ± 9.30	25.89 ± 4.43
	14/07/2017	38.00	100	0.21 ± 0.07	20.38 ± 6.67	
		38.00	40	0.22 ± 0.07	21.65 ± 6.78	
2	14/07/2017	25.00	160	0.18 ± 0.06	27.10 ± 8.44	72.91 ± 11.52
	07/08/2017	25.00	100	0.89 ± 0.19	133.57 ± 28.85	
		25.00	40	0.39 ± 0.11	58.07 ± 17.07	
3	07/08/2017	29.00	160	0.56 ± 0.15	72.59 ± 19.40	81.77 ± 11.94
	04/09/2017	29.00	100	0.62 ± 0.16	80.10 ± 20.46	
		29.00	40	0.72 ± 0.17	92.61 ± 22.10	
4	04/09/2017	62.00	160	0.64 ± 0.18	38.64 ± 11.20	37.08 ± 5.77
	04/11/2017	62.00	100	0.62 ± 0.16	37.47 ± 9.55	
		62.00	40	0.58 ± 0.15	35.12 ± 9.13	
5	04/11/2017	39.00	160	0.43 ± 0.11	40.95 ± 10.38	29.78 ± 5.16
	15/12/2017	39.00	100	0.23 ± 0.08	22.34 ± 7.83	
		39.00	40	0.27 ± 0.09	26.06 ± 8.41	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.39: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 3B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	42.99 ± 5.54	-0.23	5.29	0.86 > α (0.05)
100	58.77 ± 7.61			
40	46.70 ± 6.26			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.39, el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.40, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.40: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 3B)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
25.50 ± 1.03	73.67 ± 2.03	25.89 ± 4.43	
21.07 ± 2.33	76.33 ± 1.23	72.91 ± 11.52	
25.50 ± 0.89	58.00 ± 2.34	81.77 ± 11.94	
24.20 ± 0.56	59.33 ± 1.45	37.08 ± 5.77	
20.97 ± 1.24	80.33 ± 0.99	29.78 ± 5.16	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.52	
Coeficiente de determinación r ²		27 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 45 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		-33%	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		- 14 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.71	1	
Concentración Rn-222	r = 0.01 r ² = 0.01 % P-valor = 0.991	r = -0.38 r ² = 14% P-valor = 0.534	1

El r^2_{adj} . entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-45 %) es menor que cero, lo que indica que probablemente no existe correlación lineal entre estas variables.

3.4 EDIFICIO 4

En este edificio se evaluó 1 lugar de trabajo, definido como: 4A. Obtuvimos datos de humedad relativa y temperatura de una estación meteorológica ubicada en las proximidades de este edificio. Con estos datos evaluamos la correlación entre la concentración de Rn-222 con la temperatura y humedad relativa.

3.4.1 LUGAR DE TRABAJO 4A

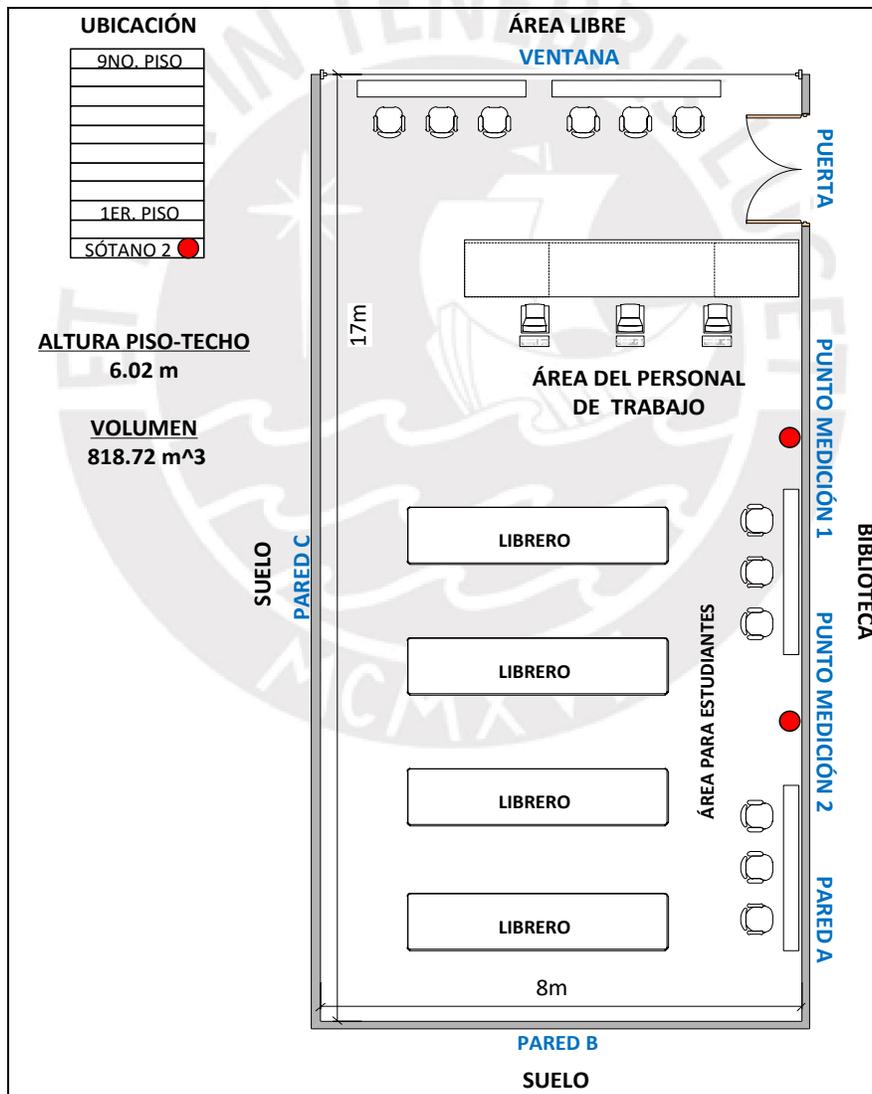


Figura 3.19: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 4A

Tabla 3.41: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 4A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura látex	04 años	Biblioteca
Pared B	Concreto	Pintura látex	04 años	Suelo
Pared C	Concreto	Pintura látex	04 años	Suelo
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Puerta	Madera	No presenta	---	Biblioteca
Piso	Concreto	Mayólica	04 años	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Sistema de ventilación
	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	
04 años	Ventanas		10 horas/día Lunes – Sábado	Junio -Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 4A

Tabla 3.42: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 4A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	26/05/2017	35	160	0.04 ± 0.02	4.15 ± 2.48	9.68 ± 3.51
	30/06/2017	35	100	0.08 ± 0.06	8.30 ± 5.94	
		35	40	0.16 ± 0.08	16.59 ± 8.33	
2	30/06/2017	38	160	0.10 ± 0.05	10.19 ± 5.01	10.19 ± 2.63
	07/08/2017	38	100	0.10 ± 0.05	10.19 ± 4.64	
		38	40	0.10 ± 0.04	10.19 ± 3.93	
3	07/08/2017	28	160	0.47 ± 0.15	62.22 ± 20.30	40.62 ± 8.88
	04/09/2017	28	100	0.25 ± 0.11	33.70 ± 14.83	
		28	40	0.19 ± 0.07	25.92 ± 8.82	
4	04/09/2017	61	160	0.12 ± 0.05	7.14 ± 3.00	9.92 ± 2.26
	04/11/2017	61	100	0.16 ± 0.06	9.52 ± 3.97	
		61	40	0.21 ± 0.07	13.09 ± 4.61	
5	04/11/2017	41	160	0.16 ± 0.06	14.16 ± 5.32	23.61 ± 5.27
	15/12/2017	41	100	0.27 ± 0.08	24.79 ± 7.73	
		41	40	0.35 ± 0.14	31.87 ± 12.70	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.43: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 4A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	19.57 ± 4.38	0.02	0.04	0.99 > α (0.05)
100	17.30 ± 3.75			
40	19.53 ± 3.72			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.43, el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.44, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.44: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 4A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 0.56	85.10 ± 1.34	9.68 ± 3.51	
17.00 ± 0.99	85.70 ± 2.23	10.19 ± 2.63	
16.60 ± 1.23	87.00 ± 0.67	40.62 ± 8.88	
17.20 ± 1.67	84.95 ± 0.54	9.92 ± 2.26	
19.55 ± 2.01	82.60 ± 1.25	23.61 ± 5.27	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.71	
Coeficiente de determinación r ²		51 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		2 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		-33%	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		-22%	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.95	1	
Concentración Rn-222	r = -0.09 r ² = 1 % P-valor = 0.888	r = 0.30 r ² = 9 % P-valor = 0.63	1

El r²_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura es 2 %, lo que indica que probablemente no existe correlación lineal entre estas variables.

Tabla 3.45: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 2 (ambiente 4A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	26/05/2017	35.00	160	0.23 ± 0.07	24.89 ± 7.98	24.20 ± 4.5
	30/06/2017	35.00	100	0.14 ± 0.05	14.52 ± 5.76	
		35.00	40	0.31 ± 0.09	33.18 ± 9.22	
2	30/06/2017	38.00	160	0.10 ± 0.04	10.19 ± 4.00	44.57 ± 6.86
	07/08/2017	38.00	100	0.80 ± 0.19	78.96 ± 18.77	
		38.00	40	0.26 ± 0.07	25.47 ± 7.39	
3	07/08/2017	28.00	160	0.23 ± 0.08	31.11 ± 10.46	245.42 ± 34.80
	04/09/2017	28.00	100	2.64 ± 0.54	352.58 ± 73.45	
		28.00	40	2.64 ± 0.54	352.58 ± 5.29	
4	04/09/2017	61.00	160	0.25 ± 0.09	15.47 ± 5.29	11.11 ± 2.62
	04/11/2017	61.00	100	0.14 ± 0.05	8.33 ± 3.30	
		61.00	40	0.16 ± 0.08	9.52 ± 4.78	
5	04/11/2017	41.00	160	0.45 ± 0.13	40.72 ± 12.16	21.84 ± 4.81
	15/12/2017	41.00	100	0.12 ± 0.05	10.62 ± 4.55	
		41.00	40	0.16 ± 0.07	14.16 ± 6.27	

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.46: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 2 (ambiente 4A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	24.48 ± 3.82	-0.82	67.24	0.38 > α (0.05)
100	93.00 ± 15.25			
40	86.98 ± 3.03			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.46, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 2.

En la tabla 3.47, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa.

Tabla 3.47: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 2 (ambiente 4A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
17.80 ± 0.56	85.10 ± 2.03	24.20 ± 4.50	
17.00 ± 0.34	85.70 ± 1.29	44.57 ± 6.86	
16.60 ± 1.20	87.00 ± 0.45	245.42 ± 34.80	
17.20 ± 2			
.30	84.95 ± 2.30	11.11 ± 2.62	
19.55 ± 0.67	82.60 ± 1.99	21.84 ± 4.81	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.87	
Coeficiente de determinación r²		75 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		51 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		3%	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		33%	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.95	1	
Concentración Rn-222	r = -0.52 r ² = 27 % P-valor = 0.367	r = 0.70 r ² = 49 % P-valor = 0.184	1

La correlación múltiple en este caso si está justificada, puesto que r²_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (51 %) supera en valor a los r²_{adj} evaluados de manera independiente (3 % y 33%); pero sólo el 51 % de la variación de Rn-222 puede ser debido a las variaciones de la humedad y la temperatura, en otras palabras, podemos decir que existe probablemente una correlación lineal débil entre estas variables.

3.5 EDIFICIO 5

3.5.1 LUGAR DE TRABAJO 5A

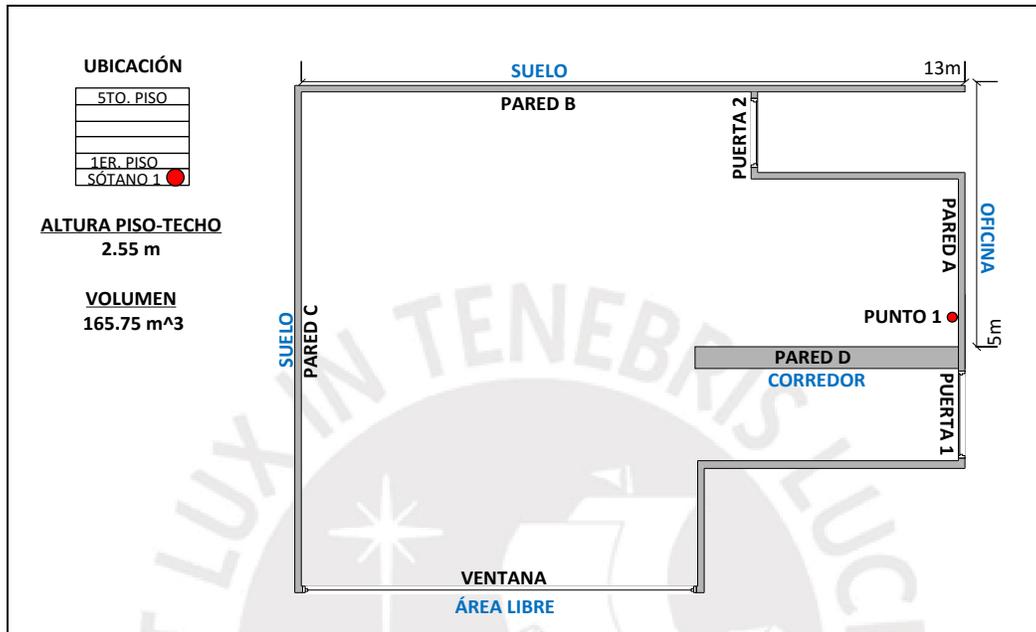


Figura 3.20: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 5A

Tabla 3.48: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 5A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura látex	No determinado	Oficina
Pared B	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Pared C	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura látex	No determinado	Corredor
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Puerta 1	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	
	Ventanas		10 horas/día Lunes - Sábado	
06 años	Ventanas		10 horas/día Lunes - Sábado	Junio - Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 5A

Tabla 3.49: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 5A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)			Concentración (Bq/m ³)			Promedio Concentración		
					±			±			±	
1	21/08/2017	79.00	160	1.83	±	0.37	86.37	±	17.69	83.62	±	10.10
	08/11/2017	79.00	100	2.16	±	0.43	101.99	±	20.56			
		79.00	40	1.32	±	0.28	62.48	±	13.47			
2	08/11/2017	52.00	160	0.85	±	0.21	86.32	±	21.66	71.28	±	10.67
	30/12/2017	52.00	100	0.51	±	0.13	51.01	±	13.54			
		52.00	40	0.76	±	0.19	76.51	±	19.27			

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que se encuentra en uno de los laterales del edificio y tiene acceso directo a un patio con muy buena ventilación. Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.50: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 5A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r^2) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	86.35 ± 13.98	0.99	98.01	0.048 < α (0.05)
100	76.50 ± 12.31			
40	69.50 ± 11.76			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.50, el P- valor es menor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.5.2 LUGAR DE TRABAJO 5B

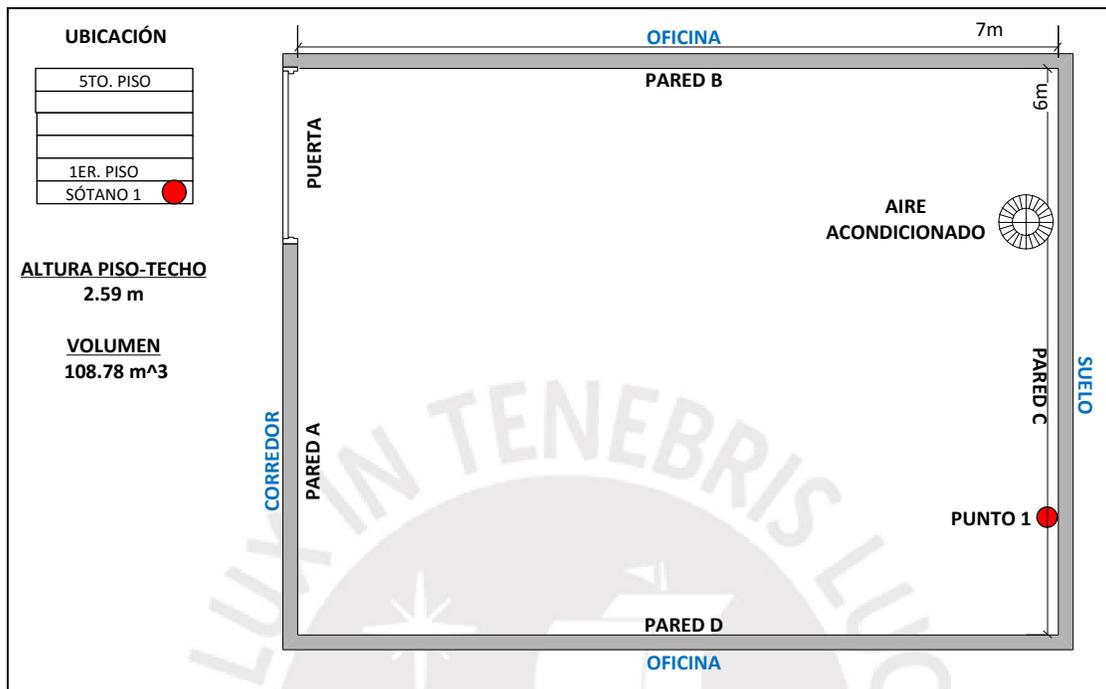


Figura 3.21: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 5B

Tabla 3.51: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 5B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura látex	No determinado	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura látex	No determinado	Oficina
Pared C	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura látex	No determinado	Oficina
Puerta	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	
	Aire acondicionado		10 horas/día Lunes - Sábado	
06 años			Junio - Diciembre	

Resultados y análisis de las mediciones en 5B

Tabla 3.52: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 5B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	21/08/2017	79.00	160	3.69 ± 0.72	174.58 ± 34.91	210.11 ± 24.28
	08/11/2017	79.00	100	5.44 ± 1.04	257.28 ± 50.32	
		79.00	40	4.20 ± 0.82	198.47 ± 39.43	
2	08/11/2017	52.00	160	4.80 ± 0.92	484.59 ± 95.46	304.09 ± 38.64
	30/12/2017	52.00	100	1.94 ± 0.41	196.19 ± 41.74	
		52.00	40	2.29 ± 0.49	231.50 ± 50.82	

Como podemos observar este ambiente 5B (tabla 3.52), muestra niveles de concentración de Radón 222 mayores al encontrado en el ambiente 5A (tabla 3.49), y esto se debe a pesar que 5B tiene sistema de aire acondicionado, este lugar se encuentra aproximadamente en la parte central del edificio, mientras que 5A se encuentra se encuentra en uno de los laterales del edificio y tiene acceso directo a un patio con muy buena ventilación.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.53: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 5B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	329.58 ± 50.82	0.91	82.60	0.27 > α (0.05)
100	226.73 ± 32.69			
40	214.99 ± 32.16			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.53, el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.6 EDIFICIO 6

3.6.1 LUGAR DE TRABAJO 6A

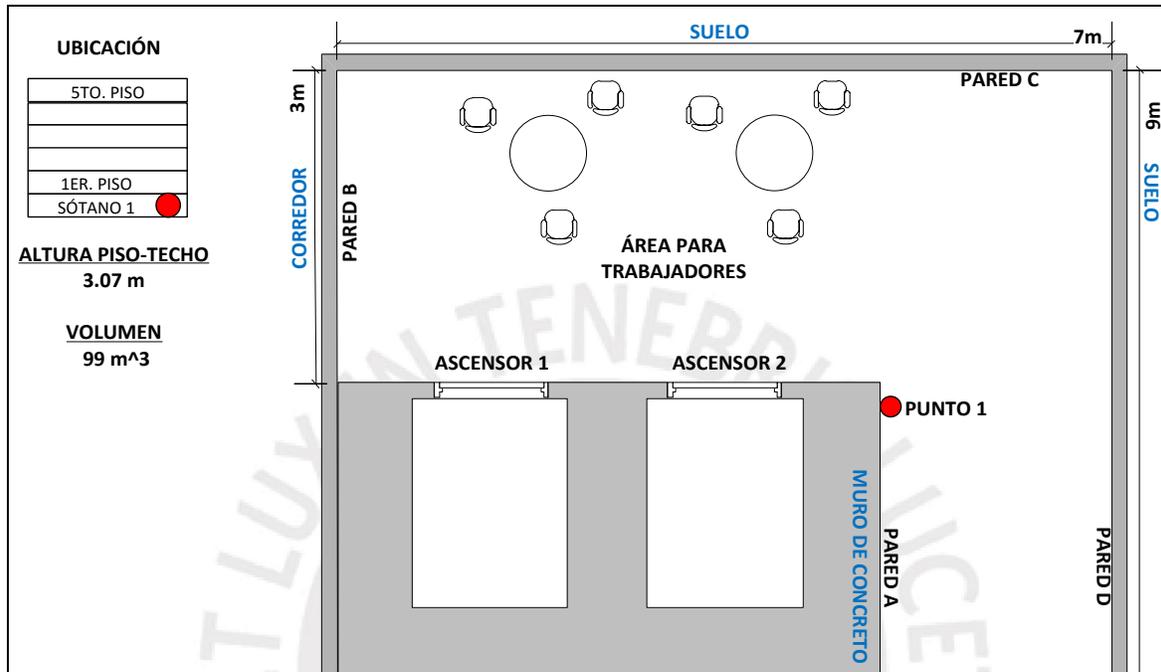


Figura 3.22: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 6A

Tabla 3.54: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 6A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura látex	No determinado	Ascensores
Pared B	Concreto	Pintura látex	No determinado	Corredor
Pared C	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
10 años	Aire acondicionado		10 horas /día	Junio - Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 6A

Tabla 3.55: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 6A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	22/08/2017	113.00	160	0.74 ± 0.19	24.41 ± 6.50	21.20 ± 3.31
	13/12/2017	113.00	100	0.74 ± 0.19	24.41 ± 6.25	
		113.00	40	0.45 ± 0.12	14.77 ± 4.14	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tiene sistema de aire acondicionado.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, empleamos el coeficiente de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.56: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 6A)

Durante el periodo de medición		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	24.41 ± 6.50	0.87	75.00	0.33 > α (0.05)
100	24.41 ± 6.25			
40	14.77 ± 4.14			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.536 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.6.2 LUGAR DE TRABAJO 6B

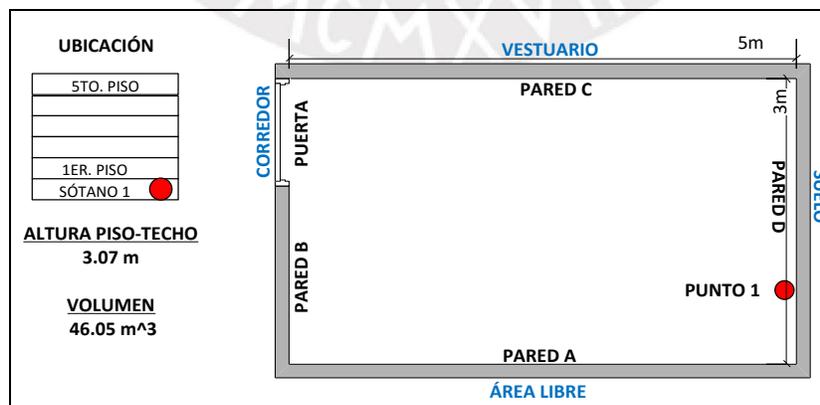


Figura 3.23: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 6B

Tabla 3.57: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 6B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura látex	No determinado	Área libre
Pared B	Concreto	Pintura látex	No determinado	Corredor
Pared C	Concreto	Pintura látex	No determinado	Vestuario
Pared D	Concreto	Pintura látex	No determinado	Suelo
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	
	Aire acondicionado		10 horas /día	
10 años				Junio -Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 6B

Tabla 3.58: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 6B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	22/08/2017	113.00	160	1.83 ± 0.49	60.38 ± 16.54	45.82 ± 6.92
	13/12/2017	113.00	100	1.32 ± 0.29	43.68 ± 9.77	
		113.00	40	1.01 ± 0.23	33.40 ± 7.87	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tiene sistema de aire acondicionado.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, empleamos el coeficiente de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.59: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 6B)

Durante el periodo de medición		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	60.38 ± 16.54	0.99	98	0.087 > α (0.05)
100	43.68 ± 9.77			
40	33.40 ± 7.87			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.59 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.7 EDIFICIO 7

3.7.1 LUGAR DE TRABAJO 7A

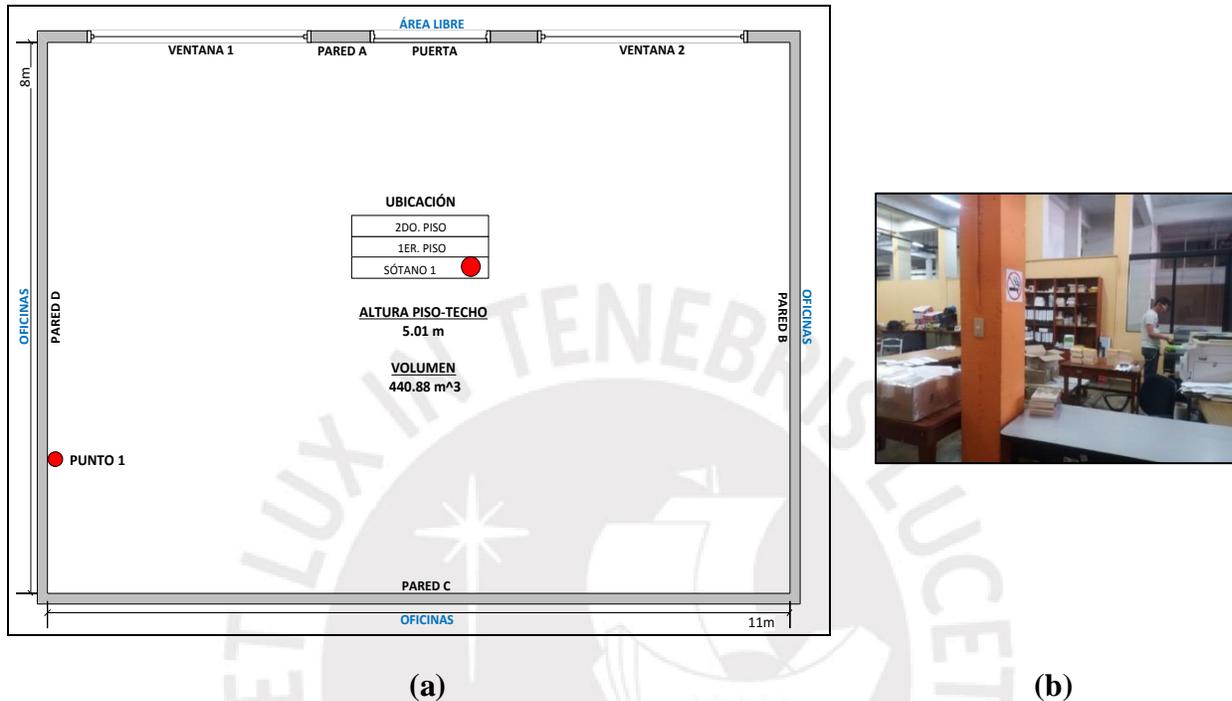


Figura 3.24: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7A. (b) Imagen real del ambiente.

Tabla 3.60: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	No determinado	No determinado	Área libre
Pared B	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Pared C	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Pared D	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Ventana 1	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Ventana 2	Vidrio	No presenta	---	Área libre
Piso	Concreto	No presenta	---	Suelo
Techo	Concreto	No presenta	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
20 años	Ventanas Puerta	10 horas / día Lunes - Sábado	Junio - Diciembre	

Resultados y análisis de las mediciones en 7A

Tabla 3.61: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	18/08/2017	102.00	160	1.28 ± 0.30	46.97 ± 11.17	69.74 ± 9.08
	28/11/2017	102.00	100	2.70 ± 0.55	98.92 ± 20.53	
		102.00	40	1.73 ± 0.38	63.34 ± 14.00	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que las puertas y ventanas colindan con un patio.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, empleamos el coeficiente de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.62: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	46.97 ± 11.17	-0.31	9.61	0.80 > α (0.05)
100	98.92 ± 20.53			
40	63.34 ± 14.00			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.62 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.7.2 LUGAR DE TRABAJO 7B

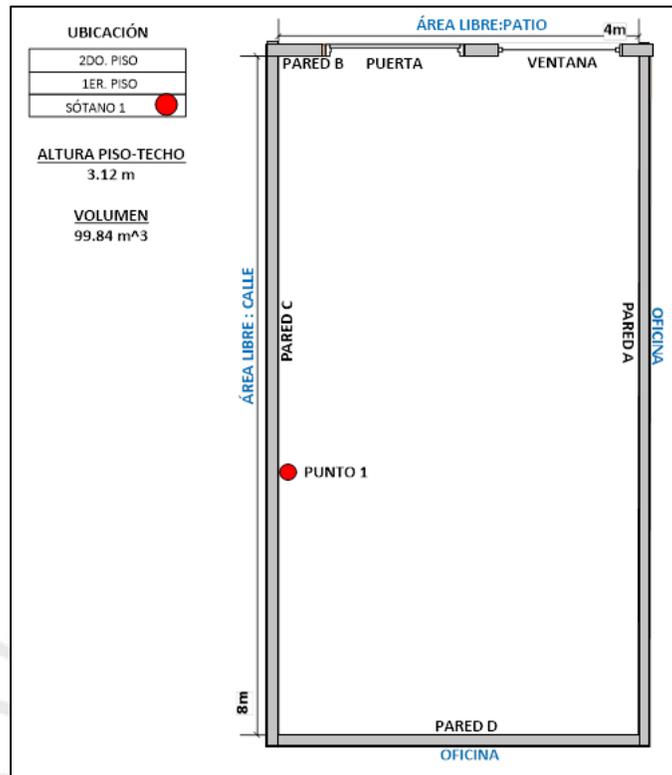


Figura 3.25: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7B

Tabla 3.63: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	No presenta	---	Oficina
Pared B	Concreto	No presenta	---	Patio
Pared C	Concreto	No presenta	---	Calle
Pared D	Concreto	No presenta	---	Oficina
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Patio
Puerta	Madera	No presenta	---	
Piso	Concreto	No presenta	---	Suelo
Techo	Calamina	No presenta	---	---
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
20 años	Ventana Puerta	05 horas / día Lunes – Sábado		Junio – Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 7B

Tabla 3.64: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	18/08/2017	102.00	160	3.34 ± 0.66	122.41 ± 24.65	90.14 ± 11.82
	28/11/2017	102.00	100	2.10 ± 0.54	76.86 ± 19.94	
		102.00	40	1.94 ± 0.43	71.17 ± 15.89	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que las puertas y ventanas colindan con un patio.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, empleamos el coeficiente de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.65: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	122.41 ± 24.65	0.91	83.22	0.27 > α (0.05)
100	76.86 ± 19.94			
40	71.17 ± 15.89			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.65 el P-valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.7.3 LUGAR DE TRABAJO 7C

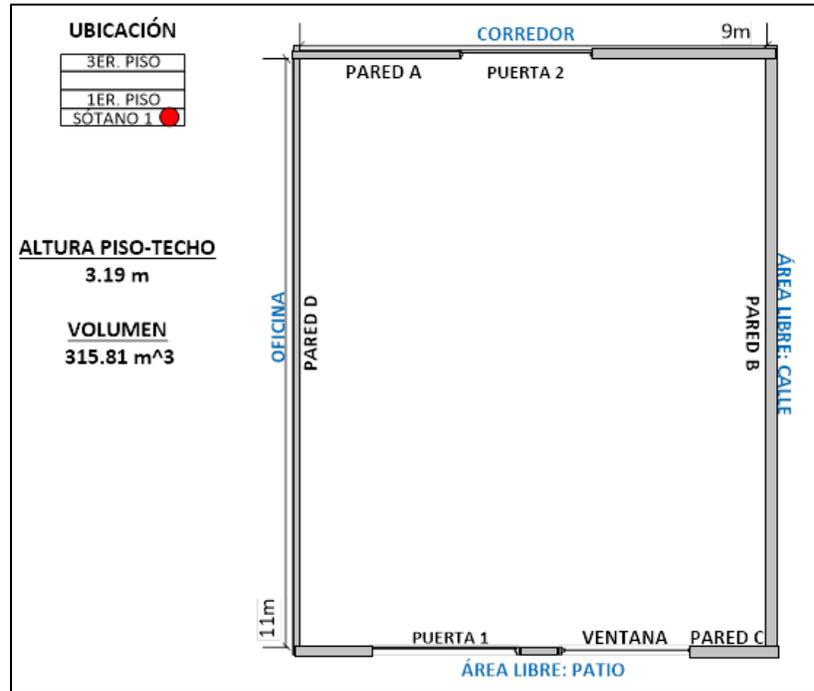


Figura 3.26: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 7C

Tabla 3.66: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 7C

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	No presenta	---	Corredor
Pared B	Concreto	No presenta	---	Calle
Pared C	Concreto	No presenta	---	Patio
Pared D	Concreto	No presenta	---	Oficina
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Patio
Puerta 1	Madera	No presenta	---	Patio
Puerta 2	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	No presenta	---	Suelo
Techo	Calamina	No presenta	---	---
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
20 años	Ventana Puerta	05 horas / día Lunes - Sábado	Junio -Diciembre	

Resultados y análisis de las mediciones en 7C

Tabla 3.67: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 7C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	18/08/2017	102.00	160	0.72 ± 0.16	26.33 ± 6.04	33.21 ± 4.65
	28/11/2017	102.00	100	0.95 ± 0.24	34.87 ± 9.05	
		102.00	40	1.05 ± 0.23	38.43 ± 8.74	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que las puertas y ventanas colindan con un patio.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, empleamos el coeficiente de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.68: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 7C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	26.33 ± 6.04	-0.97	94.65	0.149 > α (0.05)
100	34.87 ± 9.05			
40	38.43 ± 8.74			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.68 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.8 EDIFICIO 8

3.8.1 LUGAR DE TRABAJO 8A



Figura 3.27: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8A. (b) Punto de medición

Tabla 3.69: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura	---	Vivienda
Pared B	Concreto	Pintura	---	Búnker Braquiterapia
Pared C	Concreto	Pintura	---	Corredor
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Patio
Puerta	Madera	No presenta	---	Patio
Piso	Concreto	Pintura	---	Oficinas
Techo	Calamina	Pintura	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Sistema de ventilación
	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	Sistema de ventilación	
24 años	Ventana Puerta	10 horas / día Lunes - Sábado		Junio -Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 8A

Tabla 3.70: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	25/05/2017	39.00	160	0.13 ± 0.05	28.47 ± 10.68	41.75 ± 8.52
	03/07/2017	39.00	100	0.25 ± 0.08	54.09 ± 18.12	
		39.00	40	0.19 ± 0.07	42.70 ± 14.51	
2	03/07/2017	32.00	160	0.17 ± 0.06	19.66 ± 7.26	28.73 ± 5.52
	04/08/2017	32.00	100	0.41 ± 0.11	48.39 ± 13.47	
		32.00	40	0.16 ± 0.05	18.15 ± 6.29	
3	04/08/2017	40.00	160	0.29 ± 0.11	27.22 ± 10.01	21.78 ± 4.72
	13/09/2017	40.00	100	0.14 ± 0.05	12.70 ± 5.09	
		40.00	40	0.27 ± 0.09	25.41 ± 8.61	
4	13/09/2017	55.00	160	0.27 ± 0.08	18.48 ± 5.76	21.12 ± 3.06
	07/11/2017	55.00	100	0.35 ± 0.10	23.76 ± 7.12	
		55.00	40	0.04 ± 0.01	2.64 ± 0.48	
5	07/11/2017	45.00	160	0.17 ± 0.07	14.52 ± 5.69	11.83 ± 2.99
	22/12/2017	45.00	100	0.12 ± 0.06	9.68 ± 4.76	
		45.00	40	0.14 ± 0.06	11.29 ± 5.05	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que las puertas y ventanas colindan con un patio.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.71: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	21.67 ± 3.65	-0.42	17.64	0.73 > α (0.05)
100	29.72 ± 4.94			
40	25.05 ± 3.74			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.71 el P-valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.72, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Empleamos un higrómetro digital (Digital Sensor HTC) para obtener datos de humedad relativa y temperatura.

Tabla 3.72: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
23.40 ± 2.01	66.67 ± 1.23	41.75 ± 8.52	
23.13 ± 1.78	78.67 ± 0.99	28.73 ± 5.52	
25.20 ± 1.23	65.00 ± 2.30	21.78 ± 4.72	
23.90 ± 0.67	59.67 ± 0.56	21.12 ± 3.06	
25.28 ± 0.45	69.00 ± 0.79	11.83 ± 2.99	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.76	
Coeficiente de determinación r²		58 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		17 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		42%	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		-30%	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.35	1	
Concentración Rn-222	r = -0.75 r ² = 56 % P-valor = 0.141	r = 0.15 r ² = 2 % P-valor = 0.81	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r²_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (17 %) no supera en valor a los r²_{adj} evaluados de manera independiente entre la concentración y la temperatura (42 %); además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.8.2 LUGAR DE TRABAJO 8B

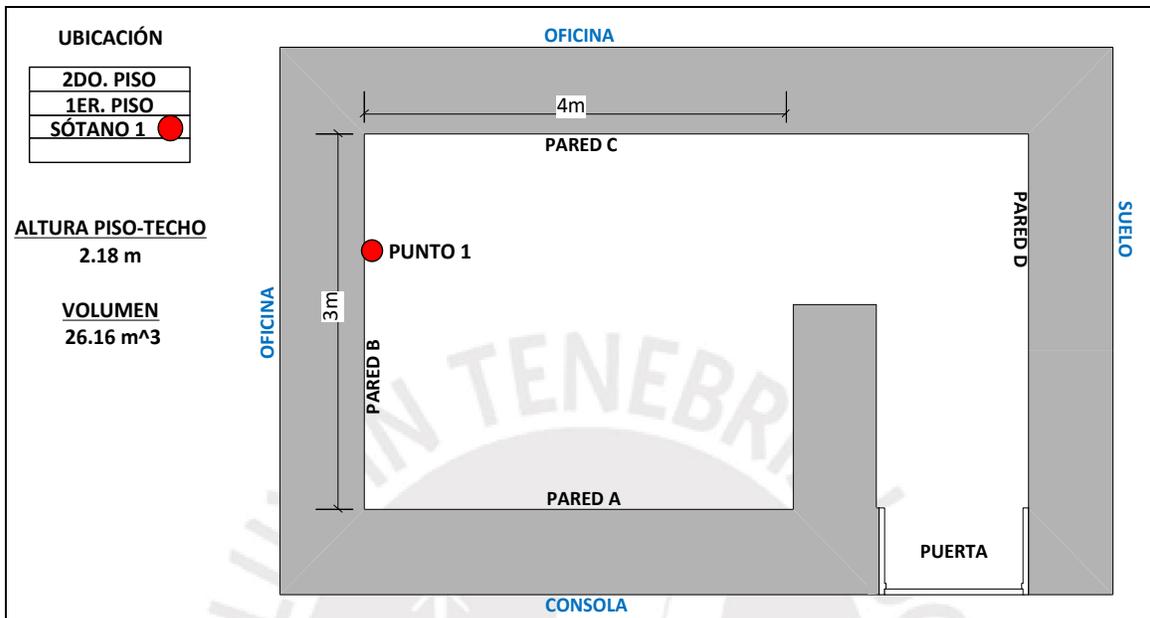


Figura 3.28: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8B

Tabla 3.73: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Mayólica	No determinado	Consola
Pared B	Concreto	Mayólica	No determinado	Oficina
Pared C	Concreto	Mayólica	No determinado	Oficina
Pared D	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Puerta	Plomo	---	---	Consola
Piso	Concreto	Pintura	No determinado	Oficinas
Techo	Concreto	Mayólica	No determinado	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
24 años	Puerta	05 horas / día		Junio -Diciembre



Figura 3.29: Punto de medición del lugar de trabajo 8B

Resultados y análisis de las mediciones en 8B

Tabla 3.74: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	25/05/2017	39.00	160	1.98 ± 0.39	435.54 ± 87.98	556.05 ± 70.30
	03/07/2017	39.00	100	4.16 ± 0.80	913.78 ± 179.65	
		39.00	40	1.45 ± 0.30	318.83 ± 66.83	
2	03/07/2017	32.00	160	1.05 ± 0.22	122.50 ± 26.34	106.36 ± 13.67
	04/08/2017	32.00	100	0.61 ± 0.14	71.08 ± 16.10	
		32.00	40	1.07 ± 0.23	125.52 ± 27.01	
3	04/08/2017	40.00	160	1.46 ± 0.32	136.11 ± 30.39	190.55 ± 23.99
	13/09/2017	40.00	100	2.74 ± 0.55	255.88 ± 52.08	
		40.00	40	1.92 ± 0.41	179.66 ± 39.31	
4	13/09/2017	55.00	160	3.63 ± 0.71	246.81 ± 49.23	227.01 ± 31.34
	07/11/2017	55.00	100	5.63 ± 1.11	382.75 ± 77.35	
		55.00	40	0.76 ± 0.30	51.47 ± 20.80	
5	07/11/2017	45.00	160	1.15 ± 0.26	95.17 ± 22.33	126.90 ± 16.53
	22/12/2017	45.00	100	1.79 ± 0.37	148.41 ± 31.54	
		45.00	40	1.65 ± 0.37	137.11 ± 31.08	

De todos, los lugares de trabajo evaluados, este es uno de los que presenta un alto nivel de concentración de Radón en comparación con los demás ambientes. Esto se debe probablemente a la escasa ventilación que recibe de sólo 05 horas /día. El medio por el cual se ventila este ambiente es a través de la puerta. En el periodo 1, podemos observar una concentración de Radón-222 de 556.05 Bq/m³ y esto se debió a que durante este periodo no hubo regular concurrencia de pacientes, por lo cual permaneció frecuentemente cerrado, con muy poca ventilación que recibe a través de la puerta de ingreso.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.75: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r^2) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m^3)			
160	207.22 ± 22.16	0.22	4.96	0.86 > α (0.05)
100	354.38 ± 41.10			
40	162.52 ± 18.04			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.77 el P-valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.76, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.76: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8B)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m^3)
24.13 ± 0.34	68.33 ± 0.67	556.05 ± 70.30
25.10 ± 1.34	62.33 ± 0.56	106.36 ± 13.67
22.90 ± 1.78	80.00 ± 1.23	190.55 ± 23.99
23.90 ± 1.69	67.33 ± 2.09	227.01 ± 31.34
24.96 ± 0.98	84.00 ± 0.69	126.90 ± 16.53
Estadísticas de la regresión		
Coeficiente de correlación múltiple		0.39
Coeficiente de determinación r^2		15 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		-69 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		-25%
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		-26%

Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.25	1	
Concentración Rn-222	r = -0.25 r ² = 6 % P-valor = 0.689	r = -0.23 r ² = 5 % P-valor = 0.705	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-69 %) ya que es menor que cero; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.8.3 LUGAR DE TRABAJO 8C

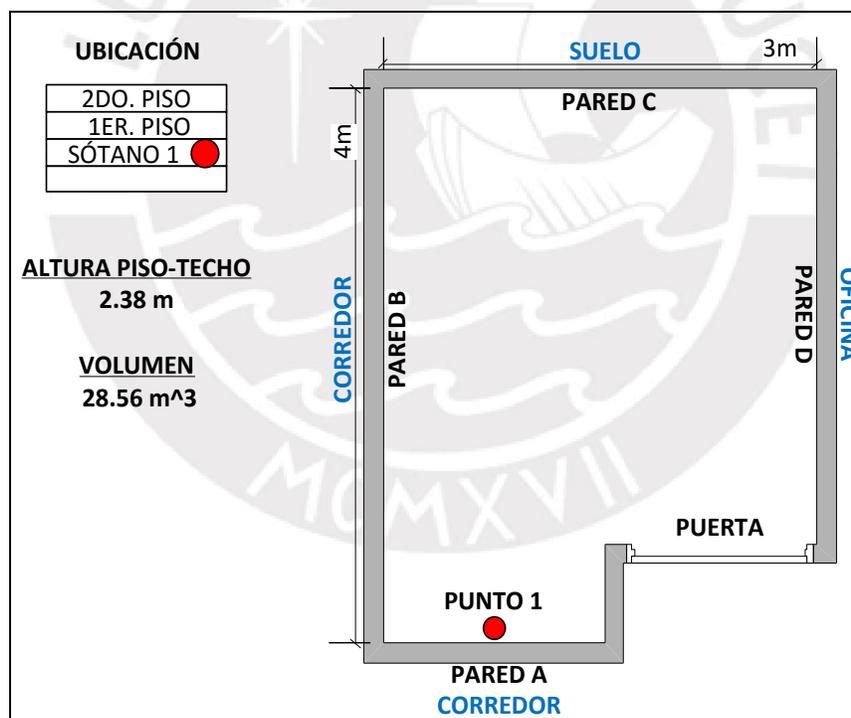


Figura 3.30: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8C

Tabla 3.77: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8C

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Corredor
Pared C	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Oficina
Puerta	Madera	No presenta	---	Corredor
Piso	Concreto	Parque	No determinado	Oficinas
Techo	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
24 años	Puerta		10 horas / día	Junio -Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 8C

Tabla 3.78: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	25/05/2017	39.00	160	0.69 ± 0.16	150.87 ± 34.99	188.83 ± 26.48
	03/07/2017	39.00	100	1.37 ± 0.29	301.75 ± 65.58	
		39.00	40	0.52 ± 0.13	113.87 ± 28.08	
2	03/07/2017	32.00	160	0.16 ± 0.06	18.15 ± 7.14	44.86 ± 7.74
	04/08/2017	32.00	100	0.31 ± 0.09	36.29 ± 10.54	
		32.00	40	0.69 ± 0.16	80.15 ± 19.40	
3	04/08/2017	39.00	160	0.16 ± 0.06	14.89 ± 5.60	22.96 ± 4.52
	12/09/2017	39.00	100	0.41 ± 0.11	39.09 ± 10.71	
		39.00	40	0.16 ± 0.06	14.89 ± 6.14	
4	12/09/2017	56.00	160	0.89 ± 0.20	59.63 ± 13.75	51.85 ± 7.36
	07/11/2017	56.00	100	0.68 ± 0.19	45.37 ± 12.51	
		56.00	40	0.76 ± 0.18	50.55 ± 11.93	
5	07/11/2017	45.00	160	0.35 ± 0.10	29.04 ± 8.04	24.73 ± 4.60
	22/12/2017	45.00	100	0.33 ± 0.10	27.42 ± 8.46	
		45.00	40	0.21 ± 0.09	17.74 ± 7.35	

En este ambiente, observamos que existe un nivel considerable de concentración de 188.83 Bq/m³ en el primer periodo de medición, no se tuvo información que justificara este hecho.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.79: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	54.51 ± 7.9	-0.02	0.04	0.99 > α (0.05)
100	89.98 ± 13.79			
40	55.44 ± 7.48			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.79 el P-valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.80, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Empleamos un higrómetro digital (Digital Sensor HTC) para obtener datos de humedad relativa y temperatura.

Tabla 3.80: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8C)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
24.23 ± 0.23	58.67 ± 2.30	188.83 ± 26.48	
25.10 ± 0.56	60.00 ± 0.55	44.86 ± 7.74	
21.40 ± 0.89	70.33 ± 0.67	22.96 ± 4.52	
25.53 ± 2.10	57.33 ± 1.23	51.85 ± 7.36	
24.30 ± 1.45	68.33 ± 1.56	24.73 ± 4.60	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.70	
Coeficiente de determinación r ²		49 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 2%	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		-29%	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		8 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.79	1	
Concentración Rn-222	r = 0.18 r ² = 3% P-valor = 0.767	r = -0.56 r ² = 31 % P-valor = 0.328	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-2 %) ya que es menor que cero; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.8.4 LUGAR DE TRABAJO 8D

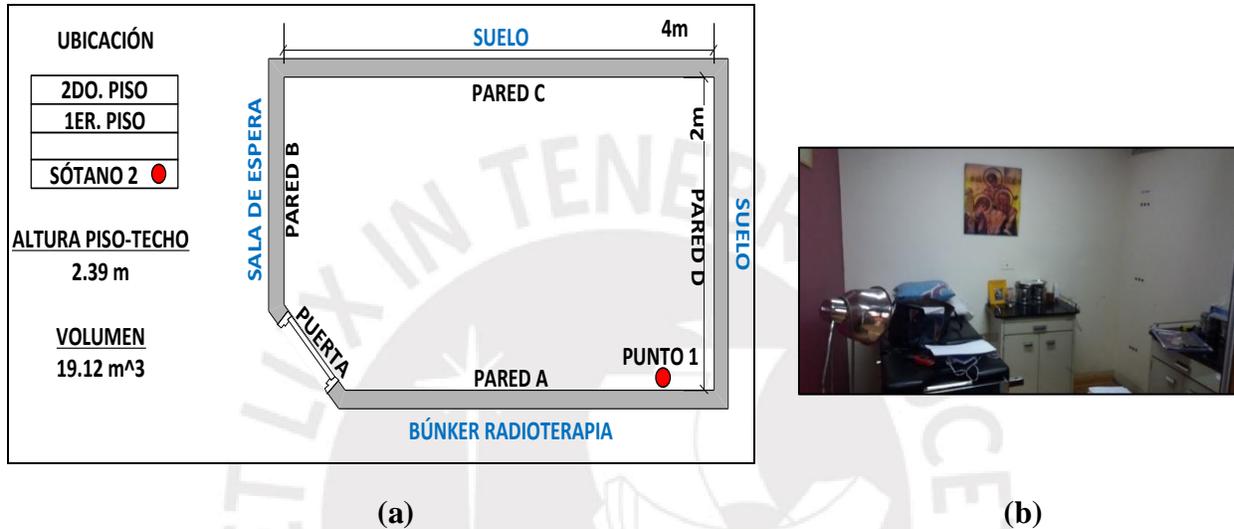


Figura 3.31: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8D. (b) Punto de medición

Tabla 3.81: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8D

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	---	Búnker radioterapia
Pared B	Concreto	Pintura lavable	---	Sala de espera
Pared C	Concreto	Pintura lavable	---	Suelo
Pared D	Concreto	Pintura lavable	---	Suelo
Puerta	Madera	---	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	---	Suelo
Techo	Concreto	Pintura lavable	---	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
24 años	Puerta	10 horas / día	Junio -Diciembre	

Resultados y análisis de las mediciones en 8D

Tabla 3.82: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8D)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	25/05/2017	39.00	160	0.14 ± 0.05	31.31 ± 11.22	42.23 ± 8.52
	03/07/2017	39.00	100	0.30 ± 0.09	65.47 ± 19.59	
		39.00	40	0.14 ± 0.05	29.89 ± 11.99	
2	03/07/2017	32.00	160	0.35 ± 0.10	40.83 ± 11.47	63.01 ± 10.00
	04/08/2017	32.00	100	0.30 ± 0.08	34.78 ± 9.94	
		32.00	40	0.97 ± 0.22	113.42 ± 25.88	
3	04/08/2017	39.00	160	0.51 ± 0.20	48.39 ± 19.24	63.28 ± 11.69
	12/09/2017	39.00	100	0.74 ± 0.22	70.73 ± 20.84	
		39.00	40	0.74 ± 0.21	70.73 ± 20.64	
4	12/09/2017	56.00	160	0.41 ± 0.12	27.22 ± 7.96	29.38 ± 4.76
	07/11/2017	56.00	100	0.35 ± 0.10	23.33 ± 6.63	
		56.00	40	0.56 ± 0.15	37.59 ± 9.83	
5	07/11/2017	45.00	160	0.08 ± 0.06	6.45 ± 4.62	10.22 ± 2.92
	22/12/2017	45.00	100	0.19 ± 0.08	16.13 ± 6.42	
		45.00	40	0.10 ± 0.05	8.07 ± 3.78	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que la puerta colinda con una sala de espera que tiene ventilación directa del medio ambiente (patio).

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.83: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8D)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	30.84 ± 5.34	-1.00	100	0.024 < α (0.05)
100	42.09 ± 6.33			
40	51.94 ± 7.35			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.83 el P- valor es menor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.84, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Empleamos un higrómetro digital (Digital Sensor HTC) para obtener datos de humedad relativa y temperatura.

Tabla 3.84: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8D)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
24.00 ± 0.23	68.33 ± 2.01	42.23 ± 8.52	
25.20 ± 1.45	65.00 ± 1.23	63.01 ± 10.00	
20.50 ± 1.34	74.67 ± 2.15	63.28 ± 11.69	
23.10 ± 0.67	54.00 ± 0.67	29.38 ± 4.76	
24.40 ± 2.21	65.33 ± 0.34	10.22 ± 2.92	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.51	
Coeficiente de determinación r^2		26 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 48 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		-20 %	
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		0.9 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.42	1	
Concentración Rn-222	r = -0.31 r ² = 10 % P-valor = 0.606	r = 0.49 r ² = 24 % P-valor = 0.398	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-48 %) ya que es menor que cero; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.8.5 LUGAR DE TRABAJO 8E

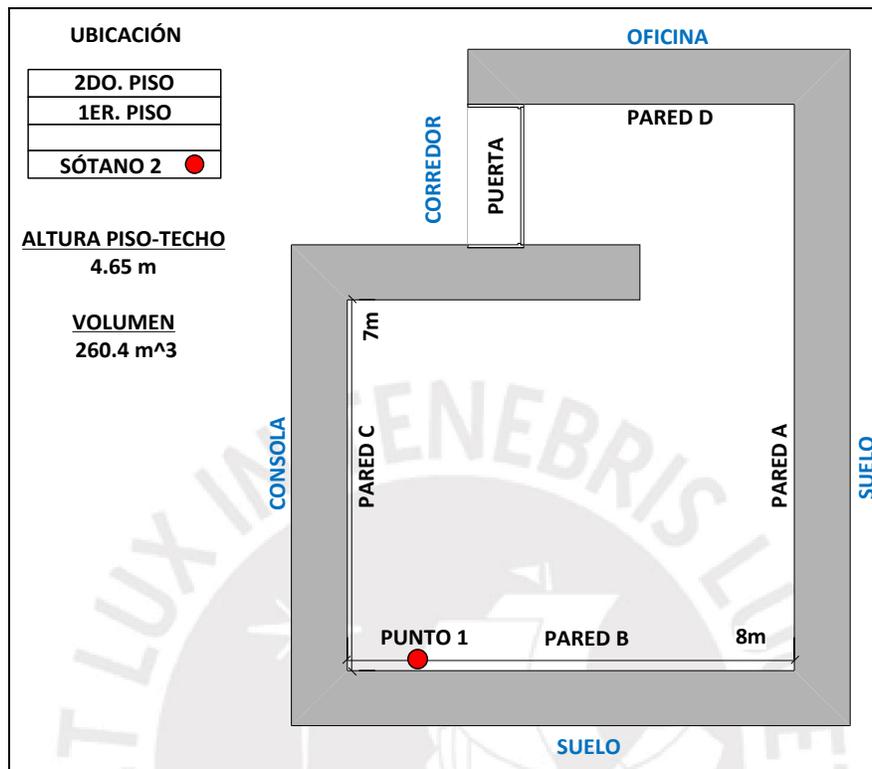


Figura 3.32: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 8E

Tabla 3.85: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 8E

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Suelo
Pared B	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Suelo
Pared C	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Consola
Pared D	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Oficina
Puerta	Plomo	---	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	No determinado	No determinado	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación		Tiempo de ventilación	
	Aire acondicionado		24 horas / día	
24 años	Aire acondicionado		24 horas / día	Junio -Diciembre



Figura 3.33: Punto de medición en el lugar de trabajo 8E

Resultados y análisis de las mediciones en 8E

Tabla 3.86: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 8E)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	25/05/2017	39.00	160	0.28 ± 0.07	62.63 ± 15.94	55.98 ± 9.15
	03/07/2017	39.00	100	0.21 ± 0.06	45.55 ± 14.12	
		39.00	40	0.27 ± 0.08	59.78 ± 17.32	
2	03/07/2017	32.00	160	0.13 ± 0.05	15.12 ± 5.29	47.38 ± 8.67
	04/08/2017	32.00	100	0.19 ± 0.06	22.68 ± 6.75	
		32.00	40	0.89 ± 0.21	104.35 ± 24.55	
3	04/08/2017	40.00	160	0.43 ± 0.13	39.92 ± 11.97	39.92 ± 6.61
	13/09/2017	40.00	100	0.29 ± 0.09	27.22 ± 8.75	
		40.00	40	0.56 ± 0.14	52.63 ± 13.17	
4	13/09/2017	55.00	160	0.29 ± 0.10	19.80 ± 6.53	24.64 ± 4.51
	07/11/2017	55.00	100	0.33 ± 0.10	22.44 ± 6.98	
		55.00	40	0.47 ± 0.14	31.68 ± 9.58	
5	07/11/2017	45.00	160	0.21 ± 0.06	17.74 ± 5.42	38.71 ± 7.34
	22/12/2017	45.00	100	0.23 ± 0.07	19.36 ± 5.90	
		45.00	40	0.95 ± 0.24	79.04 ± 20.51	

Los niveles de concentración de Radón en este ambiente son bajos y esto se debe a que tienen una muy buena ventilación, ya que la puerta colinda con una sala de espera que tiene ventilación directa del medio ambiente (patio); además también tiene aire acondicionado.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.87: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 8E)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r^2) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m^3)			
160	31.04 ± 4.46	-0.82	67	$0.388 > \alpha (0.05)$
100	27.45 ± 4.03			
40	65.49 ± 7.97			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.87 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.88, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.88: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 8E)

Temperatura ($^{\circ}C$)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m^3)
24.13 ± 2.08	63.67 ± 0.99	55.98 ± 9.15
25.17 ± 1.67	72.67 ± 0.56	47.38 ± 8.67
19.47 ± 1.23	74.00 ± 1.23	39.92 ± 6.61
23.00 ± 0.98	55.00 ± 1.22	24.64 ± 4.51
24.20 ± 0.67	63.67 ± 0.67	38.71 ± 7.34
Estadísticas de la regresión		
Coeficiente de correlación múltiple		0.69
Coeficiente de determinación r^2		48 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 4%
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		-21 %
Coeficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		2 %
Coeficiente de correlación Pearson entre variables		

	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.28	1	
Concentración Rn-222	r = 0.31 r ² = 10 % P-valor = 0.617	r = 0.51 r ² = 26 % P-valor = 0.376	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-4 %) ya que es menor que cero; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.9 EDIFICIO 9

3.9.1 LUGAR DE TRABAJO 9A

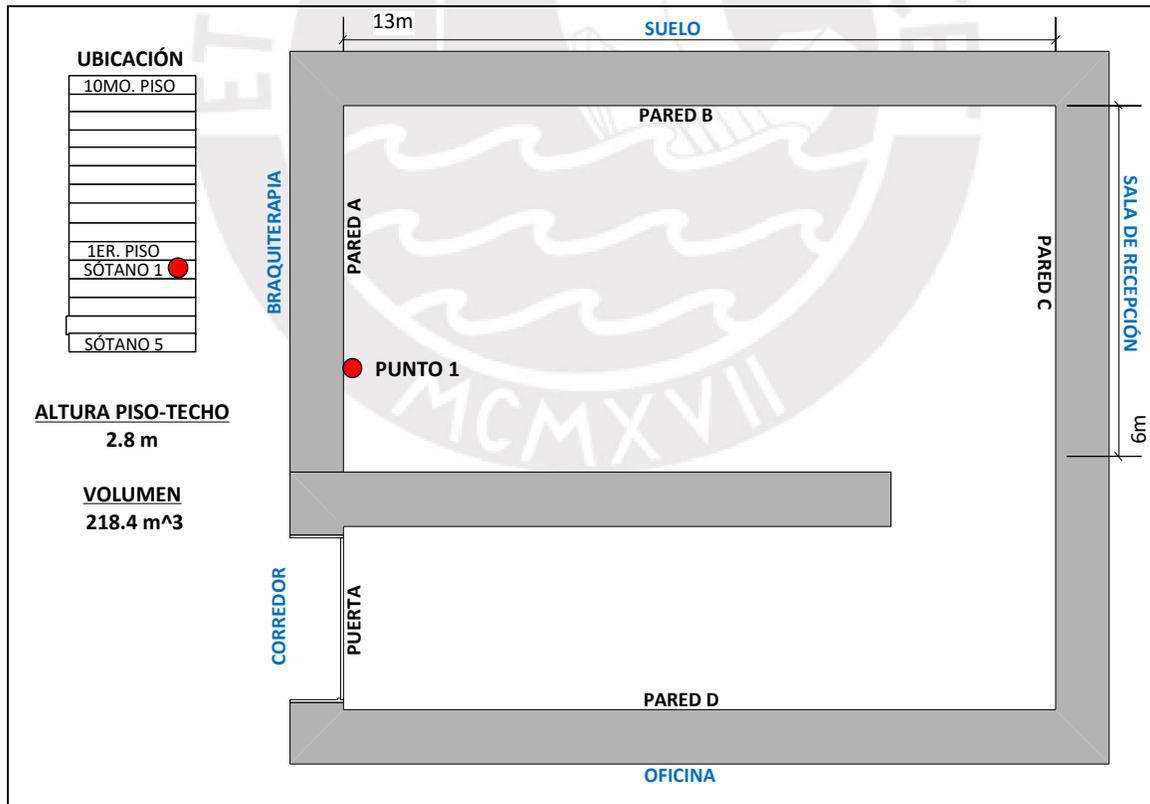


Figura 3.34: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9A

Tabla 3.89: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker braquiterapia
Pared B	Concreto	Tapiz	04 años	Suelo
Pared C	Concreto	Tapiz	04 años	Sala de recepción
Pared D	Concreto	Tapiz	04 años	Oficina
Puerta	Plomo	---	---	Corredor
Piso	Concreto	Mayólica	04 años	Oficinas
Techo	Concreto	Pintura lavable	04 años	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
04 años	Aire acondicionado	24 horas / día		Junio -Diciembre



(a)



(b)

Figura 3.35: (a) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9A. (b) Imagen real del lugar de trabajo 9A

Resultados y análisis de las mediciones en 9A

Tabla 3.90: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	20/05/2017	40.00	160	0.31 ± 0.09	50.50 ± 14.56	34.02 ± 7.01
	30/06/2017	40.00	100	0.25 ± 0.09	41.03 ± 14.04	
		40.00	40	0.06 ± 0.04	10.52 ± 5.73	
2	30/06/2017	34.00	160	0.10 ± 0.04	11.39 ± 4.40	19.69 ± 4.11
	03/08/2017	34.00	100	0.25 ± 0.09	27.75 ± 9.45	
		34.00	40	0.18 ± 0.06	19.93 ± 6.58	
3	03/08/2017	29.00	160	1.06 ± 0.24	136.84 ± 31.15	129.60 ± 19.65
	01/09/2017	29.00	100	0.79 ± 0.20	101.79 ± 25.67	
		29.00	40	1.17 ± 0.33	150.19 ± 42.97	

4	01/09/2017	30.00	160	3.65 ± 0.71	454.90 ± 90.62	359.45 ± 42.90
	31/09/2017	30.00	100	3.01 ± 0.60	375.05 ± 76.48	
		30.00	40	1.99 ± 0.39	248.42 ± 50.04	
5	31/09/2017	72.00	160	0.56 ± 0.18	29.24 ± 9.23	25.88 ± 4.51
	12/12/2017	72.00	100	0.68 ± 0.17	35.29 ± 8.70	
		72.00	40	0.25 ± 0.09	13.11 ± 4.70	

Los niveles de concentración de Radón en los periodos 3 y 4 son relativamente altos: 129.6 y 359.45 Bq/m³ respectivamente, y esto se debió a que durante estos periodos este recinto tuvo problemas con el aire acondicionado de manera frecuente.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.91: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9A)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	136.57 ± 19.49	0.99	98	0.056 > α (0.05)
100	116.18 ± 16.58			
40	88.43 ± 13.34			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.91 el P-valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.92, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.92: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9A)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)
22.60 ± 0.44	64.00 ± 2.33	34.02 ± 7.01
21.40 ± 1.20	62.00 ± 1.20	19.69 ± 4.11
20.50 ± 0.35	56.33 ± 0.99	129.60 ± 19.65
22.60 ± 1.22	51.00 ± 0.97	359.45 ± 42.90
22.80 ± 0.90	57.33 ± 1.23	25.88 ± 4.51

Estadísticas de la regresión			
Coefficiente de correlación múltiple		0.86	
Coefficiente de determinación r^2		75 %	
Coefficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		49 %	
Coefficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y temperatura		-32%	
Coefficiente de determinación r^2_{adj} entre concentración y humedad relativa		66 %	
Coefficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.05	1	
Concentración Rn-222	r = 0.11 r ² = 1 % P-valor = 0.863	r = -0.86 r ² = 74 % P-valor = 0.04	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (49 %) no supera al r^2_{adj} entre la concentración y la humedad relativa (66 %); además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente haya una correlación lineal negativa alta entre la concentración y la humedad relativa. Esto se debe probablemente a que a medida que aumenta el contenido de agua en un ambiente la capacidad de difusión del Radón disminuye.

3.9.2 LUGAR DE TRABAJO 9B

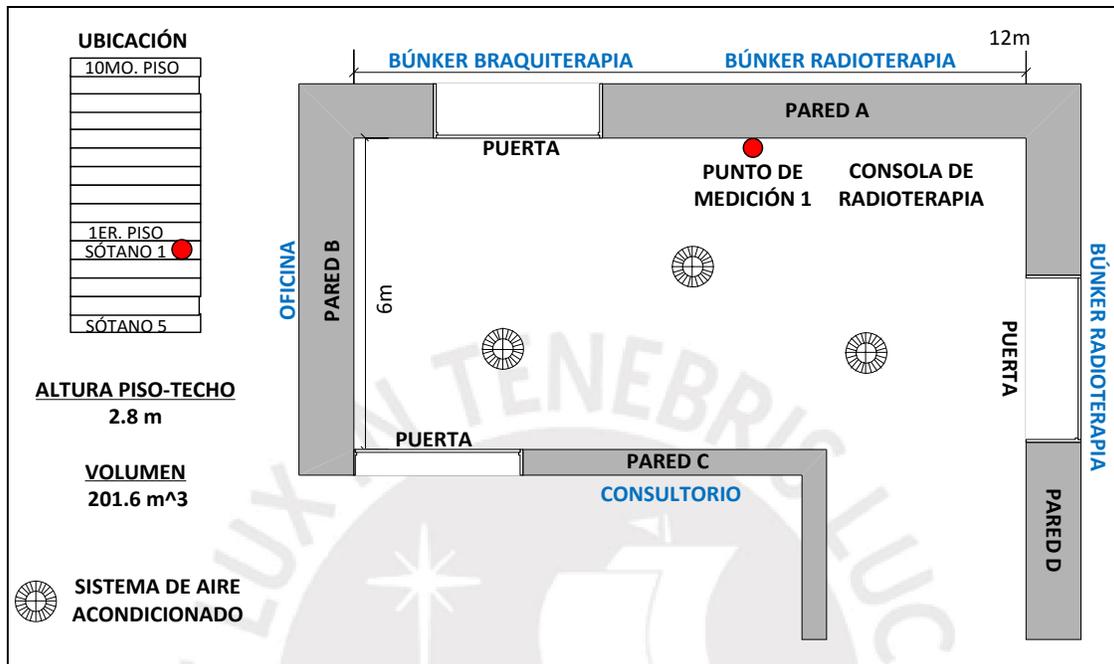


Figura 3.36: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9B

Tabla 3.93: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9B

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker radioterapia
Pared B	Concreto	Tapiz	04 años	Oficina
Pared C	Concreto	Tapiz	04 años	Consultorio
Pared D	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker radioterapia
Piso	Concreto	Mayólica	04 años	Oficinas
Techo	Concreto	Pintura lavable	04 años	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
04 años	Aire acondicionado	24 horas / día	Junio -Diciembre	



(a)

(b)

Figura 3.37: (a) Imagen real del lugar de trabajo 9B. (b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9B.

Resultados y análisis de las mediciones en 9B

Tabla 3.94: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9B)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	20/05/2017	40.00	160	0.87 ± 0.19	140.97 ± 31.44	75.04 ± 11.92
	30/06/2017	40.00	100	0.32 ± 0.09	52.60 ± 14.33	
		40.00	40	0.19 ± 0.06	31.56 ± 9.17	
2	30/06/2017	34.00	160	0.70 ± 0.16	76.86 ± 17.78	36.06 ± 6.53
	03/08/2017	34.00	100	0.23 ± 0.07	25.62 ± 7.69	
		34.00	40	0.05 ± 0.03	5.69 ± 3.00	
3	03/08/2017	29.00	160	1.37 ± 0.28	176.89 ± 36.72	169.65 ± 21.33
	01/09/2017	29.00	100	0.96 ± 0.22	123.49 ± 28.63	
		29.00	40	1.62 ± 0.33	208.59 ± 43.90	
4	01/09/2017	30.00	160	0.41 ± 0.10	51.62 ± 13.23	182.82 ± 28.07
	31/09/2017	30.00	100	0.78 ± 0.17	96.79 ± 21.90	
		30.00	40	3.21 ± 0.63	400.05 ± 80.22	
5	31/09/2017	72.00	160	0.25 ± 0.09	13.11 ± 4.47	15.12 ± 2.77
	12/12/2017	72.00	100	0.39 ± 0.11	20.16 ± 5.88	
		72.00	40	0.23 ± 0.07	12.10 ± 3.81	

Los niveles de concentración de Radón en los periodos 3 y 4 son relativamente altos: 169.65 y 182.82 Bq/m³ respectivamente, y esto se debió a que durante estos periodos este recinto tuvo problemas con el aire acondicionado de manera frecuente.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.95: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9B)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	91.89 ± 10.67	-0.58	33.91	0.604 > α (0.05)
100	63.73 ± 8.00			
40	131.60 ± 18.41			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.95 el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.96, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.96: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9B)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
23.23 ± 0.79	63.33 ± 0.45	75.04 ± 11.92	
20.97 ± 2.09	59.33 ± 1.20	36.06 ± 6.53	
20.10 ± 1.24	59.00 ± 0.98	169.65 ± 21.33	
24.20 ± 2.06	50.00 ± 1.56	182.82 ± 28.07	
23.90 ± 0.87	50.33 ± 0.44	15.12 ± 2.77	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.24	
Coeficiente de determinación r²		6 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 88 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		-32%	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		- 32 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.57	1	
Concentración Rn-222	r = -0.12 r ² = 1 % P-valor = 0.851	r = -0.10 r ² = 1 % P-valor = 0.865	1

La correlación múltiple en este caso no está justificada, puesto que r^2_{adj} entre la concentración con la humedad relativa y temperatura (-88 %) es menor que cero.; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente no hay una correlación lineal.

3.9.3 LUGAR DE TRABAJO 9C

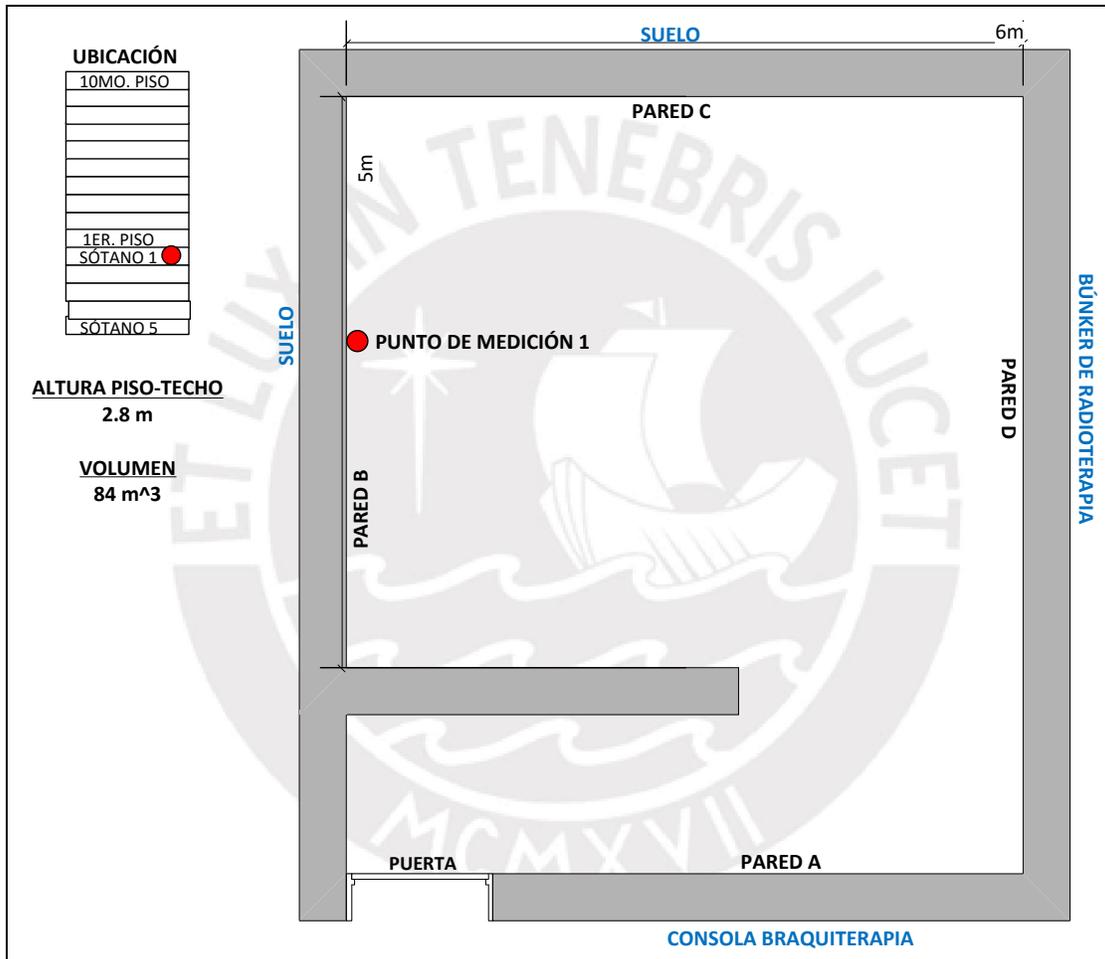


Figura 3.38: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9C

Tabla 3.97: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9C

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Tapiz	04 años	Consola Braquiterapia
Pared B	Concreto	Tapiz	04 años	Suelo
Pared C	Concreto	Tapiz	04 años	Suelo
Pared D	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker Radioterapia
Puerta	Plomo	---	---	Consola Braquiterapia
Piso	Concreto	Mayólica	04 años	Oficinas
Techo	Concreto	Pintura lavable	04 años	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
04 años	Aire acondicionado	24 horas / día		Junio -Diciembre



(a)



(b)

Figura 3.39: (a) Imagen real del lugar de trabajo 9C. (b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9C.

Resultados y análisis de las mediciones en 9C

Tabla 3.98: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9C)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	20/05/2017	40.00	160	9.00 ± 0.08	56.81 ± 13.93	45.59 ± 7.41
	30/06/2017	40.00	100	7.67 ± 0.08	48.39 ± 13.24	
		40.00	40	5.00 ± 0.07	31.56 ± 11.15	
2	30/06/2017	34.00	160	1.33 ± 0.03	5.69 ± 2.95	9.01 ± 2.34
	03/08/2017	34.00	100	1.33 ± 0.03	5.69 ± 3.59	
		34.00	40	3.67 ± 0.05	15.66 ± 5.25	

3	03/08/2017	29.00	160	15.00 ± 0.13	75.09 ± 17.58	142.95 ± 19.03
	01/09/2017	29.00	100	41.00 ± 0.33	205.25 ± 43.77	
		29.00	40	29.67 ± 0.25	148.52 ± 32.17	
4	01/09/2017	30.00	160	62.67 ± 0.48	303.26 ± 61.50	152.71 ± 22.33
	31/09/2017	30.00	100	21.00 ± 0.18	101.63 ± 22.74	
		30.00	40	11.00 ± 0.11	53.23 ± 13.80	
5	31/09/2017	72.00	160	27.50 ± 0.24	55.45 ± 12.87	43.35 ± 6.20
	12/12/2017	72.00	100	11.00 ± 0.12	22.18 ± 6.50	
		72.00	40	26.00 ± 0.22	52.43 ± 11.77	

Los niveles de concentración de Radón en los periodos 3 y 4 son relativamente altos: 142.95 y 152.71 Bq/m³ respectivamente, y esto se debió a que durante estos periodos este recinto tuvo problemas con el aire acondicionado de manera frecuente.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinamos el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.99: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9C)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	99.26 ± 13.36	0.99	98.01	0.059 > α (0.05)
100	76.63 ± 10.32			
40	60.28 ± 7.79			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.99 el P-valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.100, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.100: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9C)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
19.50 ± 0.79	58.67 ± 0.44	45.59 ± 7.41	
21.53 ± 1.73	60.67 ± 1.70	9.01 ± 2.34	
23.43 ± 2.61	52.33 ± 2.33	142.95 ± 19.03	
23.10 ± 0.33	50.33 ± 0.66	152.71 ± 22.33	
25.07 ± 2.33	50.67 ± 0.75	43.35 ± 6.20	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.84	
Coeficiente de determinación r²		66 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		35 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y temperatura		- 19 %	
Coeficiente de determinación r²_{adj} entre concentración y humedad relativa		33 %	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.81	1	
Concentración Rn-222	r = 0.33 r ² = 11 % P-valor = 0.588	r = -0.71 r ² = 50 % P-valor = 0.181	1

Probablemente no existe una correlación lineal múltiple entre la concentración con la temperatura y la humedad relativa; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal.

3.9.4 LUGAR DE TRABAJO 9D

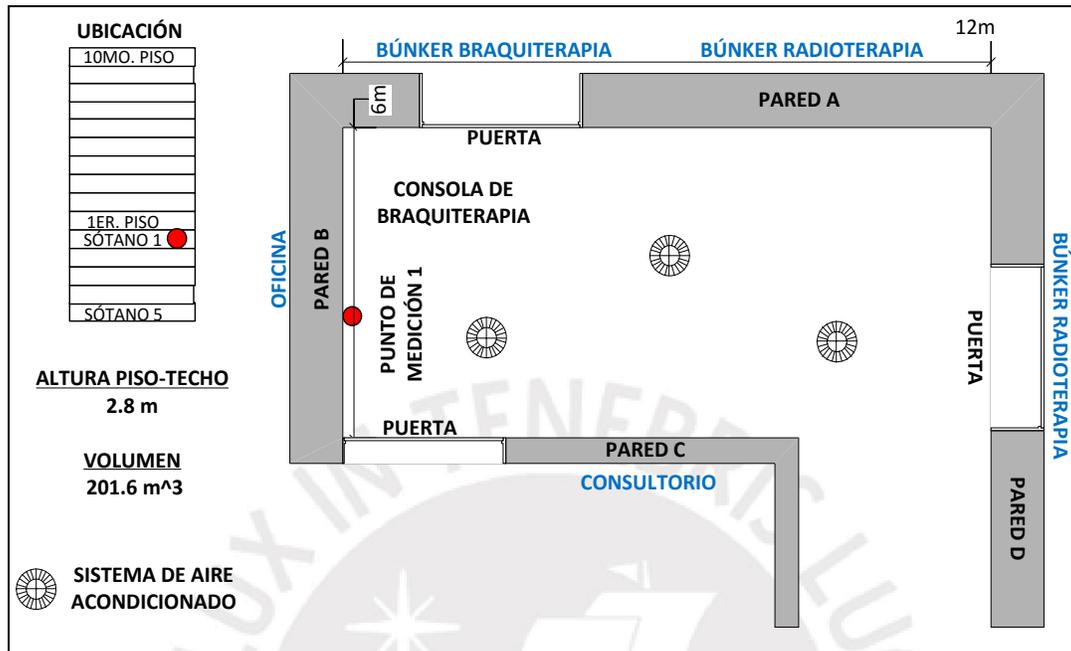


Figura 3.40: Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 9D

Tabla 3.101: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 9D

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker radioterapia
Pared B	Concreto	Tapiz	04 años	Oficina
Pared C	Concreto	Tapiz	04 años	Consultorio
Pared D	Concreto	Tapiz	04 años	Búnker radioterapia
Piso	Concreto	Mayólica	04 años	Oficinas
Techo	Concreto	Pintura lavable	04 años	Oficinas
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación	Periodo	
	04 años	Aire acondicionado	24 horas / día	

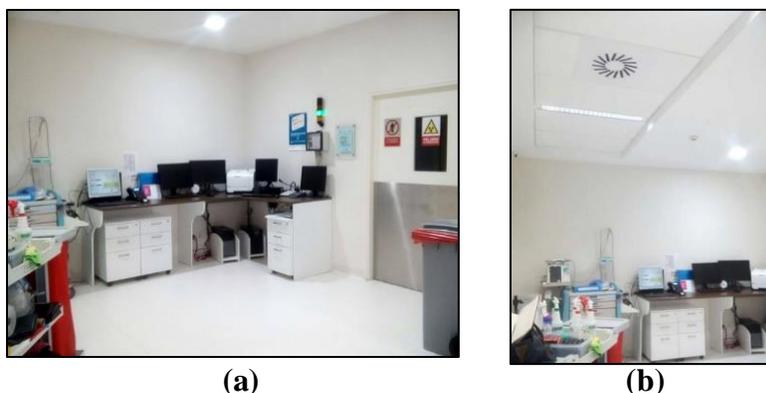


Figura 3.41: (a) Imagen real del lugar de trabajo 9D. (b) Sistema de ventilación del lugar de trabajo 9D.

Resultados y análisis de las mediciones en 9D

Tabla 3.102: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 9D)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	20/05/2017	40.00	160	4.33 ± 0.06	27.35 ± 9.14	57.51 ± 11.06
	30/06/2017	40.00	100	20.00 ± 0.19	126.24 ± 31.05	
		40.00	40	3.00 ± 0.05	18.94 ± 7.37	
2	30/06/2017	34.00	160	1.33 ± 0.03	5.69 ± 2.86	27.52 ± 5.42
	03/08/2017	34.00	100	16.00 ± 0.14	68.32 ± 15.57	
		34.00	40	2.00 ± 0.03	8.54 ± 3.66	
3	03/08/2017	29.00	160	20.33 ± 0.19	101.79 ± 24.74	72.31 ± 10.89
	01/09/2017	29.00	100	14.33 ± 0.13	71.76 ± 16.87	
		29.00	40	8.67 ± 0.10	43.39 ± 13.08	
4	01/09/2017	30.00	160	101.50 ± 0.78	491.19 ± 98.81	363.22 ± 44.58
	31/09/2017	30.00	100	42.33 ± 0.36	204.86 ± 45.22	
		30.00	40	81.33 ± 0.61	393.60 ± 77.95	
5	31/09/2017	72.00	160	15.00 ± 0.14	30.25 ± 7.51	25.20 ± 4.00
	12/12/2017	72.00	100	14.00 ± 0.14	28.23 ± 7.59	
		72.00	40	8.50 ± 0.10	17.14 ± 5.47	

Los niveles de concentración de Radón en los periodos 3 y 4 son relativamente altos: 72.31 y 363.22 Bq/m³ respectivamente, y esto se debió a que durante estos periodos este recinto tuvo problemas con el aire acondicionado de manera frecuente.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.103: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 9D)

Durante los 05 periodos		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	131.25 ± 20.52	0.91	82.56	0.27 > α (0.05)
100	99.88 ± 11.99			
40	96.32 ± 15.93			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.103 el P- valor es mayor al valor de α, por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

En la tabla 3.104, mostramos la evaluación de la correlación entre la concentración de Rn-222, con la temperatura y humedad relativa. Pudimos acceder a una base de datos de humedad relativa y temperatura, que guardan en un registro en este lugar de trabajo.

Tabla 3.104: Coeficiente de correlación múltiple entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto 1 (ambiente 9D)

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Concentración Rn-222 (Bq/m ³)	
22.90 ± 0.35	56.00 ± 1.55	57.51 ± 11.06	
21.53 ± 2.65	69.67 ± 0.66	27.52 ± 5.42	
21.83 ± 2.63	51.67 ± 0.49	72.31 ± 10.89	
24.50 ± 1.29	59.67 ± 2.90	363.22 ± 44.58	
26.33 ± 1.28	59.00 ± 0.44	25.20 ± 4.00	
Estadísticas de la regresión			
Coeficiente de correlación múltiple		0.24	
Coeficiente de determinación r ²		6 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración, humedad relativa y temperatura		- 88 %	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y temperatura		-25%	
Coeficiente de determinación r ² _{adj} entre concentración y humedad relativa		-33%	
Coeficiente de correlación Pearson entre variables			
	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración Rn-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.117	1	
Concentración Rn-222	r = 0.24 r ² = 6 % P-valor = 0.703	r = -0.07 r ² = 0.49 % P-valor = 0.908	1

Probablemente no existe una correlación lineal múltiple entre la concentración con la temperatura y la humedad relativa; además empleando el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables de forma independiente, observamos que probablemente tampoco hay correlación lineal entre ellas.

3.10 EDIFICIO 10

3.10.1 LUGAR DE TRABAJO 10A

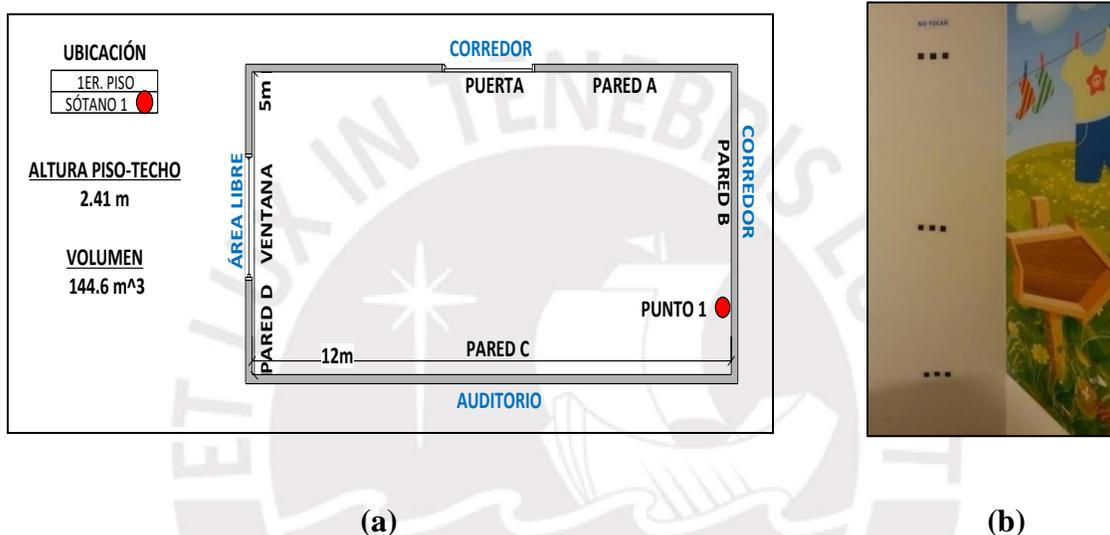


Figura 3.42: (a) Diseño y punto de medición del lugar de trabajo 10A. (b) Punto de medición

Tabla 3.105: Estructura, áreas colindantes y sistema de ventilación del lugar de trabajo 10A

Estructura de la construcción				Áreas colindantes
Barrera	Material	Recubrimiento		
		Tipo	Tiempo de permanencia	
Pared A	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Corredor
Pared B	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Corredor
Pared C	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Auditorio
Pared D	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Área libre/ suelo
Ventana	Vidrio	No presenta	---	Área libre Patio
Piso	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Suelo
Techo	Concreto	Pintura lavable	No determinado	Auditorio
Antigüedad edificio	Ventilación			Periodo
	Sistema de ventilación	Tiempo de ventilación		
15 años	Aire acondicionado	8 horas / día Lunes - Sábado		Junio - Diciembre

Resultados y análisis de las mediciones en 10A

Tabla 3.106: Densidad de trazas y concentración de Rn-222 en el punto 1 (ambiente 10A)

Periodos	Fechas	Tiempo (días)	Altura (cm)	Densidad (trazas/mm ²)	Concentración (Bq/m ³)	Promedio Concentración
1	18/08/2017	116	160	0.97 ± 0.22	31.29 ± 7.22	34.00 ± 4.62
	12/12/2017	116	100	1.40 ± 0.30	45.06 ± 9.81	
		116	40	0.80 ± 0.20	25.66 ± 6.60	

Los niveles de concentración en este ambiente son relativamente bajos y esto se debe a que tiene aire acondicionado.

Para evaluar la correlación de la concentración de Radón con altura alrededor del punto de medición 1, obtuvimos los promedios de concentración en las alturas de 40,100 y 160 cm y luego determinados el coeficiente de correlación de Pearson r , r^2 y P-valor.

Tabla 3.107: Coeficiente de Pearson, coeficiente de determinación y P-valor entre la concentración y la altura en el punto 1 (ambiente 10A)

Durante el periodo de medición		Coef. Pearson (r)	Coef. Determinación (r ²) x 100 %	P-valor
Altura (cm)	Concentración (Bq/m ³)			
160	31.29 ± 7.22	0.28	7.96	0.82 > α (0.05)
100	45.06 ± 9.81			
40	25.66 ± 6.60			

Como podemos observar en los resultados obtenidos en la tabla 3.107 el P- valor es mayor al valor de α , por lo tanto, existe evidencia no concluyente sobre la significancia de la correlación lineal entre la concentración de Rn-222 y la altura alrededor del punto de medición 1.

3.11 RESUMEN

En aquellos ambientes, cuyos valores de concentración estuvieron por encima de 150 Bq/m³ (nivel de referencia escogido en este trabajo) en un periodo de medición, se trató de indagar cuales fueron las causas. Por lo general se debió a limitaciones en la ventilación de dichos ambientes.

Tabla 3.108: Cuadro resumen sobre los niveles de concentración de Rn-222, y la correlación de la concentración de Rn-222 con la altura, temperatura y humedad relativa

Lugares de trabajo	Punto medido	Niveles de concentración de Rn-222 > 150 Bq/m ³	Correlación concentración con altura alrededor del punto de medición	Correlación múltiple concentración con la humedad relativa y temperatura	Correlación concentración y temperatura	Correlación concentración y humedad relativa
1A	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
1B	P1	Si, periodo 5	No	No	Si, r= 0.99, P-valor = 0.002	No
1C	P1	No	No	No	No	No
	P2	No	No	No	No	No
1D	P1	No	No	No	No	No
2A	P1	No	No	No	No	No
2B	P1	Si, periodo 1	No	No	No	No
2C	P1	Si, periodo 1	No	Si, r ² adj.= 91%	No	No
3A	P1	Si, periodo 3	No	No	No	No
3B	P1	No	No	No	No	No
4A	P1	No	No	No	No	No
	P2	Si, periodo 3	No	No	No	No
5A	P1	No	Si, r= 0.99, P-valor = 0.04	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
5B	P1	Si, periodo 1 y 2	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
6A	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
6B	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
7A	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
7B	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
7C	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó
8A	P1	No	No	No	No	No
8B	P1	Si, periodo 1	No	No	No	No
8C	P1	Si, periodo 1	No	No	No	No
8D	P1	No	No	No	No	No
8E	P1	No	No	No	No	No
9A	P1	Si, periodo 4	No	No	No	Si, r= -0.86, P-valor = 0.04
9B	P1	Si, periodo 3 y 4	No	No	No	No
9C	P1	Si, periodo 4	No	No	No	No
9D	P1	Si, periodo 4	Si, r= -1, P-valor = 0.024	No	No	No
10A	P1	No	No	No se evaluó	No se evaluó	No se evaluó

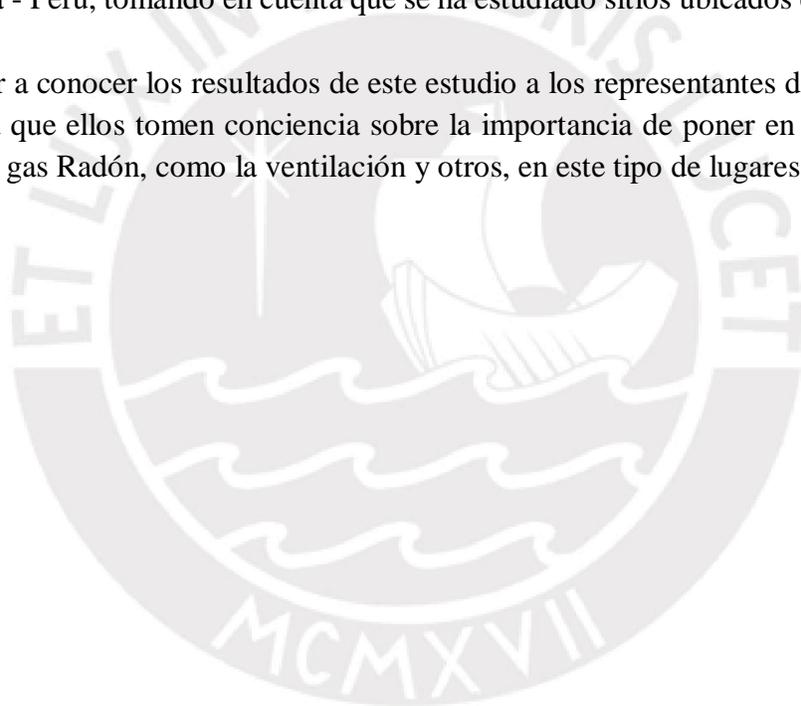
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se evaluaron las concentraciones de Rn-222 en 27 lugares de trabajo ubicados en sótanos, de los cuales 12 mostraron niveles de concentración $> 150 \text{ Bq/m}^3$ en diferentes periodos de medición, debido a limitaciones en la ventilación.
- Se determina que la distribución de concentración de Rn-222 en un recinto no es homogénea; habiendo mayores niveles de concentración en las zonas del recinto donde hay poca circulación de aire y menores niveles de concentración en las zonas donde hay mayor circulación de aire. De esto concluimos que evaluar la concentración de Radón-222 en un recinto, considerando un solo punto de medición, el resultado obtenido no es representativo del lugar, puesto que sus valores pueden cambiar si se escogiese otro punto de medición ubicado en el mismo recinto.
- Empleando el coeficiente de Pearson se evaluó la correlación de la concentración Rn-222 con la altura alrededor de los puntos de medición, donde dos ambientes mostraron correlación lineal entre estas variables. Pero debemos tomar en cuenta que esto no es representativo de todo el recinto debido a la distribución no homogénea del Radón.
- Empleando el coeficiente de correlación múltiple y de Pearson se logró evaluar la correlación de la concentración de Rn-222 con la humedad relativa y temperatura, en 20 ambientes de trabajo. Un ambiente muestra una correlación lineal múltiple justificable entre estas variables, un ambiente muestra una correlación lineal positiva significativa entre concentración y temperatura y un ambiente muestra una correlación lineal negativa significativa entre la concentración y la humedad relativa. De esto concluimos que probablemente las variables meteorológicas no influyen significativamente en la concentración de Radón 222, en este tipo de recintos; siendo probablemente la ventilación la que más influye.

4.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable hacer evaluaciones periódicas de concentraciones de Radón-222 en recintos de trabajos ubicados en sótanos, por ser lugares que aleatoriamente pueden permanecer sin ventilación; dando la posibilidad de acumular niveles de concentración de Radón perjudiciales para la salud del personal de trabajo.
- Se recomienda hacer un estudio sobre cuál es la posición más indicada para medir concentración de Radón 222, en recintos que tengan características similares (volumen, medios de ventilación, etc.).
- Los resultados de concentraciones de Rn-222 obtenida en esta tesis, pueden servir para definir los niveles de referencia de concentración de Rn-222, aceptables para recintos de trabajos similares en la ciudad de Lima - Perú, tomando en cuenta que se ha estudiado sitios ubicados en nuestra región.
- Es importante dar a conocer los resultados de este estudio a los representantes de cada institución participante, para que ellos tomen conciencia sobre la importancia de poner en práctica acciones de mitigación del gas Radón, como la ventilación y otros, en este tipo de lugares de trabajo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2010). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report 2008, Volume I, pp. 288-289.
- [2] Public Health England (PHE). (2016). Radon in Workplace Basements. Public Health England (PHE), pp. 1-19.
- [3] Virgilio Acosta Limane. (1999). Curso Física Moderna. México: HARLA.
- [4] Prionic Protein (Anamuno). (2015). Descubrimiento del pentaquark. Consulta: 20 de diciembre 2017. Sitio web: <http://prionicprotein.blogspot.pe/2015/07/descubrimiento-del-pentaquark.html>
- [5] S. A. Durrani and Radomir Ilic. (1997). Radon Measurements by Etched Track Detectors. Singapore: World Scientific Publishing Company.
- [6] Robert Martin Eisberg. (1992). Fundamentos de Física Moderna. México: Limusa.
- [7] cbrn.es. (2017). Fisionable y fértil. Consulta: 29 de diciembre 2017. Sitio web: <http://cbrn.es/?tag=decaimiento-radiactivo>
- [8] Física interesante. (2013). Núcleo, Radiactividad, Fisión Nuclear y Fusión Nuclear. Consulta: 29 de diciembre 2017. Sitio web: <http://vquirozcardoso.blogspot.pe/2013/06/nucleo-radioactividad-fision-nuclear-y.html>
- [9] Escritos científicos. (2000). Elementos básicos de física nuclear. Consulta: 02 de enero 2018. Sitio web: <http://www.esritoscientificos.es/trab1a20/carpetas/nuclear/nu03.htm>
- [10] Wikimedia. (2017). Coulomb Barriere. Consulta: 02 de enero 2018. Sitio web: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coulomb-Barriere_\(es\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coulomb-Barriere_(es).png)
- [11] Physics World. (2000). Radioactivity and radiation. Consulta: 05 de enero 2018. Sitio web: http://www.hk-phy.org/energy/power/nuclear_phy02_e.html
- [12] Rafael González Farfán. (2001). Interacción de las partículas con la materia. Consulta: 05 de enero 2018. Sitio web: http://casanchi.com/casanchi_2001/materia01.htm
- [13] National Institute of Standards and Technology (NIST). Stopping power and range tables for helium ions. Consulta: 06 de enero 2018. Sitio web: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>
- [14] Universidad de Oviedo. Interacción radiación-materia. Consulta: 06 de enero 2018. Sitio web: <http://www.hep.uniovi.es/jfernand/Radiofisica/ChargedParticles.pdf>
- [15] Jorge Rickards Campbell y Ricardo Camarero. El manejo de las radiaciones nucleares. Consulta: 07 de enero 2018.

Sitio web: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.htm

- [16] Universidad de Granada. Impurificación controlada de semiconductores. Consulta: 08 de enero 2018. Sitio web: <http://electronica.ugr.es/~amroldan/deyte/cap10.htm>
- [17] James F. Ziegler. (2013). The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) – Software. Consulta: 20 de agosto 2017. Sitio web: <http://www.srim.org/>
- [18] León Garzón Ruipérez. (1992). El Radón y sus riesgos. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo.
- [19] Fundación para la Salud Geoambiental. (2013). Gas Radón. Consulta: 08 de enero 2018. Sitio web: <http://www.saludgeoambiental.org/gas-radon>
- [20] DJEKOVA. (2018). Radon Gas Lung Cancer. Consulta: 09 de enero 2018. Sitio web: <http://djekova.info/radon-gas-lung-cancer.html>
- [21] Wikimedia (2017). Decay Chain Uranium-238. Consulta: 09 de enero 2018. Sitio web: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_of_Uranium-238.svg
- [22] Wikimedia (2017). Decay Chain Thorium-232. Consulta: 09 de enero 2018. Sitio web: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Decay_Chain_of_Thorium-232.svg
- [23] Respuestas tips. ¿Cuáles son los componentes del suelo? Consulta: 10 de enero 2018. Sitio web: <https://respuestas.tips/como-esta-compuesto-el-suelo/>
- [24] Ikutram. (2018). Tamaño relativo de las partículas de grava, arena, limo y arcilla. Consulta: 10 de enero 2018. Sitio web: <https://twitter.com/ikutram/status/452158005258502145>
- [25] Collignan, B., & Powaga, E. (2014). Procedure for the characterization of radon potential in existing dwellings and to assess the annual average indoor radon concentration. *Journal of environmental radioactivity*, 137, 64-70.
- [26] UPSCGETWAY. (2016). Diffusion in Semiconductors. Consulta: 10 de enero 2018. Sitio web: <http://www.upscgetway.com/diffusion-in-semiconductors/>
- [27] G. Keller and B. The Radon Diffusion Length as a Criterion for the Radon Tightness. Consulta: 11 de enero 2018.
Sitio web: <https://pdfs.semanticscholar.org/ea8d/554dd6b63ef9707044ff63f57406962beff3.pdf>
- [28] ENUSA (2002). El Radón características físico-químicas. Consulta: 11 de enero 2018. Sitio web: <http://slideplayer.es/slide/118604/>
- [29] Chauhan, N., Chauhan, R. P., Joshi, M., Agarwal, T. K., Aggarwal, P., & Sahoo, B. K. (2014). Study of indoor radon distribution using measurements and CFD modeling. *Journal of environmental radioactivity*, 136, 105-111.

- [30] Akbari, K., & Mahmoudi, J. (2012). Numerical simulation of radon transport and indoor air conditions effects. *Int. J. Scientific and Engineering Research*, 3(6), 1-9.
- [31] Urosevic, V., Nikezic, D., & Vulovic, S. (2008). A theoretical approach to indoor radon and thoron distribution. *Journal of environmental radioactivity*, 99(12), 1829-1833.
- [32] Najam, L. A., Tawfiq, N. F., & Mahmood, R. H. (2013). Radon concentration in some building materials in Iraq using CR-39 track detector. *International Journal of Physics*, 1(3), 73-76.
- [33] Yousef, H. A., El-Farrash, A. H., Ela, A. A., & Merza, Q. (2015). Measurement of Radon Exhalation Rate in Some Building Materials Using Nuclear Track Detectors. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 5(03), 141.
- [34] Kirandeep Kaur et al. (2013). Variation of Radon with Relative and Absolute Humidity. Consulta: 11 de enero 2018. Sitio web: <https://www.ijsr.net/archive/v4i4/SUB153020.pdf>
- [35] Korhonen, P., Kokotti, H., & Kalliokoski, P. (2000). Survey and mitigation of occupational exposure of radon in workplaces. *Building and Environment*, 35(6), 555-562.
- [36] Cohilis, P., Wouters, P., & Voordecker, P. (1993). Radon reduction in buildings: the case of two Belgian schools. *Building design, technology and occupant well-being in temperate climates*. Atlanta: ASHRAE, 265-73.
- [37] Deng, W., Jiang, R., & Liu, Y. (1993). Radon study in underground buildings in Chongqing, China (No. NEI-FI--222 (V. 4)).
- [38] Zeng, Q. X., Li, Y., Huanf, Z. W., & Wang, H. L. (1991). Level and dose of radon and its progeny in underground buildings in Wuhan City. In *Proceedings of the International Conference on Indoor Air Quality in Asia, Bangkok, Thailand* (pp. 199-204).
- [39] Annanmäki, M. K., Oksanen, E., & Markkanen, M. (1996). Radon at workplaces other than mines and underground excavations. *Environment International*, 22, 769-772.
- [40] Khan, A. J. (1991). Radon daughter levels in some public and private buildings in India. *Health physics*, 61(4), 535-538.
- [41] Azimi-Garakani, D. (1992). Short-term radon measurements in the workplace. *Indoor Environment*, 1(6), 355-357.
- [42] Malanca, A., Orlandini, R., Pessina, V., & Dallara, G. (1991). Occurrence of radon in some schools of Parma and Reggio Emilia (Northern Italy). *Aerobiologia*, 7(2), 160-163.
- [43] Malisan, M. R., & Padovani, R. (1994). Assessment of radon exposure in kindergartens in north-east Italy. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1-4), 293-297.

- [44] Koichi, I., Michikuni, S., Takao, I., Naruhito, T., Kayo, N., & Kazuo, A. (1993). On the long term indoor radon concentration measurements in the basement HVAC machine room of commercial buildings using a passive monitor method (No. NEI-FI--222 (V. 4)).
- [45] Tokonami, S., Pan, J., Matsumoto, M., Furukawa, M., Fujimoto, K., Fujitaka, K., & Kurosawa, R. (1996). Radon measurements in indoor workplaces. *Radiation protection dosimetry*, 67(2), 143-146.
- [46] Kim, D. S., & Kim, Y. S. (1993). Distributions of airborne radon concentrations in Seoul metropolitan subway stations. *Health physics*, 65(1), 12-16.
- [47] Eremeyeva TN, Soukhikh SE. Radiological estimation of results of inspection of childrens' preschool establishments in Serpkhhov and in Klimovsk. In: *Proceedings of Seventh Tohwa University International Symposium, Radon and Thoron in The Human Environment*, 23-25 October, Fukuoka, Japan, 1997.
- [48] Denman AR. The significance of raised radon levels in NHS properties in Northamptonshire. *Radiation Protection Dosimetry* 1994;54(1):65-8.
- [49] Ross, B. C., Atkinson, M. R., & Dixon, D. W. (1994). Regional variations in occupational exposure to radon and the resulting regulatory action. *Radiation Protection Dosimetry*, 56(1-4), 287-289.
- [50] Wiegand, K., & Dunne, S. P. (1996). Radon in the workplace—a study of occupational exposure in BT underground structures. *The Annals of occupational hygiene*, 40(5), 569-581.
- [51] Brennan, T., Clarkin, M., Turner, W., Fisher, G., & Thompson, B. (1991). School buildings with air exchange rates that do not meet minimum professional guidelines or codes and implications for radon control (No. CONF-910979--).
- [52] Dudney, C. S., Hawthorne, A. R., Wilson, D. L., & Gammage, R. B. (1992). Indoor ²²²Rn in Tennessee valley houses: seasonal, building, and geological factors. *Indoor Air*, 2(1), 32-39.
- [53] EPA (US Environmental Protection Agency). Air and Radiation (6604-J), EPA 402-R-92-014, July 1993. Radon measurement in schools (revised edition). Sitio web: <http://www.epa.gov/iaq/schools/rnschmea.html> (4 July 1997), 1997.
- [54] Ha, N. T. T., Giap, T. V., Khanh, N. V., Cuong, L. D., & Ngoc, P. B. (2017). Calibration Factor for LR 115 Type II Detectors Used to Measure Indoor ²²⁰Rn. *J Environ Anal Toxicol*, 7(476), 2161-0525.
- [55] Eappen, K. P., & Mayya, Y. S. (2004). Calibration factors for LR-115 (type-II) based radon thoron discriminating dosimeter. *Radiation measurements*, 38(1), 5-17.
- [56] GT Analytic. Kodalpha Radon-Dosimeters and LR155 SSNTD Specifications. Sitio web: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350448703003068>

- [57] S. A. Durrani, R. K. Bull. (2013). Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods and Applications. New York: Elsevier
- [58] Sistema Nacional de Información Ambiental (sinia). (2012). Mapa de suelos en los distritos de Lima. Consulta: 11 de enero 2018. Sitio web: <http://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-suelos-districtos-lima>
- [59] Abo-Elmgd, M., & Diab, H. M. (2007). Uncertainty in Activity Measurement of Radon Source Used in CR-39 Calibration. Egyptian Journal of Biophysics, 13(1), 15-23.
- [60] Javier Miranda Martín del Campo. Evaluación de la Incertidumbre de datos experimentales. Consulta: 11 de enero 2018. Sitio web: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/CALCULO DE INCERTIDUMBRES DR. JAVIER MIRANDA_26197.pdf
- [61] Mario Orlando Suárez Ibujes. Coeficiente de correlación de Karl Pearson. Consulta: 20 de febrero 2018. Sitio web: <http://www.monografias.com/trabajos85/coeficiente-correlacion-karl-pearson/coeficiente-correlacion-karl-pearson.shtml>
- [62] Catherine Contreras. (2013). Coeficiente de determinación. Consulta: 20 de febrero 2018. Sitio web: https://pt.slideshare.net/anil_1/coeficiente-de-determinacion-clase/3
- [63] Regresión lineal múltiple. Consulta: 20 de febrero 2018. Sitio web: <http://personal.us.es/avelarde/analisisdos/Regresionmultiple.pdf>

ANEXO I

“AÑO DEL BUEN SERVICIO AL CIUDADANO”



SOLICITO: PERMISO PARA MEDICIÓN
DE RADÓN-222

REPRESENTANTE LEGAL Y/O DIRECTOR
INSTITUCIÓN QUE REPRESENTA

Tengo a bien dirigirme a ustedes a fin de manifestarle que por motivos de establecer el nivel de tolerancia de concentración de Radón-222 en Perú, nuestro Grupo de Investigación Técnica de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, viene haciendo mediciones de Radón-222 en diferentes tipos de recintos como viviendas, edificaciones de uso público, etc.

Por el motivo expuesto, escribimos a usted para consultarle sobre la posibilidad de realizar este tipo de mediciones en la institución que usted preside.

La metodología empleada para detectar Radón, consiste en colocar 03 detectores pasivos de 2x2 cm² sobre la pared, a alturas de 40, 100 y 160 cm desde el piso, tal como se muestra en la imagen adjunta.

Los detectores deberán ser cambiados en un período aproximado de un mes, desde el mes de mayo – diciembre de 2017.

La persona responsable de hacer las mediciones es la Lic. Vanessa Yulliana Guevara Rojas.

Agradeciendo de antemano su atención, se despide atentamente,

MSc. PATRIZIA PEREYRA ANAYA
COORDINADORA DE GITHUNU
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

METODOLOGÍA MEDICIÓN DE RADÓN-222





CARTA DE CONFIDENCIALIDAD

Lima 07 de Junio de 2017

DR. _____
DIRECTOR MÉDICO DE _____

Por medio de la siguiente carta, EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE TÉCNICA DE HUELLAS NUCLEARES (GITHUNU) DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, garantiza la confidencialidad de los resultados obtenidos en las mediciones, pudiendo estos ser divulgados en publicaciones académicas en total anonimato de los lugares en donde fueron realizadas las mediciones.

Agradecemos su colaboración.

Atentamente,

MSc. PATRIZIA PÉREYRA ANAYA
COORDINADORA DE GITHUNU
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ANEXO 2

Las densidades de trazas y concentraciones de Rn-222 de los detectores expuestos en el lugar de trabajo 1A.

PLANO 1						
PUNTOS	P1		P2		P3	
ALTURA (cm)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)
160	1.05 ± 0.27	23.33 ± 6.18	-- ± --	-- ± --	1.44 ± 0.39	31.97 ± 8.73
100	1.24 ± 0.33	27.65 ± 7.37	1.79 ± 0.38	39.75 ± 8.59	0.78 ± 0.24	17.28 ± 5.35
40	1.48 ± 0.38	32.84 ± 8.48	0.85 ± 0.23	19.01 ± 5.15	0.82 ± 0.24	18.15 ± 5.40
	PROMEDIO	27.94 ± 4.27	PROMEDIO	29.38 ± 3.34	PROMEDIO	22.47 ± 3.86
PLANO 2						
PUNTOS	P4		P5		P6	
ALTURA (cm)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.30 ± 0.28	28.95 ± 6.33
100	0.10 ± 0.09	2.16 ± 2.04	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	3.07 ± 0.60	68.27 ± 13.58
40	0.02 ± 0.03	0.43 ± 0.74	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.11 ± 0.25	24.63 ± 5.57
	PROMEDIO	1.01 ± 0.74	PROMEDIO	0.43 ± 0.25	PROMEDIO	40.62 ± 5.33
PLANO 3						
PUNTOS	P7		P8		P9	
ALTURA (cm)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	2.60 ± 0.55	57.90 ± 12.56
100	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.41 ± 0.12	9.07 ± 2.70	1.40 ± 0.32	31.11 ± 7.32
40	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	2.16 ± 0.43	47.96 ± 9.76	0.85 ± 0.25	19.01 ± 5.58
	PROMEDIO	0.43 ± 0.25	PROMEDIO	19.16 ± 3.38	PROMEDIO	25.06 ± 5.19
PLANO 457,9						
PUNTOS	P10		P11		P12	
ALTURA (cm)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)
160	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	1.77 ± 0.37	39.32 ± 8.38	1.55 ± 0.34	34.57 ± 7.79
100	0.19 ± 0.08	4.32 ± 1.72	1.73 ± 0.37	38.46 ± 8.35	0.87 ± 0.20	19.44 ± 4.56
40	0.02 ± 0.02	0.43 ± 0.44	0.68 ± 0.22	15.12 ± 4.88	1.15 ± 0.26	25.49 ± 5.78
	PROMEDIO	1.73 ± 0.61	PROMEDIO	30.97 ± 4.27	PROMEDIO	22.47 ± 3.57
PLANO 5						
PUNTOS	P13		P14		P15	
ALTURA (cm)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)	DENSIDAD (trazas/mm ²)	CONCENTRACION (Bq/m ³)
160	0.58 ± 0.17	12.96 ± 3.86	5.09 ± 0.99	113.21 ± 22.46	1.59 ± 0.38	35.43 ± 8.53
100	1.48 ± 0.38	32.84 ± 8.57	1.05 ± 0.26	23.33 ± 8.57	1.36 ± 0.37	30.25 ± 8.42
40	0.04 ± 0.04	0.86 ± 0.88	0.04 ± 0.05	0.86 ± 1.18	0.04 ± 0.05	0.86 ± 1.18
	PROMEDIO	15.55 ± 3.15	PROMEDIO	45.80 ± 8.02	PROMEDIO	22.18 ± 4.01

Evaluación estadística de las concentraciones de Rn-222 en los diferentes puntos de medición

Nuestro trabajo consiste en comparar variables cuantitativas (concentración de Rn-222) en diferentes grupos (puntos de medición), empleando el software SPSS.

Primero, debemos comprobar si se cumple el requisito de normalidad en la distribución de la variable cuantitativa en cada uno de los grupos. Como el tamaño de la muestra < 50 individuos, se emplea la prueba de Chapiro Wilk, con un intervalo de confianza del 95 % ($\alpha=0.05=5\%$).

Tabla: Pruebas de normalidad^{b,c}

Puntos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig. (P-valor)
1	0,971	3	0,671
2	--	--	--
3	0,794	3	0,030
4	0,750	3	0,000
6	0,823	3	0,172
8	0,881	3	0,327
9	0,955	3	0,590
10	0,750	3	0,000
11	0,777	3	0,049
12	0,987	3	0,780
13	0,981	3	0,733
14	0,893	3	0,363
15	0,859	3	0,266

- a. Corrección de la significación de Lilliefors
- b. Concentración es una constante cuando Puntos = 5 y se ha desestimado.
- c. Concentración es una constante cuando Puntos = 7 y se ha desestimado.

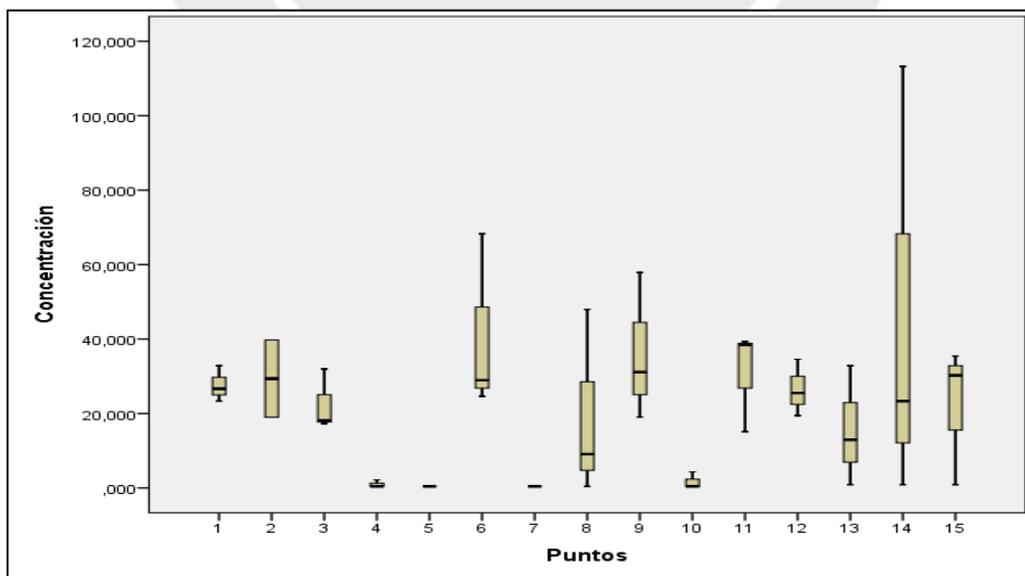


Figura: Concentración de Radón-222 versus puntos de medición

La hipótesis estadística planteada es:

P-valor $\Rightarrow \alpha$ acepto $H(0)$: los datos provienen de una distribución normal.

P-valor $< \alpha$ acepto $H(1)$: los datos NO provienen de una distribución normal.

Como podemos observar en la tabla anterior, el punto 3, 4, 10 y 11 no muestran una distribución normal puesto que sus valores P-valor $< \alpha$ (0.05). Al haberse detectado problemas con la normalidad en dos puntos de medición, lo correcto es recurrir a una prueba no paramétrica para k muestras independientes. El tipo de prueba seleccionado es el Kruskal-Wallis.

Tabla: Prueba de Kruskal-Wallis

Puntos	Tamaño de cada muestra (N)	Rango promedio
1	3	29,67
2	2	31,25
3	3	24,67
4	3	9,00
5	3	6,00
6	3	33,33
7	3	6,00
8	3	21,33
9	3	32,17
10	3	9,33
11	3	32,00
12	3	29,33
13	3	21,83
14	3	27,50
15	3	27,00
Total	44	

Tabla: Estadísticos de contraste^{a,b}

	Concentración
Chi-cuadrado	25,906
gl	14
Sig. asintót. (P-valor)	,027

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: Puntos

La hipótesis estadística planteada es:

P-valor $\Rightarrow \alpha$ acepto $H(0)$: NO EXISTE diferencia significativa entre las medidas de las concentraciones de Radón-222 en los diferentes puntos de medición.

P-valor $< \alpha$ acepto $H(1)$: EXISTE diferencia significativa entre las medidas de las concentraciones de Radón-222 en los diferentes puntos de medición.

Como podemos observar en la tabla anterior, el P-valor: $0.027 < \alpha (0.05)$, por lo tanto se acepta la hipótesis $H(1)$, que indica que **EXISTE** diferencia significativa entre las medidas de las concentraciones de Radón-222 en los diferentes puntos de medición.



ANEXO 3

En esta tesis se hizo un conteo de trazas de manera manual, al cual hay multiplicarle por un factor de corrección, puesto que el conteo de trazas que se hizo para determinar el factor de calibración de los detectores LR-115 Tipo 2, fue empleando un software ImageJ. Se escogieron 05 imágenes de diferentes detectores que tuvieran 06 trazas observadas y estas fueron evaluadas empleando el software, para ver si el software tiende a sobrestimar o subestimar el conteo de trazas y así sucesivamente. Se determinó el ajuste lineal de estos datos y así obtuvimos el factor de corrección de 0.9588, que me permite convertir la lectura hecha manualmente en una lectura hecha por el software.

$$\text{Conteo de trazas por software} = FC \times \text{conteo manual de trazas}$$

$$FC = \frac{\text{Conteo de trazas por software}}{\text{Conteo manual de trazas}} = 0.96 \pm 0.03$$

Tabla: Conteo de trazas

Conteo de trazas por software	Conteo manual de trazas
0	0
5	5
4	
5	
5	
4	
6	6
5	
6	
6	
6	
6	7
7	
7	
7	
6	

7	8
7	
8	
8	
8	9
7	
7	
7	
8	
9	10
9	
10	
10	
10	11
11	
10	
11	
9	
11	12
11	
11	
11	
10	
11	14
14	
14	
14	
14	
13	

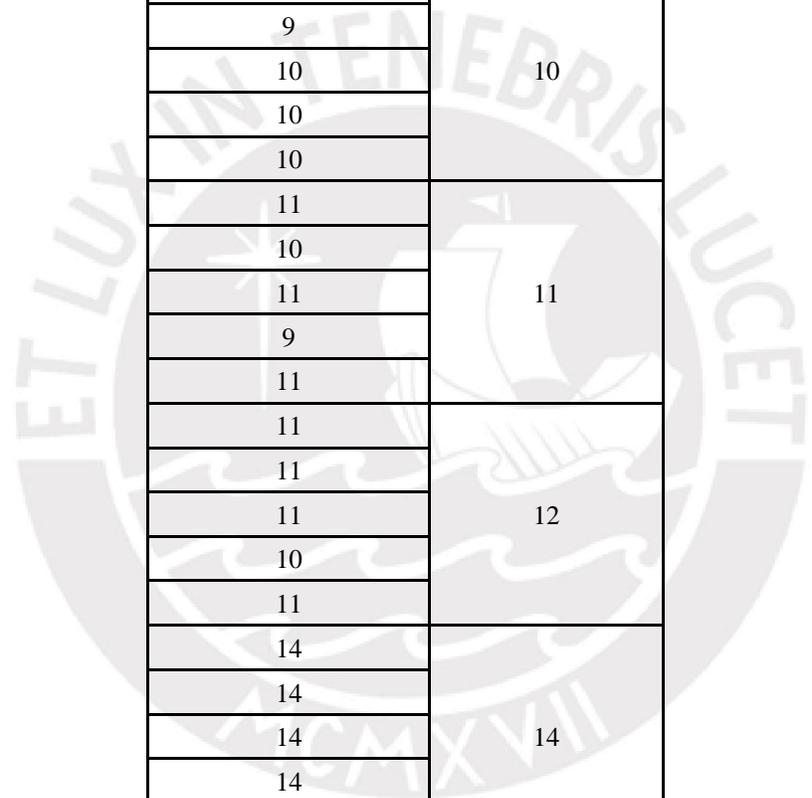


Tabla: Incertidumbre asociada al ajuste lineal

Ajuste lineal	Pendiente	Ordenada al origen
$y = mx + b$	m	b
	0.96	-0.26
Incertidumbre	0.03	0.48
Determinación r^2	0.95	0.71

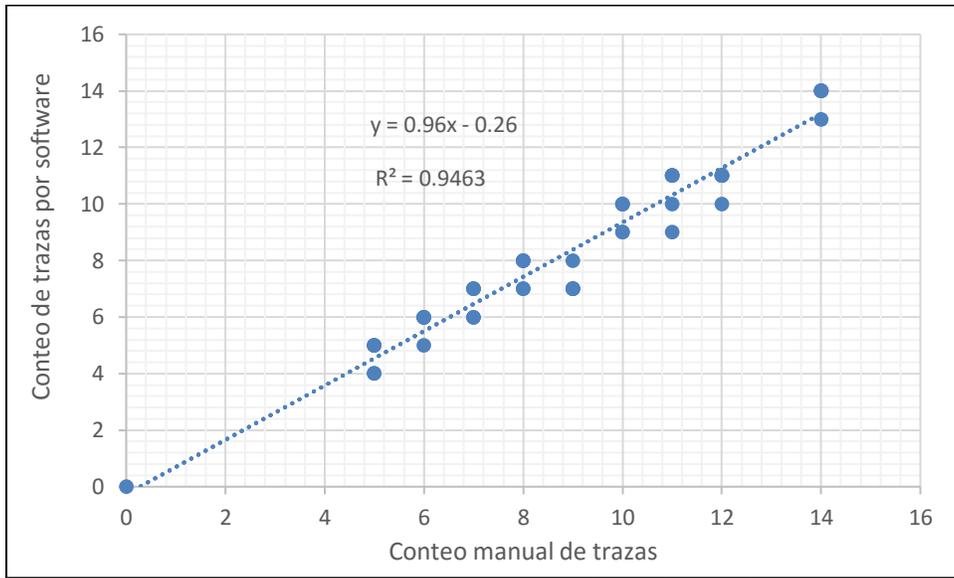


Figura: Ajuste lineal entre el conteo de trazas por software y el conteo manual de trazas.

