



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA**

**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE EN  
VIVIENDAS DE CUSCO METROPOLITANO**

**PARA OPTAR AL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA**

**AUTOR**

Br. ROCIO ARTEAGA CURIE

**ASESOR:**

Mg. MIGUEL REINALDO BONNETT  
DEL ALAMO

**CODIGO ORCID:**0000-0002-1011-8411

**CUSCO – PERÚ  
2023**

## INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: **EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE EN VIVIENDAS DE CUSCO METROPOLITANO**

presentado por: **ROCIO ARTEAGA CURIE** con DNI Nro.: **23862383** para optar el título profesional/grado académico de **MAESTRO EN CIENCIAS MENCIÓN FÍSICA** Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ..01.. veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de .....8%.....

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el Informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 21 de noviembre de 2023



Firma

Mg. MIGUEL REINALDO BONNETT  
DEL ALAMO

Nro. de DNI: 23933991

ORCID del Asesor: 0000-0002-1011-8411

ORCID del Co - Asesor: 0000-0003-0435-4693  
DNI: 07934622

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:  
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:288518388?locale=es-MX>



Identificación de reporte de similitud. oid:27259:288518388

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS\_master\_Arteaga.docx**

AUTOR

**Rocio Arteaga**

RECUENTO DE PALABRAS

**21848 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**115910 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**123 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**5.7MB**

FECHA DE ENTREGA

**Nov 21, 2023 2:20 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Nov 21, 2023 2:22 PM GMT-5**

#### ● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 6% Base de datos de Internet
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 6% Base de datos de trabajos entregados

#### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

**DEDICATORIA**

*A la memoria de mi padre Ignacio que está al lado del Señor y que vivirá eternamente en mi corazón. A mi querida madre Sila por su infinito amor. A mi esposo Manuel y a mis amadas hijas Adriana y Andrea quienes me apoyaron en todo momento para concluir con éxito este anhelado proyecto.*

**AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a mi asesor Mg. Miguel R. Bonnet Del Álamo y mi co - asesora Patrizia Edel Pereyra Anaya, por la orientación recibida y su apoyo incondicional para la conclusión de este trabajo.*

## ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
<b>1.1. Situación Problemática.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Formulación del problema.....</b>	<b>5</b>
a. Problema general .....	5
b. Problemas específicos .....	5
<b>1.3. Justificación de la investigación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Objetivos de la investigación.....</b>	<b>7</b>
a. Objetivo general .....	7
b. Objetivos específicos .....	7
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	8
<b>2.1. Bases teóricas .....</b>	<b>8</b>
2.1.1 Radiactividad .....	8
2.1.2 Ley de las desintegraciones radiactivas .....	10
2.1.3 Tiempo de vida media.....	11
2.1.4 Periodo de semi desintegración .....	12
2.1.5 Tipos de desintegraciones radiactivas.....	13
2.1.6 Radiación .....	16
2.1.7 Fuentes Radiactivas .....	18
2.1.8 Interacción de la radiación con la materia .....	20
2.1.9 Detección de la radiación ionizante.....	28
2.1.10 Magnitudes y Unidades de medida .....	30
2.2 Marco Teórico Conceptual .....	31
2.2.1 Radón.....	31
2.2.2 Trazas Nucleares .....	46
2.2.3 Concentración de radón .....	57
2.2.4 Radón en viviendas .....	58
<b>2.3 Antecedentes empíricos de la investigación.....</b>	<b>61</b>
2.3.1 Antecedentes internacionales .....	61
2.3.2 Antecedentes nacionales .....	63
<b>2.5 Identificación de variables e indicadores .....</b>	<b>64</b>
<b>2.6 Operacionalización de variables .....</b>	<b>65</b>
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	67
<b>3.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica .....</b>	<b>67</b>

<b>3.2</b>	<b>Tipo y nivel de investigación</b> .....	<b>68</b>
<b>3.3</b>	<b>Unidad de análisis</b> .....	<b>68</b>
<b>3.4</b>	<b>Población de estudio</b> .....	<b>68</b>
<b>3.5</b>	<b>Tamaño de Muestra</b> .....	<b>68</b>
<b>3.6</b>	<b>Técnicas de selección de muestra</b> .....	<b>69</b>
<b>3.7</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b> .....	<b>69</b>
<b>3.8</b>	<b>Técnicas de análisis de interpretación de la información</b> .....	<b>75</b>
<b>3.8.1</b>	<b>Prueba del Chi cuadrado: <math>\chi^2</math></b> .....	<b>76</b>
<b>3.8.2</b>	<b>Criterio de Chauvenet</b> .....	<b>78</b>
<b>3.8.3</b>	<b>Distribución de probabilidad de Poisson</b> .....	<b>78</b>
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		80
4.1	Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados .....	80
<b>4.1.1</b>	<b>Valor medio de la concentración del radón en la ciudad de Cusco</b> .....	<b>82</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Concentración media de radón por distrito</b> .....	<b>83</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Concentración de radón según el tipo de vivienda</b> .....	<b>86</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Concentración de radón durante el año</b> .....	<b>87</b>
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		90
RECOMENDACIONES .....		92
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....		94
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA.....		102
ANEXO 2: INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE LA INFORMACIÓN .....		103
ANEXO 3: DATOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....		104
ANEXO 4: REPORTE DE AIRTHINGS .....		108
ANEXO 5: ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL DETECTOR CR-39.....		109
ANEXO 6: ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MONITOR CORENTIUM HOME DE AIRTHINGS .....		111

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Vida media de algunos radioisótopos.....	12
<b>Tabla 2</b> Propiedades de las radiaciones $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ .....	16
<b>Tabla 3</b> Actividad por kilogramo de radio y torio en algunos materiales de construcción usados en Unión Europea .....	41
<b>Tabla 4</b> Actividad por kilogramo de radio y torio en algunos materiales de construcción usados en la costa central peruana.....	42
<b>Tabla 5</b> Alcance de las partículas alfa.....	56
<b>Tabla 6</b> Uranio y torio presente en algunas rocas .....	60
<b>Tabla 7</b> Operacionalización de las variables .....	66
<b>Tabla 8</b> <i>Medidas de concentración de radón mayores a 100 Bq/m<sup>3</sup></i> .....	84
<b>Tabla 9</b> Distancias medias de difusión del radón y torón en diferentes medios .....	89

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Cadena de desintegración del uranio 238 .....	3
<b>Figura 2</b> Estabilidad nuclear .....	9
<b>Figura 3</b> Curva de desintegración de un elemento radiactivo .....	13
<b>Figura 4</b> Desintegración alfa.....	14
<b>Figura 5</b> Radiación electromagnética .....	17
<b>Figura 6</b> Fuentes de Radiación .....	20
<b>Figura 7</b> Poder de penetración de algunas radiaciones ionizantes.....	21
<b>Figura 8</b> Procesos de interacción de la radiación y con la materia .....	23
<b>Figura 9</b> Efecto fotoeléctrico .....	24
<b>Figura 10</b> Efecto Compton.....	25
<b>Figura 11</b> Proceso de formación de pares .....	26
<b>Figura 12</b> Radiación de frenado. ....	27
<b>Figura 13</b> Desintegración del gas radón y su progenie .....	33
<b>Figura 14</b> Cadena de desintegración del uranio 238 .....	34
<b>Figura 15</b> Proceso de transporte del radón desde la fuente .....	37
<b>Figura 16</b> Esquema de liberación del radón y su progenie desde paredes.....	40
<b>Figura 17</b> Radón un peligro para la salud .....	43
<b>Figura 18</b> Desarrollo de cáncer a partir de mutaciones producidas por radiaciones ionizantes .....	45
<b>Figura 19</b> Formación de trazas en el detector CR-39.....	48
<b>Figura 20</b> Formación de la traza en el detector.....	51
<b>Figura 21</b> Mecanismos para la formación de la traza .....	52
<b>Figura 22</b> Poder de frenado másico en DTS.....	55
<b>Figura 23</b> Curva de Bragg para la ionización específica de una partícula alfa.....	56
<b>Figura 24</b> Vías de acceso del gas radón al interior de las viviendas.....	59
<b>Figura 25</b> Ubicación de la ciudad del Cusco y número de habitantes por distrito.....	67
<b>Figura 26</b> Distribución de detectores CR -39 y LR -115 en la ciudad del Cusco .....	69
<b>Figura 27</b> Monitores de radón UNSAAC Y PUCP-UNSAAC .....	71
<b>Figura 28</b> Revelado de detectores CR- 39 al interior del sistema termorregulado .....	73



<b>Figura 29</b> Procedimiento de lectura y conteo de trazas nucleares.....	74
<b>Figura 30</b> Proceso de lectura y conteo de trazas en el detector LR -115.....	75
<b>Figura 31</b> Valores observados de número de huellas versus esperados y su contribución Chi -2.....	80
<b>Figura 32</b> Distribución de concentraciones de radón.....	82
<b>Figura 33</b> Concentración de radón por distrito.....	83
<b>Figura 34</b> Fotografía de huellas nucleares superpuestas.....	84
<b>Figura 35</b> Mapa de concentración de radón en la Ciudad el Cusco.....	85
<b>Figura 36</b> Medidas realizadas con el monitor Corentium Home Airthings.....	86
<b>Figura 37</b> Concentración de radón en viviendas de material noble y adobe de la ciudad del Cusco (noviembre marzo).....	87
<b>Figura 38</b> Temperatura y precipitación en el periodo de un año en la región del Cusco.....	88
<b>Figura 39</b> Variación temporal de la concentración de radón (Bq/m3) por tipo de vivienda.....	88

## RESUMEN

El radón es un gas natural que se origina en el proceso espontáneo de desintegración nuclear del uranio y del torio, elementos químicos que se hallan concentrados en diferentes proporciones en las rocas del suelo, es considerado como uno de los elementos que aporta significativamente a la radiación natural del tipo ionizante a la que está expuesto el hombre no obstante, un posible impacto negativo de concentraciones altas de radón, registrados en espacios de poca ventilación, es la exposición crónica a la inhalación de este gas que puede afectar considerablemente a la salud de los habitantes (UNSCEAR, 2016; OMS, 2015). Esta investigación tiene como objetivo principal cuantificar la concentración de este gas ionizante en viviendas y lugares de trabajo ubicados en cinco distritos de la ciudad del Cusco. Con esa finalidad, se emplearon los detectores CR-39 y LR-115 que fueron expuestos en dos épocas diferentes del año, tomando en cuenta las variaciones estacionales del radón. El enfoque seguido ha sido cuantitativo de diseño no experimental y el nivel de esta investigación es descriptivo y correlacional. Los valores de la concentración media de radón (Rn-222) hallados con el detector CR-39 en la época de lluvia, fueron los siguientes: En la ciudad del Cusco ( $59,94 \pm 10,53$ ) Bq/m<sup>3</sup>, en viviendas construidas de concreto ( $51,70 \pm 9,23$ ) Bq/m<sup>3</sup> y en viviendas construidas con adobe ( $65,65 \pm 11,41$ ) Bq/m<sup>3</sup>. Así mismo, los valores medios de la concentración de radón 222 hallados con el detector LR-115 fueron: ( $55,8 \pm 12,4$ ) Bq/m<sup>3</sup> en la ciudad de Cusco, ( $56,26 \pm 12,83$ ) Bq/m<sup>3</sup> en viviendas construidas de concreto y de ( $59,47 \pm 11,57$ ) Bq/m<sup>3</sup> en viviendas construidas con adobe. Con ambos detectores se registró el valor medio más alto de la concentración de radón 222 en el distrito de San Jerónimo de la ciudad del Cusco, correspondiente a ( $66,40 \pm 10,39$ ) Bq/m<sup>3</sup> usando el detector CR-39 y ( $61,50 \pm 13,22$ ) Bq/m<sup>3</sup> medido con el detector LR-115. Los valores medios de la concentración de radón a nivel de la ciudad del Cusco, se encuentran bajo el límite de seguridad de 100 Bq/m<sup>3</sup> propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015) y bajo del límite de seguridad de (200 – 600) Bq/m<sup>3</sup> considerada como exposición crónica según el Reglamento de Protección Radiológica aprobada mediante D.S.N°009-97-EM, (1997) en Perú, concluyendo que los niveles medios de concentración de radón en las viviendas de la ciudad del Cusco no representa riesgo radiológico para salud. No obstante, en algunas viviendas construidas de adobe se registraron valores que superan el límite de seguridad, por lo que se recomienda adoptar acciones para mitigar la posible contaminación radiactiva del aire al interior de estas.

**Palabras clave:** radón, viviendas, concentración, huellas nucleares

## ABSTRACT

Radon is a natural gas that originates from the spontaneous process of nuclear disintegration of uranium and thorium, chemical elements that concentrate in different proportions in soil rocks. It is considered one of the elements that contributes significantly to the natural ionizing radiation to which man is exposed to. However, a possible negative impact of high concentrations of radon, recorded in poorly ventilated spaces, is chronic exposure to inhalation of this gas that can considerably affect the health of inhabitants. (UNSCEAR, 2016; WHO, 2015). The main objective of this research is to quantify the concentration of this ionizing gas in homes and workplaces located in five districts of the city of Cusco. For this purpose, the CR-39 and LR-115 detectors were used, which were exposed at two different times of the year, considering the seasonal variations of radon. The approach followed has been quantitative with a non-experimental design and the level of this research is descriptive and correlational. The values of the average concentration of radon (Rn-222) found with the CR-39 detector during the rainy season were the following: In the city of Cusco ( $59.94 \pm 10.53$ ) Bq/m<sup>3</sup>, in households built of concrete ( $51.70 \pm 9.23$ ) Bq/m<sup>3</sup> and in homes built with adobe ( $65.65 \pm 11.41$ ) Bq/m<sup>3</sup>. Likewise, the average values of the concentration of radon 222 found with the LR-115 detector were: ( $55.8 \pm 12.4$ ) Bq/m<sup>3</sup> in the city of Cusco, ( $56.26 \pm 12.83$ ) Bq/m<sup>3</sup> in homes built of concrete and ( $59.47 \pm 11.57$ ) Bq/m<sup>3</sup> in homes built with adobe. With both detectors the highest average value of the radon 222 concentration in the San Jerónimo district of the city of Cusco, corresponding to ( $66.40 \pm 10.39$ ) Bq/m<sup>3</sup> using the CR-39 detector and ( $61.50 \pm 13.22$ ) Bq/m<sup>3</sup> measured with the LR-115 detector. The average values of radon concentration at the city of Cusco are below the safety limit of 100Bq/m<sup>3</sup> proposed by the World Health Organization (WHO, 2015), and below the safety limit of (200 – 600) Bq/m<sup>3</sup> considered as chronic exposure according to the Radiological Protection Regulation approved by D.S.N°009-97-EM, (1997) in Peru, concluding that the average levels of radon concentration in homes Cusco city do not represent a radiological risk to health. However, in some homes built of adobe, recorded values exceeded the safety limit, so it is recommended to adopt actions to mitigate possible radioactive contamination of the air inside them

**Key words:** Radon, homes, concentration, nuclear tracks

## INTRODUCCIÓN

Desde décadas pasadas y a nivel mundial la preocupación por medir el radón en los hogares ha ido en aumento, debido a que muchas investigaciones muestran la relación entre la inhalación de radón con el cáncer en los pulmones, claro está, que el riesgo a desarrollar cáncer depende también del grado de exposición a este gas natural radiactivo (radón), que es altamente ionizante (Segura, 2022; UNSCEAR, 2016).

Son varias las fuentes de radiación ionizante natural a las que se puede exponer el hombre, entre ellas mencionaremos al suelo, sobre el cual se construyen las viviendas, seguido de los materiales utilizados para la construcción, que en su mayoría son extraídos también del suelo el que puede contener cantidades suficientes de radio Ra - 226, elemento químico, precursor del radón. El radón que exhalan estas fuentes se puede acumular en ambientes cerrados o de poca ventilación (OMS, 2015; UNSCEAR, 2016).

Esta investigación determina la cantidad de radón que se acumula en los primeros niveles de las viviendas de los distritos: Cusco, Wánchaq, Santiago, San Sebastián y San Jerónimo, que pertenecen a la provincia del Cusco y su variación temporal medida en época de lluvia (nov-dic/2020 a ene-mar/2021) y en escasez de lluvia (2018). En vista que no se han realizado estudios similares anteriores a éste, que nos permitan conocer los niveles de radón y el riesgo al que se exponen los habitantes en sus hogares.

## CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Situación Problemática

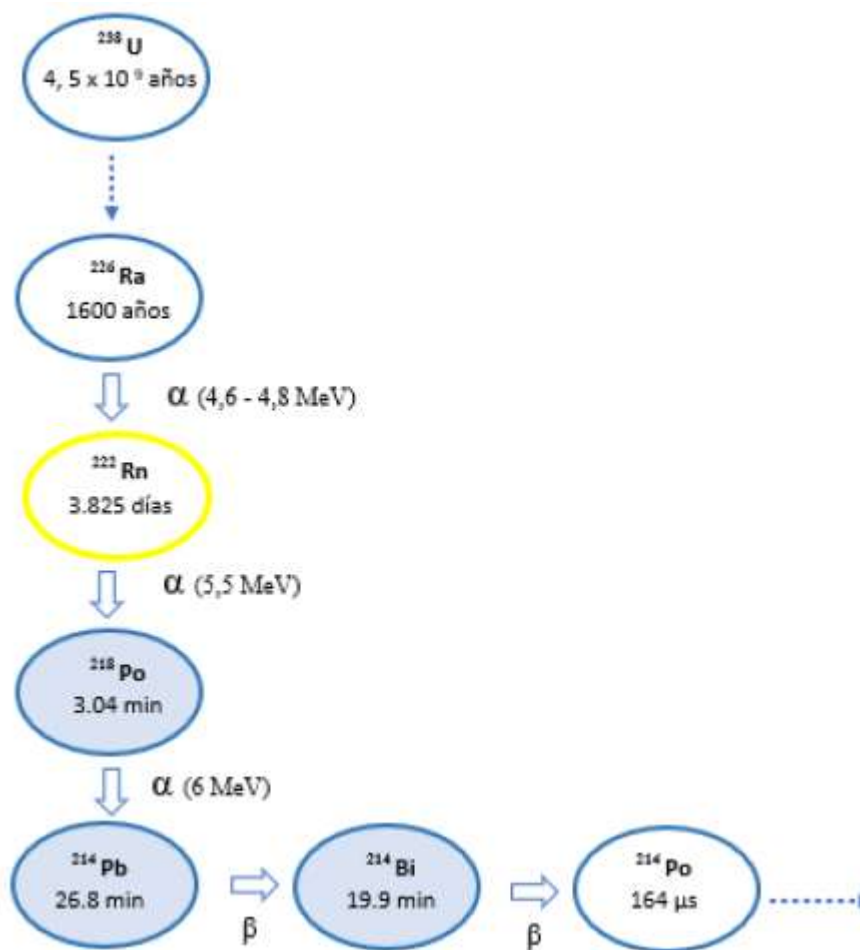
La radiación ionizante natural, es energía que emiten las partículas alfa, beta, radiación gamma y otros, provenientes de elementos radiactivos que se hallan en la corteza terrestre considerada como fuente natural radiactiva (CSN, 2009).

Según Nazaroof, (1992) las rocas de la corteza terrestre presentan elementos traza, producto de la desintegración radiactiva de los tres principales radioisótopos naturales: uranio (U-238 y U-235) y torio (Th-232), que comparten una característica importante, pues cada uno de ellos contiene un isótopo de radón químicamente inerte: como el radón (Rn-222), actinon (Rn-219) y el torón (Rn-220) respectivamente. Estos isótopos de vida media de: 3,825 días (radón), 4 segundos (actinon) y 56 segundos (torón), pueden migrar distancias significativas, dependiendo del medio en el que se encuentren, desde el punto donde se generaron hasta la atmósfera, antes de desintegrarse.

La Figura 1, muestra el proceso de desintegración radiactiva del uranio 238, así como el tiempo de vida media de cada uno de sus productos. En ella se puede apreciar que el radio Ra- 226 es el elemento precursor del radón, pues se desintegra emitiendo una partícula alfa que posee una energía comprendida entre 4,6 y 4,8 MeV y un isótopo de Rn -222 (Nazaroof, 1992; Hernández, 2016).

**Figura 1**

*Cadena de desintegración del uranio 238*



Datos extraídos de Hernández (2016)

Todos los productos en los que se desintegra el uranio U-238 se hallan en la fase sólida excepto el radón, que se halla en estado gaseoso y al ser inhalado continúa su proceso de desintegración en los isótopos: Polonio Po-218, Plomo Po-214 y Bismuto Bi – 214, elementos que se depositan en los pulmones y vías respiratorias de los seres vivos generando alteraciones a nivel celular. Por cuanto, la inhalación del gas radón ha sido considerado como la primera causa de cáncer pulmonar en personas no fumadoras (Nazaroo, 1992; Noverques, 2017; OMS, 2015).

La condición gaseosa del radón, le permite migrar a la atmósfera por advección y principalmente por difusión molecular desde el suelo donde se genera. Al ser exhalado a la atmósfera el radón podría acumularse en lugares cerrados y de poca ventilación, esta migración del gas desde el suelo hacia la atmósfera interna de las viviendas se debe a que el gas es impulsado naturalmente debido a las diferencias de temperatura y presión entre el interior y el exterior de la superficie terrestre sobre la cual se edifican las viviendas, (Barros y Pérez, 2015; Nazarof, 1992).

El hombre al interior de su vivienda, puede exponerse a la inhalación del gas radón proveniente del suelo, materiales de construcción como el yeso, cemento rocas y otros materiales de origen natural que podrían contener radioisótopos que seguirán en proceso de desintegración hasta llegar a la estabilidad (Frutos, 2019).

El año 2015 la Organización Mundial de la Salud, publicó el manual sobre el “radón en interiores: una perspectiva de salud pública” (OMS, 2015) documento en el cual se proponen normas y medidas a tomar con el objetivo de prevenir o reducir los riesgos para la salud que resulta de exponerse a la inhalación del gas radón al interior de las viviendas y recomienda a los países establecer un nivel de referencia de  $100 \text{ Bq/m}^3$  para reducir la exposición al radón en ambientes interiores, agregando que en caso de no ser posible alcanzar dicho nivel, éste no debe ser mayor a  $300 \text{ Bq/m}^3$  (OMS, 2015, pág. xi)

## **1.2. Formulación del problema**

### **a. Problema general**

¿Cuáles son las concentraciones medias de radón en viviendas y espacios de trabajo en la ciudad del Cusco?

### **b. Problemas específicos**

- 1° ¿Cuáles son las concentraciones medias de radón que presentan los espacios de trabajo y viviendas, de ladrillo o bloques de cemento en la ciudad del Cusco?
- 2° ¿Cuáles son las concentraciones medias de radón que presentan los espacios de trabajo y viviendas de adobe en la ciudad del Cusco?
- 3° ¿Qué medidas de mitigación se pueden emplear para disminuir la contaminación radiactiva del aire al interior de las viviendas y espacios de trabajo en la ciudad del Cusco?

## **1.3. Justificación de la investigación**

### **a) Prevención al riesgo de exposición al radón.**

En las dos últimas décadas, a nivel mundial se han incrementado investigaciones para conocer y monitorear la concentración de gas radón en viviendas y espacios de trabajo debido a que se ha demostrado que altos niveles de concentración de este gas en interiores, se relacionan con el aumento del riesgo de desarrollo de cáncer de pulmón, inclusive la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, de siglas IARC,



califica al radón como “cancerígeno para los humanos” del tipo I (IARC, 2001; OMS, 2015).

El presente estudio resulta conveniente para determinar si los habitantes de las viviendas y espacios de trabajo, de la ciudad del Cusco, respiran aire con concentraciones de radón que pongan en riesgo su salud.

#### **b) Relevancia social**

Los resultados que se hallen en este trabajo son socialmente relevantes pues permite realizar una evaluación inicial de la concentración de radón en viviendas y espacios de trabajo en cinco distritos de la ciudad de Cusco. En caso de hallarse valores preocupantes de concentración de radón, estos se darán a conocer los habitantes para que puedan asumir medidas de mitigación y reducir la exposición a la radiación ionizante que deriva del radón.

#### **c) Valor teórico**

Al no existir estudios previos sobre la contaminación del aire por radón en viviendas de la ciudad del Cusco, los resultados numéricos producidos en el desarrollo de nuestra investigación constituirán un aporte a la línea base radiológica ambiental, que servirá para describir y evaluar en un futuro el comportamiento del gas radón en la ciudad del Cusco y sus distritos. Estos resultados también podrán contribuir a la creación de mapas de radón local y nacional que son utilizados por formuladores de políticas públicas y otros.

**d) Utilidad metodológica**

El uso de detectores pasivos como el CR- 39 (policarbonato) y el LR -115 que se emplean para medir la concentración de radón en aire, constituyen un aporte metodológico de bajo costo y conveniente para estimar la concentración media anual del radón al interior de una vivienda, inclusive permite determinar las fluctuaciones que presenta el gas debido a factores climáticos y otros. Los detectores activos en comparación con los pasivos son costosos y miden la concentración de radón de forma inmediata sin considerar las fluctuaciones del gas (OMS, 2015; Durrani, & Bull, 2013; Fleischer et al., 1965).

**1.4. Objetivos de la investigación****a. Objetivo general**

Hallar la concentración media de radón en viviendas y espacios de trabajo en la ciudad del Cusco.

**b. Objetivos específicos**

1° Conocer la concentración media de radón en espacios de trabajo y viviendas construidas con concreto y/o ladrillo o bloques de cemento.

2° Conocer la concentración media de radón en viviendas y lugares de trabajo construidas con adobe.

3° Establecer las medidas necesarias para disminuir la contaminación radiactiva de la atmósfera al interior de las viviendas y espacios de trabajo de la ciudad del Cusco.

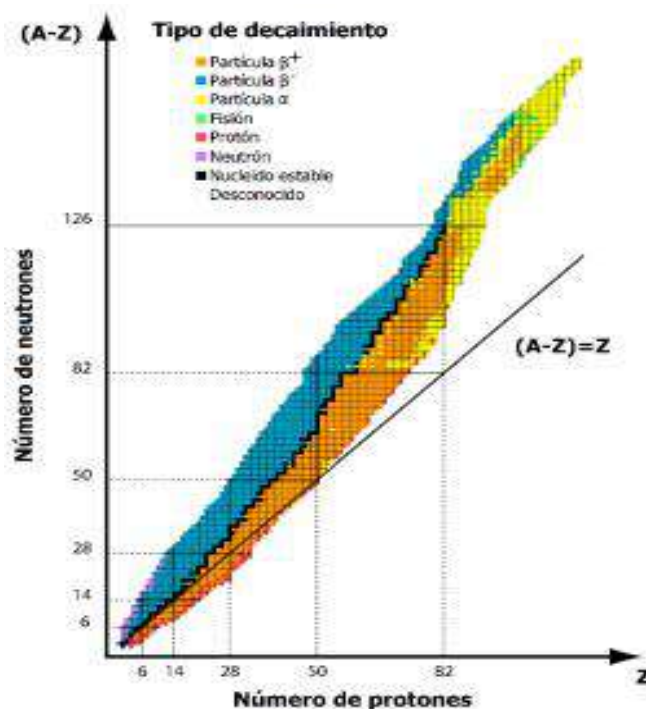
## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

### 2.1. Bases teóricas

#### 2.1.1 Radiactividad

Los átomos de las sustancias mayormente poseen núcleos estables cuando tienen la cantidad necesaria de neutrones que interactúan entre sí y con los protones, anulando de esta forma la repulsión que se produce entre los protones al interior del núcleo, sin embargo; existen átomos que poseen núcleos inestables, es decir que poseen cantidades diferentes de neutrones o protones de lo que se requiere para conseguir la estabilidad del núcleo, Calzada y Cerecetto (2019) estos núcleos inestables con  $Z > 83$  tienen la capacidad de emitir espontáneamente radiación electromagnética o partículas en búsqueda de la estabilidad temporal modificando considerablemente su estructura.

En la figura 2, la franja negra (zona de estabilidad) representa al conjunto de elementos que poseen núcleos estables, los elementos situados por debajo de esta zona de estabilidad, tienen núcleos inestables debido a que la cantidad de protones es mayor a la cantidad de neutrones y los elementos situados por encima de la zona de estabilidad, también tienen núcleos inestables debido a que la cantidad de neutrones es mayor que los protones.

**Figura 2***Estabilidad nuclear*

*Nota: La traza de cuadros negros representa a la región de estabilidad nuclear y los núcleos inestables se hallan alrededor de ella. Fuente web <https://cbrn.es/>*

La radiactividad natural es un fenómeno espontáneo por el que el núcleo de un átomo emite uno o varios tipos de partículas, cambiando a un estado de menor energía, es de naturaleza probabilística, pues no hay certeza de que en un determinado segundo cierta cantidad de núcleos se desintegren o ninguno se desintegre. Por lo tanto, a la probabilidad de que un núcleo se desintegre en la unidad de tiempo se denomina constante de decaimiento  $\lambda$  y tiene un valor específico para cada radionúclido (Soria, 2020; Tsoulfanidis, 1995)

### 2.1.2. Ley de las desintegraciones radiactivas

Ernest Rutherford y Frederick Soddy, ambos Premio Nobel de Química (1908 y 1921 respectivamente) desarrollaron la teoría de la desintegración radiactiva, en la que los núcleos inestables de los átomos de una sustancia radiactiva, sufren una transformación aleatoria en otro elemento químicamente diferente al original acompañado de una emisión alfa o beta (Burcham, 2020). Este proceso de desintegración se repite por cada elemento producto de la desintegración hasta alcanzar la estabilidad nuclear.

Al número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo, se le denomina *actividad* y se mide en *desintegraciones por segundo* con la unidad llamada Becquerel (Bq), y de forma equivalente también se puede expresar en *Curie (Ci)*, donde  $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ .

$$\text{Actividad} = -\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (2.1)$$

Siendo  $N$ , el número de átomos (o núcleos) presentes en la masa  $m$  de la sustancia radiactiva o radioisótopo, igual a:

$$N = m \frac{N_A}{A} \quad (2.2)$$

Donde  $N_A$ , es el número de Avogadro;  $A$ , es el peso atómico del radioisótopo y  $\lambda$ , la constante definida en la página 20, que al ser mayor su valor, más radiactiva es la sustancia, esta constante se mide en  $\text{s}^{-1}$ .

Integrando la ecuación (2.1), entre los límites (0;t), con  $N(t=0)=N_0$ , igual a la cantidad de núcleos presentes en  $t=0$ s y transcurrido un tiempo  $t$ , quedan  $N$  núcleos sin desintegrar, dado por la siguiente ecuación:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

ecuación, que se conoce como la ley de las desintegraciones radiactivas de Rutherford.

Como la desintegración radiactiva es un proceso aleatorio y espontáneo, sólo se puede determinar la probabilidad de que una partícula sea emitida producto de la desintegración. Es así que el número de desintegraciones que se observan en un intervalo de tiempo o en una región fija del espacio, se ajusta a la distribución de Poisson (Knoll, 2010; Tsoulfanidis, 1995; L'Annunziata, 2012) con media:

$$\mu = \frac{\lambda N}{dt} \quad (2.4)$$

La probabilidad de obtener un determinado valor discreto “ $n$ ” dada una media “ $\mu$ ”, es:

$$P(n; \mu) = \frac{e^{-\mu}}{n!} \mu^n \quad (2.5)$$

### 2.1.3 Tiempo de vida media

Es el valor esperado del tiempo que tarda un núcleo en desintegrarse, se define como el recíproco de la constante de desintegración (Soria, 2011; Tsoulfanidis, 1995).

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (2.6)$$

La tabla 1, muestra valores de los tiempos de vida media de algunos radionucleidos naturales y artificiales.

**Tabla 1**

*Vida media de algunos radioisótopos*

Radionucleidos	Isótopos	Vida media (años)
Naturales	$^{238}\text{U}$	$4.5 \times 10^9$
	$^{235}\text{U}$	$7.1 \times 10^8$
	$^{235}\text{Th}$	$1.4 \times 10^{10}$
	$^{40}\text{K}$	$1.3 \times 10^9$
	$^{14}\text{C}$	5730
Sintéticos	$^{239}\text{Pu}$	24000
	$^{137}\text{Cs}$	30
	$^{90}\text{Sr}$	28.8
	$^{131}\text{I}$	0.022

*Datos extraídos de Calzada y Cerecetto, (2019)*

#### 2.1.4 Periodo de semi desintegración

Es el tiempo necesario para que el número,  $N_0$  de núcleos radiactivos se desintegren reduciéndose a la mitad (Burcham, 2020; Calzada y Cerecetto, 2019).

$$\text{Si } \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \text{entonces } t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} = T \quad (2.7)$$

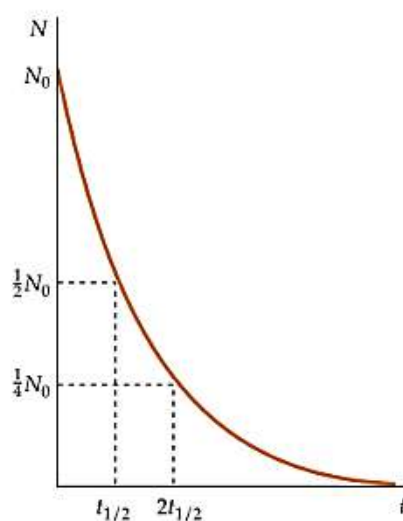
Estos periodos varían en un rango de valores comprendidos entre  $1 \mu\text{s} < t < 10^{16}$  años, (Tsoulfanidis, 1995).

El radón tiene el mayor periodo de semidesintegración 3,824 días, es decir que la cantidad de núcleos sin desintegrar se reducen a la mitad en 3.824 días.

La figura 3, muestra que la desintegración de los núcleos radiactivos sigue la ley exponencial y se puede observar que después de un periodo  $T$ , sólo queda la mitad de los núcleos sin desintegrar.

**Figura 3**

*Curva de desintegración de un elemento radiactivo*



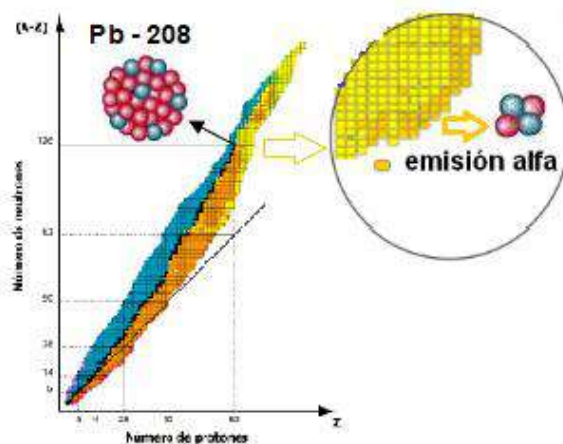
Extraída de Tipler & Mosca (2005)

## 2.1.5. Tipos de desintegraciones radiactivas

### 2.1.5.1 Desintegración Alfa ( $\alpha$ )

La desintegración alfa es una propiedad que poseen los núcleos de los elementos pesados, es decir; aquellos cuyo número másico es mayor a  $Z > 83$ . La figura 4, muestra la región en la que se hallan los núcleos pesados que emiten una partícula alfa.



**Figura 4***Desintegración alfa*

Adaptado de web <https://cbrn.es/>

Cuando un núcleo pesado (padre) X se desintegra espontáneamente, éste emite una partícula alfa cargada positivamente, transmutando a un nuevo núcleo (hijo) Y, con un número atómico Z menor en dos y un número másico A menor en cuatro, que el padre.



Aplicando esta última ecuación al radio Ra - 226, éste se desintegra en radón Rn -222 y una partícula alfa:



Rutherford, determinó que la carga de las partículas alfa era positiva y dos veces la carga fundamental, mientras que la masa en reposo de estas partículas alcanzaba un valor de  $6.646 \times 10^{-27}$  kg, estos resultados condujeron a Rutherford a concluir que las partículas alfa eran núcleos de helio, compuestas por dos protones y dos neutrones (Aramburu y Bisbal, 2009).

Las partículas alfa que provienen de fuentes radiactivas naturales poseen energías comprendidas entre 4 MeV y 9 MeV y en general las partículas alfa, se caracterizan por tener poca capacidad para penetrar la materia, sin embargo, en el aire, una partícula alfa de 5 MeV de energía puede desplazarse hasta los 3,6 cm aproximadamente (Calzada y Cerecetto, 2019; Hernández, 2016).

### **2.1.5.2 Desintegración Beta ( $\beta$ )**

La desintegración beta ocurre cuando un neutrón se desintegra en un protón y emite un electrón, es característica de núcleos que tienen neutrones en exceso o defecto. En este proceso, el núcleo padre se desintegra espontáneamente en el núcleo hijo quien mantendrá el número másico del padre y su número atómico será mayor en uno que el del padre. Las partículas beta (+e y -e) en comparación a las partículas alfa, tienen mayor capacidad para penetrar la materia, pueden ser detenidos por una placa de 1,5 mm de plomo (Aramburu & Bisbal, 2009).

### **2.1.5.3. Desintegración Gamma ( $\gamma$ )**

En esta desintegración el núcleo en estado excitado decae pasando a un estado de menor energía y emite un fotón de alta energía, luego de esta emisión el núcleo pierde energía, pero no cambia su identidad, es decir mantiene constante tanto su masa atómica y número atómico. Esta radiación tiene mayor capacidad para penetrar la materia comparada con las partículas alfa y beta, necesita de algunos centímetros de plomo para ser detenida (Aramburu & Bisbal, 2009).

**Tabla 2***Propiedades de las radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$* 

Nombre	Carga	Masa (u.m.a)	Penetración Relativa	Ionización relativa	Descripción
Partícula $\alpha$	+2	4	1	1000	ion
Partícula $\beta$	$\pm 1$	0.0055	100	100	Electrón - positrón
Partícula $\gamma$	0	0	1000	1	R.E.M (fotones, rayos x)

7

*Nota:* La tabla muestra que la partícula alfa es la más pesada y la más ionizante de las tres radiaciones. Datos extraídos de González & Rabin (2011).

### 2.1.6. Radiación

La radiación es la emisión de energía ya sea en forma de ondas electromagnéticas o como partículas atómicas y sub atómicas. Estas radiaciones pueden ser ionizantes y no ionizantes. Las radiaciones ionizantes están conformadas por partículas de alta frecuencia y corto alcance, algunas de ellas son: los protones, electrones ( $e^-$ ), positrones ( $e^+$ ), partículas alfa ( $\alpha$ ), neutrones, entre otras y ondas electromagnéticas que tienen una longitud de onda  $\lambda$  comprendida entre (0,01 – 10) nm, conocidos como rayos X y longitudes de onda más cortas (0.01- 0,3) pm conocidas como rayos gamma, como se muestra en la figura 5. Las radiaciones ionizantes se caracterizan porque al interactuar con la materia, son capaces de arrancar electrones ligados a sus átomos y romper los enlaces químicos produciendo cambios moleculares y como consecuencia modifican su naturaleza (CSN, 2012; González & Rabin, 2011; Tsoulfanidis & Landsberger, 2015).

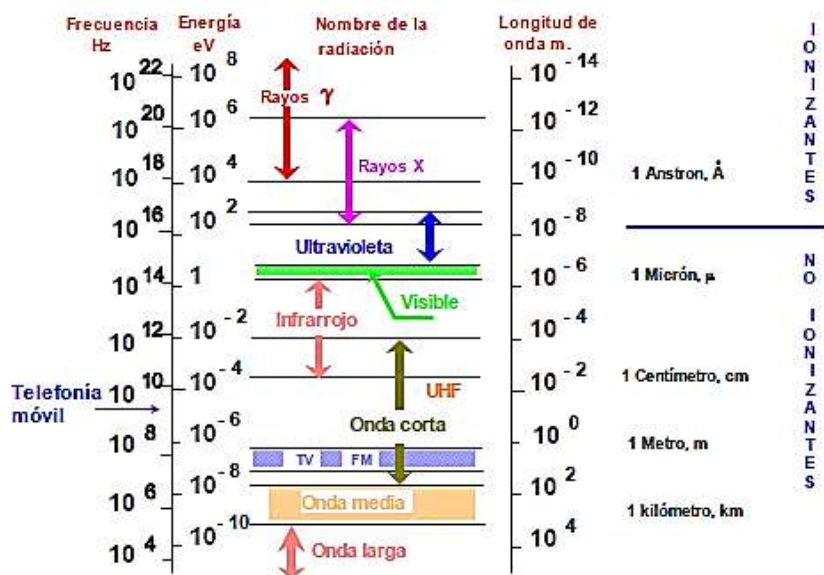
Las radiaciones ionizantes tienen origen natural: como el gas radón que emana de rocas de la corteza terrestre y la radiación procedente del espacio ultraterrestre. Están

presentes en los materiales radiactivos utilizados en actividades antropogénicas, como: en ensayos de armas nucleares, en la generación de la electricidad nuclear, en procedimientos, diagnóstico y exámenes médicos, entre otros (UNSCEAR, 2016).

La radiación no ionizante es radiación electromagnética que tiene una longitud de onda mayor a 10 nm, entre ellas están las ondas de radio, microondas, luz visible y luz ultravioleta (Aramburu & Bisbal, 2009).

**Figura 5**

*Radiación electromagnética*



*Nota.* La figura muestra a las radiaciones ionizantes con frecuencias mayores a  $10^{16}$  Hz, dentro del el espectro electromagnético. Extraído de CSN-2012

La exposición a cualquiera de estas radiaciones implica considerar medidas de protección de mayor o menor grado para la salud del hombre.

### 2.1.7 Fuentes Radiactivas

Las radiaciones ionizantes provienen de fuentes naturales como la radiación cósmica primaria que llega desde el espacio exterior, según Ferrer & Ros (2005) esta radiación está constituida en un 80% por protones y el 20% de helio y otros núcleos ionizados de elementos más pesados, que al incidir en la atmosfera se producen las cascadas hadrónicas que pueden llegar a tener una cantidad considerable de partículas secundarias, que interaccionan con otras partículas y desatan nuevas reacciones, hasta alcanzar la estabilidad.

Nazarooof & Nero (1988), La superficie de nuestro planeta es considerada también como una fuente de radiación, debido a que las rocas de la corteza terrestre presentan elementos traza producto de la desintegración radiactiva de tres primordiales radionucleidos como el uranio 238, uranio 235 y torio 232, elementos que se hallan en el suelo.

Otras fuentes de radiación de origen artificial se asocian a los procedimientos y diagnóstico médicos como en el uso de aceleradores de partículas que son fuentes de radioisótopos emisores de positrones de vida corta, utilizados en la tomografía por emisión de positrones (TEP) y las intervenciones terapéuticas; el material radiactivo usado en ensayos de armas nucleares, productos radio luminosos, detectores de humo (americio 241), varillas para soldar de tungsteno y torio, materiales de construcción, la producción de energía nuclear y los accidentes asociados como la central nuclear de Chernóbil (1986) y el de Japón Oriental a consecuencia del gran terremoto y el tsunami ocurrido el año 2011 (UNSCEAR, 2016).

Doce años después de ocurrido el accidente nuclear de Fukushima Daiichi, el 24 de agosto del 2023, el gobierno de Japón con la aprobación del Organismo Internacional de Energía Atómica (**OIEA**) da inicio al vertido gradual de más de 1,3 millones de toneladas de aguas residuales al océano Pacífico por aproximadamente 30 décadas, (Blume, 2023).

Este volumen de agua ahora contaminado con radionúclidos ha sido utilizado para enfriar los reactores nucleares dañados en el terremoto del 2011 y al ser vertidas al océano podría producir un gran impacto negativo para la salud humana y el medio ambiente.

La figura 6, muestra el diagrama que contiene los valores en porcentajes de la radiación natural y la artificial a la que estamos expuestos durante un año, en él se puede apreciar que la mayor contribución de radiación corresponde al gas radón.

## Figura 6

### *Fuentes de Radiación*



El gas radón es la fuente que más contribuye a la radiación natural.  
 Datos extraídos de González & Rabin (2011)

### 2.1.8 Interacción de la radiación con la materia

Es bien sabido que muchos materiales radiactivos se utilizan para mejorar la calidad de vida de la sociedad como los rayos X, descubierto por Roentgen en 1895, que permiten obtener imágenes de lesiones en huesos del esqueleto (en dosis bajas); la radiactividad del uranio, descubierto en 1896 por Becquerel y la del radio descubierto por Marie Curie en 1898, se utiliza con fines científicos y de tratamiento médicos. Así en radioterapia se hace uso de los rayos gamma, emisión de positrones, neutrones y otras radiaciones para diagnosticar y tratar el cáncer. En ingeniería, se emplean trazadores radiactivos como el yoduro de sodio I-131 en las operaciones de registro de pozos petroleros. El uranio se utiliza para generar electricidad, entre otros. El Tritio radiactivo está presente en señales informativas de tránsito ubicadas en las salidas de edificios, que brillan en la oscuridad. Hasta hace algunos años se instalaron detectores de humo en viviendas y edificios comerciales, detectores que funcionan bajo el principio de la ionización producida por placas de americio radiactivo al paso del aire – humo por las placas, este es ionizado y se crea una pequeña corriente eléctrica que activa la alarma.

Sin embargo, la exposición a esta radiación ionizante puede ser perjudicial para la salud de las personas (Cohen, I. M., & Furnari, J. C. 2012; Gallego, 2010; UNSCEAR, 2016).

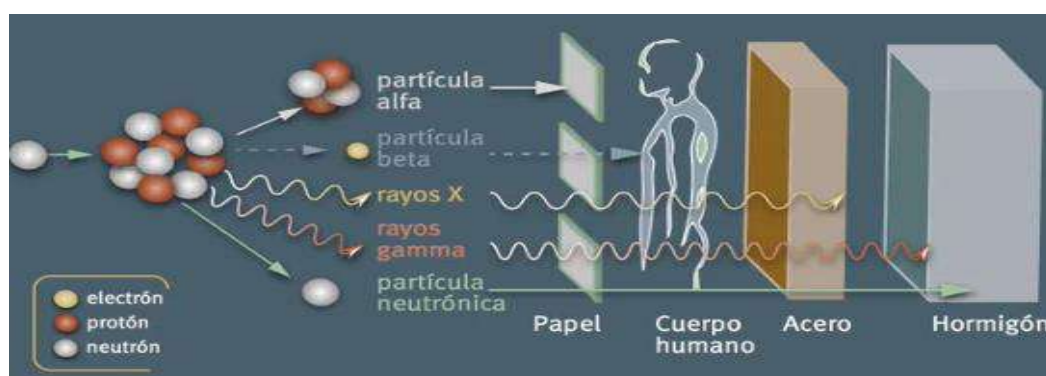
La capacidad de penetrar en la materia e interactuar con sus componentes, es una característica esencial de las radiaciones ionizantes.

De los tres tipos de radiaciones ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) las partículas alfa, poseen la mayor carga eléctrica ( $2e$ ), el doble de la carga que poseen las partículas beta ( $e$ ), de modo que, al penetrar en la materia y perder energía al interactuar con los átomos, la partícula alfa se detiene rápidamente, reduciéndose su poder de penetración. En cambio, las partículas beta al ser más ligeras en carga, son más penetrantes que la partícula alfa. La radiación gamma al ser una onda electromagnética es altamente penetrante (PNUMA, 2016).

La figura 7, muestra algunos materiales que pueden detener a las radiaciones alfa, beta y gamma.

### Figura 7

*Poder de penetración de algunas radiaciones ionizantes*



Fuente: PNUMA (2016, p. 9)

Becquerel encontró núcleos radiactivos de origen natural que emitían una o más radiaciones del tipo alfa ( $\alpha$ ) beta ( $\beta$ ) y Gamma ( $\gamma$ ) que al interactuar con los átomos del



medio ceden una parte o toda su energía por diferentes mecanismos de interacción. Estos mecanismos serían la causa por la cual se producirían cambios en la materia, particularmente el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA (2016) refiere que “la radiación puede producir efectos a nivel celular, causando su muerte o alteración, usualmente debido al daño directo sobre las cadenas de ácido desoxirribonucleico (ADN) en un cromosoma” (pág.13), afirmación que confirmaría que la radiación ionizante produce efectos biológicos en seres vivos (CSN, 2013).

Desde 1896, un año después del descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen y de la construcción de primer aparato de rayos X, se reportaron los primeros efectos biológicos producidos por la radiación ionizantes. Las observaciones de estos efectos fueron en trabajadores de minas de material radiactivo, trabajadores de centros de producción de energía nuclear, personas expuestas a la explosión de las bombas nucleares, pacientes que reciben radioterapia, entre otros (Parisi, 2004; UNSCEAR, 2016).

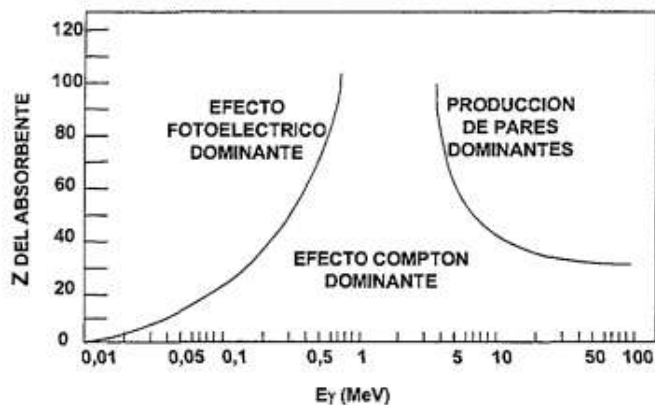
#### **2.1.8.1. Interacción gamma – materia**

Cuando un núcleo inestable queda excitado luego de emitir una partícula continúa emitiendo energía en forma de fotones. Si la energía de los fotones es  $E < 1 \text{ MeV}$  se llaman rayos X o *radiación gamma* si los fotones tienen energía  $E > 1 \text{ MeV}$ . Los fotones o rayos  $\gamma$  son partículas que viajan a la velocidad de la luz  $c$  y tienen masa y carga en reposo igual a cero, sin embargo, son muy penetrantes en la mayoría de los materiales. El mecanismo de interacción de la radiación electromagnética con la materia resulta de la superposición de tres procesos básicos e independientes (figura 8), como son: el

efecto fotoeléctrico, efecto Compton y la producción de pares (PNUMA, 2016; Nuclear, A. R., 1998)

### Figura 8

*Procesos de interacción de la radiación  $\gamma$  con la materia*

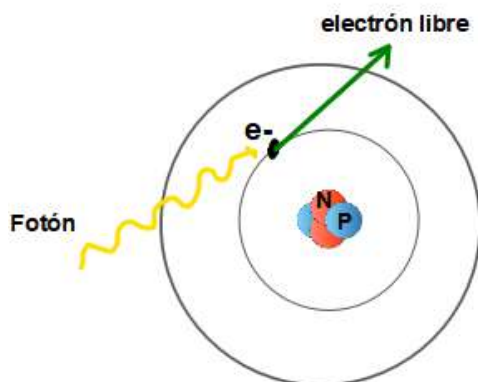


Extraído de Nuclear, A. R. (1998)

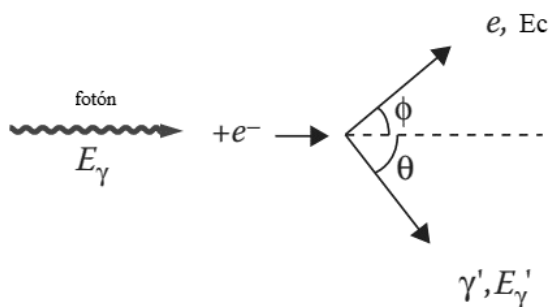
#### 2.1.8.1.1 Efecto fotoeléctrico

Esta interacción representada gráficamente en la figura 9, tiene lugar cuando un fotón de energía  $E_\gamma$  incide sobre un electrón orbital de un átomo del material, transfiriéndole toda su energía hasta que el electrón es liberado con gran energía cinética  $E_c$ , que es igual a la energía del fotón incidente menos la energía de ligadura del electrón  $\phi$ . El espacio dejado por el electrón liberado es ocupado por otro de una capa más externa al emitir un fotón X. Este tipo de interacción es fundamental para la obtención de imágenes radiológicas para las cuales las energías de las radiaciones incidentes sobre el tejido biológico deben ser menores a 100keV (Alcaraz, 2003; CSN, 2013; Tsoulfanidis, 1995).

$$E_c = E_f - \phi \quad (2.10)$$

**Figura 9****Efecto fotoeléctrico****2.1.8.1.2 Efecto Compton**

En este mecanismo de interacción, representado en la figura 10, el fotón incidente interactúa con un electrón que tiene una energía de enlace menor que la del fotón incidente, luego de la interacción el electrón se libera y es eyectado con gran energía cinética, en tanto que el fotón es dispersado. A diferencia del efecto fotoeléctrico el fotón no es absorbido por completo. Cuando la energía de la radiación es mayor a 100 keV, el fotón que no es absorbido por completo se dispersa enfrentando múltiples colisiones e ionizaciones en los átomos del tejido biológico e ionizándolos. La dispersión del fotón, en cuanto a seguridad radiológica es considerada como factor de riesgo de irradiación al que está expuesto principalmente el personal de radiología (Alcaraz, 2003; CSN, 2013; Tsoulfanidis, 1995).

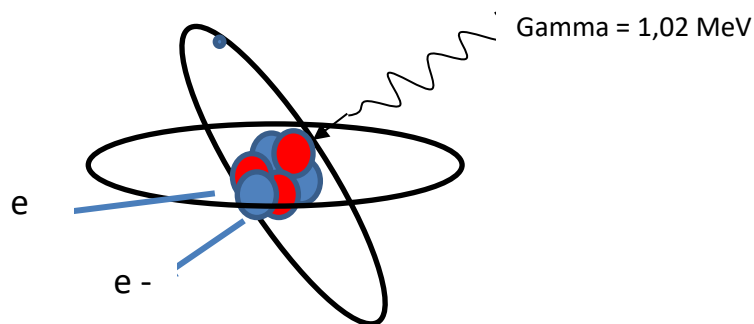
**Figura 10***Efecto Compton*

De la figura 10, se puede deducir que la energía  $E_\gamma$  del fotón incidente, es igual a la suma de la energía cinética  $E_c$  que adquiere el electrón y la energía del fotón dispersado,  $E_\gamma'$ , es decir:

$$E_\gamma = E_\gamma' + E_c \quad (2.11)$$

### 2.1.8.1.3 Producción de pares

La producción de pares, resulta de la interacción entre la radiación gamma (fotón) y un núcleo atómico (figura 11). Como resultado de la interacción, la radiación gamma desaparece y en su lugar aparece un par electrón-positrón, efecto conocido como la materialización de la energía. La creación de par electrón-positrón es posible cuando la energía de la radiación gamma es igual o superior a 1,02 MeV. Luego, el par producido se comportará como radiación ionizante directa. (L'Annunziata, 2012; CSN, 2013; Tsoufanidis, 1995).

**Figura 11***Proceso de formación de pares***2.1.8.2. Interacción Beta – materia**

Las partículas beta son electrones muy energéticos de carga negativa  $\beta^-$  o de carga positiva  $\beta^+$  llamado comúnmente positrón. Cuando las partículas beta inciden sobre un electrón atómico, éstas le transfieren una cantidad de energía suficiente para separarlo del átomo e ionizarlo, el espacio dejado por el electrón liberado es ocupado por otro electrón y se emite rayos X. Pero si la energía de las partículas beta no es suficiente para ionizar el átomo, dejan al electrón orbital en un estado de excitación que le permite pasar un nivel superior de energía, emitiendo radiación ultravioleta. Este tipo de interacción ocurre en mayor proporción con los electrones y en menor proporción con los núcleos de la materia, mediante la interacción de Coulomb (Calzada & Cerecetto, 2019; CSN, 2013; Tsoufanidis, 1995).

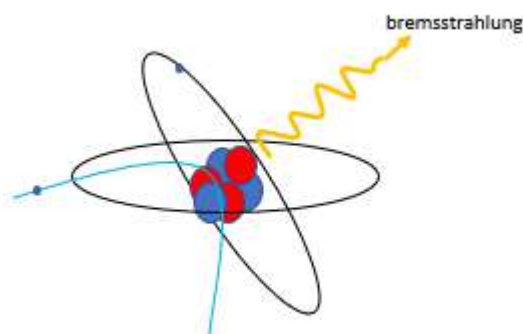
El paso de las partículas con carga a través de la materia implica una pérdida gradual de su energía cinética hasta detenerse, debido a que las partículas al colisionar con los electrones ligados les transfieren energía, provocando la ionización o excitación de los átomos del medio adsorbente y por lo tanto modificando su estructura electrónica. A estas colisiones que resultan en ionización o excitación se denominan colisiones inelásticas y a la pérdida de energía por unidad de longitud de una partícula en un

determinado medio, se le denomina “poder de frenado” (Calzada & Cerecetto, 2019; CSN, 2013; Tsoufanidis, 1995)

Cuando las partículas cargadas colisionan con el campo eléctrico del núcleo, como se muestra en la Figura 12, experimentan la acción de una fuerza que le varía repentinamente su velocidad haciendo que la partícula emita ondas electromagnéticas llamadas también radiación de frenado o Bremsstrahlung (Calzada & Cerecetto, 2019; CSN, 2013).

### Figura 12

*Radiación de frenado.*



Finalmente, la cantidad de energía cinética perdida por unidad de longitud de recorrido de las partículas cargadas al atravesar un medio, o poder de frenado, expresada por la ecuación (2.12), es la suma de la energía cinética pérdida de por ionización (en la colisión) y la energía pérdida de por radiación (Calzada & Cerecetto, 2019; CSN, 2013; Tsoufanidis, 1995)

$$-\frac{dEc}{dx} = -\left(\frac{dEc}{dx}\right)_{\text{colisión}} - \left(\frac{dEc}{dx}\right)_{\text{radiación}} \quad (2.12)$$

### **2.1.8.3 Interacción alfa – materia**

Cuando las partículas alfa ( $\alpha$ ) de carga positiva, gran masa y una energía que varía entre 4 MeV y 9 MeV, penetra en la materia, interacciona fundamentalmente con los electrones atómicos debido a su carga positiva, resultando esta interacción, principalmente en la ionización de la materia, pues se requiere apenas una energía del orden de los eV aproximadamente, para ionizar un átomo. Así en el aire, una partícula alfa requiere de 35 eV para extraer un electrón. Debido a que las partículas alfa son más masivas que los electrones con los que interactúan, la trayectoria que estas partículas describen cuando atraviesan la materia, es prácticamente rectilínea, puesto que después de la colisión la partícula es desviada un ángulo muy pequeño que no da lugar a una deflexión (L'Annunziata, 2012; Knoll, 2010; Tsoulfanidis, 2010).

### **2.1.9 Detección de la radiación ionizante**

Los detectores de la radiación ionizante responden de acuerdo a como interaccionan la radiación con la materia, produciendo una señal típica para cada partícula que se quiera detectar. Como ya se mencionó anteriormente, cuando la radiación atraviesa la materia produce diferentes efectos en ella, dentro de los cuales podemos mencionar la ionización, excitación y la disociación (CSN, 2009)

Existen dos tipos de detectores: activos y pasivos

### 2.1.9.1 Detectores Activos

Cuando la radiación ioniza la materia se tiene por resultado la producción de iones positivos como consecuencia de la liberación de electrones. Los electrones liberados a su vez formarán una corriente eléctrica cuya medida permitirá deducir la radiación que lo atraviesa. Los detectores que utilizan este principio de generación de corriente luego de la ionización son: la cámara de ionización, el contador proporcional, el detector Geiger Müller, entre otros (detectores gaseosos). El método utilizado por estos detectores, consiste en llenar con gas radón el volumen comprendido entre las placas de un condensador y cuando el radón se desintegra, los iones positivos y los electrones son atraídos por los electrodos de signos contrario para evitar la recombinación. La corriente producida es proporcional a la energía de las partículas detectadas y a la actividad de la fuente (CNS, 2009; Tsoulfanidis, 2010; OMS, 2015).

Si la radiación atraviesa ciertos sólidos transparentes, produce la excitación de una fracción de sus átomos, los cuales dejan de excitarse inmediatamente emitiendo fotones de cierta energía, que permitirá identificar a la radiación que provocó dicho efecto. La medida de la energía de los fotones emitidos, es el principio utilizado por los centelladores (orgánicos e inorgánicos), tubos fotomultiplicadores y detectores de termoluminiscencia para la detección de la radiación (CSN, 2009).

El efecto de la interacción de la radiación en los detectores arriba mencionados, en general, es la detección de carga eléctrica en el volumen del dispositivo, lo que permite clasificar a estos detectores incluyendo a los detectores de semiconductores, como detectores activos pues necesitan de una fuente de alimentación que suministre energía al sistema electrónico que detectará alguna o varias propiedades de la radiación ionizante mientras el detector es irradiado (CSN, 2009).



### 2.1.9.2 Detectores Pasivos

Los detectores que no necesitan de una fuente de alimentación, ni sistema electrónico que detectará alguna propiedad de la radiación ionizante, se denominan *detectores pasivos*, entre ellos se encuentran el detector de policarbonato CR-39 y el detector de nitrato de celulosa como el LR-115.

Estos detectores se caracterizan porque al ser expuestos a la radiación ionizante, las partículas al interactuar con la materia rompen enlaces químicos de la materia, efecto conocido como disociación CSN, (2009) produciendo daño o alteraciones en la estructura de la misma, dejando a su paso una huella nuclear o traza nuclear.

Estos detectores a diferencia de los activos, permiten una evaluación selectiva en campo, constituyen un registro permanente de los resultados de la interacción de la radiación con el detector, que se evidencia por el daño causado en él, debido al impacto de las partículas cargadas, daño conocido como traza o huella nuclear. Estos detectores pueden ser reevaluados en cualquier momento si fuera necesario y en comparación con los detectores activos, son de bajo costo.

### 2.1.10 Magnitudes y Unidades de medida

#### Magnitudes

Dosis absorbida: es la energía absorbida por unidad de masa de un medio o del tejido biológico. Se mide en Julio/kilogramo denominado Gray (Gy). no tiene en cuenta el tipo de radiación ionizante ni la sensibilidad al daño de los órganos (Soria, 2020).

Dosis equivalente: Es la dosis absorbida, que considera el tipo de daño que producen distintos tipos de radiaciones, se mide en Sievert (Sv) o en Julio/kilogramo.

Dosis efectiva: Es la dosis equivalente que considera la sensibilidad de distintos órganos y tejidos al tipo de radiación, se mide en Julio/kilogramo o Sievert (Sv) (Soria, 2020).

El límite de dosis efectiva ocupacional es de 20 mSv/año y límite de dosis efectiva público en general es hasta 1 mSv en un año (ICRP, 2007)

## Unidades

### Becquerel

Es la unidad que mide la actividad, en el sistema internacional

Un becquerel (1Bq) = 1 desintegración atómica / segundo.

También se utiliza la unidad llamadas Curie que es equivalente a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones /s (Soria, 2020)

## 2.2 Marco Teórico Conceptual

### 2.2.1 Radón

Denotado por **Rn-222**, es el elemento químico que contiene 86 protones en su núcleo y 136 neutrones, lo que le da al isótopo un número de masa de 222, pertenece a los gases nobles y no reacciona químicamente. Su densidad es de  $9,7 \text{ kg/m}^3$  a

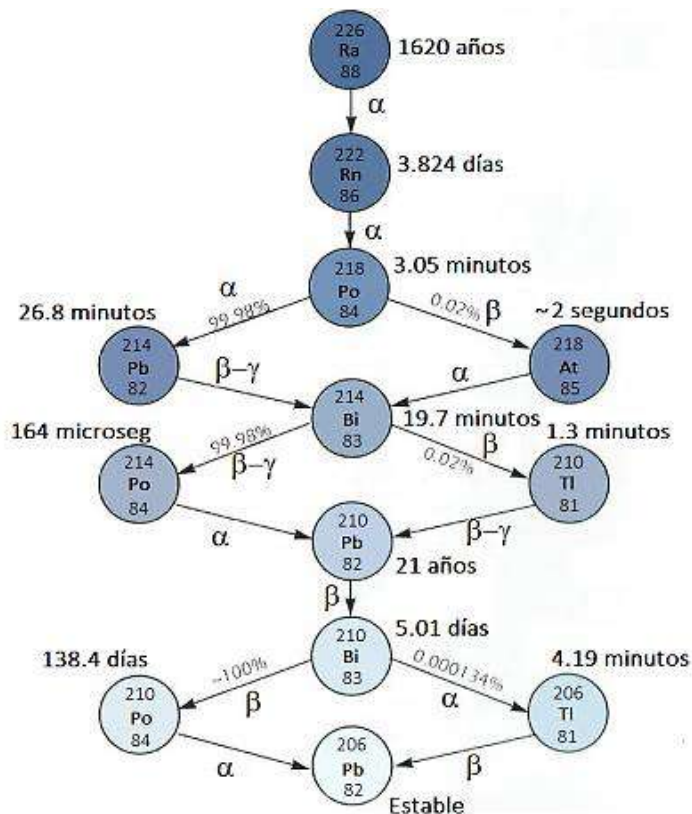
condiciones normales de presión y temperatura. Su punto de fusión es de 202 K y el punto de ebullición es de 211,3 K. Se trata de un gas radiactivo que emite partículas alfa que son núcleos de helio, con un periodo de 3,824 días de semidesintegración. Se caracteriza por ser un gas inodoro, incoloro e insípido (Magill, 2003).

Soria, (2020) menciona que “en un kilogramo de suelo se producen 40 átomos de  $^{222}\text{Rn/s}$ ” (pág. 149). El radón Rn – 222 es el isótopo con más presencia en la naturaleza y se caracteriza por ser emisor de partículas alfa.

Este gas es de origen natural y es parte del proceso de desintegración radiactiva del uranio U – 238, decae directamente del radio Ra – 226 por emisión alfa y es altamente radiactivo. La figura 13, muestra el decaimiento del radón a partir del radio 226, sus modos ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) acompañados de sus probabilidades y los periodos de semidesintegración de cada hija.

**Figura 13**

*Desintegración del gas radón y su progenie*



Extraído de Lastra, M. F. (2016)

Existen otros dos isótopos de radón también radiactivos y de fuente natural, el radón Rn-220 denominado torón, que pertenece a la serie radiactiva del torio Th- 232 y el radón Rn-219 conocido como actinón, que forma parte de serie radiactiva del uranio U-235. Debido a que sus periodos de desintegración son menores al del radón Rn-222 habitualmente no se les toma en cuenta. Estos isótopos del radón se encuentran en estado gaseoso en condiciones normales de presión y temperatura (Magill, 2003).

La naturaleza gaseosa y su vida media hacen que el radón pueda difundirse desde su fuente de origen (sustrato geológico) hacia la atmósfera, también se puede desplazar,

desde su origen, en aguas subterráneas hasta la superficie terrestre, debido a su gran solubilidad.

Los procesos de difusión y convección por los que se transporta el radón en el suelo tienen periodos de evolución muy superiores a los periodos de desintegración de los isótopos torón y actinón por lo que, la actividad de estos isótopos no se considera en absoluto al momento de evaluar la presencia del radón 222 en la atmósfera (Nazaroff, 1992).

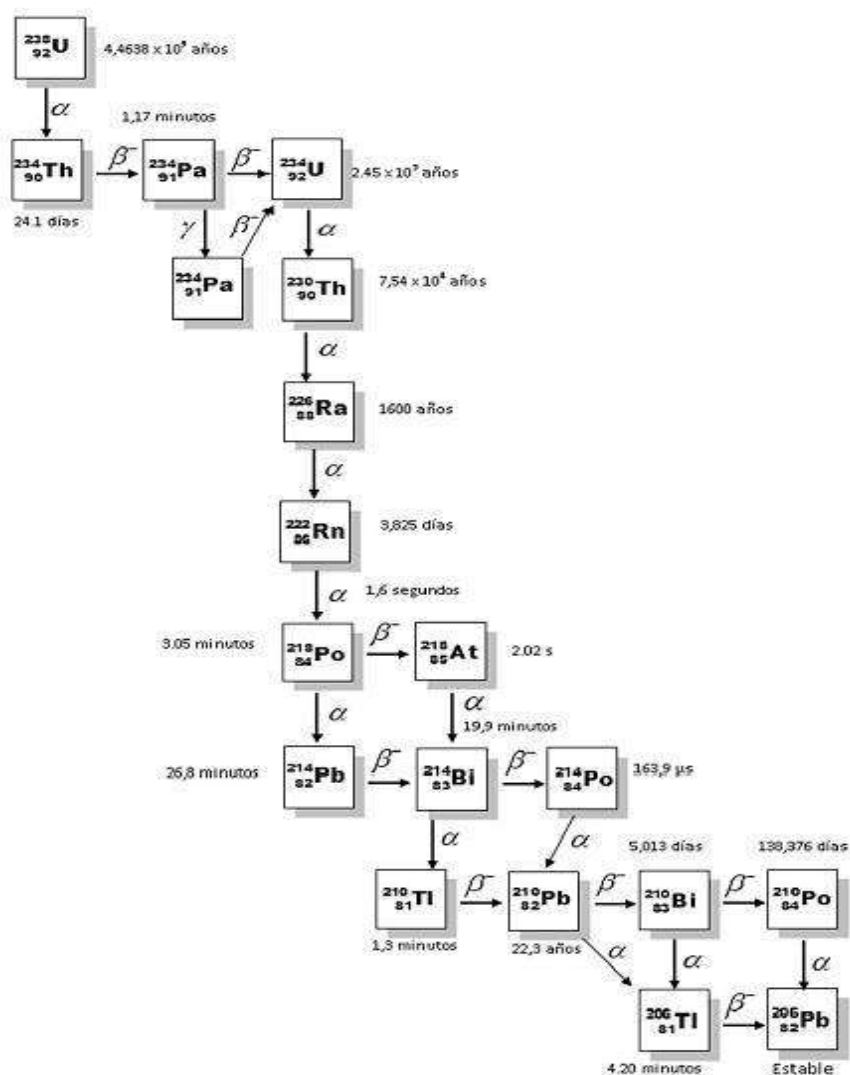
### **2.2.1.1 Fuentes de radón**

El uranio es fuente natural del radón y se halla en las rocas del suelo en distintas proporciones. De los tres isótopos de uranio: U- 238, U- 235 y U- 234, el isotopo U- 238 es el más abundante, pues de cada gramo de uranio natural el 99,285 % de la masa, es uranio U-238, el 0,71 % es uranio U- 235, y el 0,005 % restante es uranio U- 234, es un metal muy denso pero dúctil y maleable sin embargo no es buen conductor de la electricidad. Algunos minerales como la uraninita, la coffinita entre otros contienen altas concentraciones de uranio (Sánchez, 2001).

El uranio U-238 con una vida media de  $4,47 \times 10^9$  años, el uranio 235, con una vida media de  $7,04 \times 10^8$  años y el torio Th-232 con una vida media de  $1,41 \times 10^{10}$  años, son considerados como los padres de las tres cadenas de desintegración radiactiva natural existentes más importantes, debido a que sus periodos de semidesintegración son los más largos entre todos los elementos radiactivos y se hallan en equilibrio tanto en las rocas como en los suelos de la corteza terrestre en las que se concentran (CSN, 2012).

En la figura 14, se muestra la desintegración del uranio U- 238 en trece isótopos intermedios, dentro de los cuales se halla el radio Ra – 226 que se desintegra en el

isótopo Rn -222 de naturaleza gaseosa con una vida media de 3.84 días. El radón a su vez, se desintegra en otros elementos sólidos, así el uranio 238 alcanza la estabilidad al decaer en plomo Pb- 206.



Se muestran los productos de desintegración del uranio 238, y sus respectivos tiempos de vida media. Extraído de Hernández (2016).

Por su parte el uranio U- 235 se desintegra en 10 isótopos intermedios dentro de los cuales se halla al isótopo radón Rn-219, conocido como actinón, con una vida media de 3.92 s también de naturaleza gaseosa que a su vez se desintegra en otros elementos

sólidos. La desintegración del uranio 235 alcanza su estabilidad al decaer en plomo Pb – 207 (Magill, 2003).

Otra fuente de radón es el torio 232, que en su cadena de desintegración se halla al isótopo Rn -220 conocido como torón, con una semi vida (half-life) de 54.5 s. La cadena de desintegración del torio alcanza su estabilidad al decaer en plomo Pb-208. El uranio es químicamente activo tiene la capacidad de asociarse a otros elementos con los cuales se transporta (Magill, 2003; AIEA, 2023).

Instituciones internacionales como la OMS, AIEA, CSN, autores e investigadores sobre gas radón, coinciden en que las principales fuentes naturales del gas radón, considerado nocivo para nuestra salud, son: el suelo, materiales de construcción y agua.

### **2.2.1.2 Radón en suelo**

Los radionúclidos que se hallan en diferentes cantidades y tipos distribuidos en la corteza terrestre, son fuentes de exposición a la radiación natural para el hombre. La presencia de estos radionúclidos, tanto en variedad como en cantidad, depende fundamentalmente del tipo de suelo y rocas presentes en cada zona, es por ello que los niveles de radiación natural varían de un lugar geográfico a otro (Quindós, 2006).

Los suelos poseen dos fracciones de volumen principales: la fracción sólida y la fracción vacía. La fracción sólida se compone principalmente de granos minerales de diversos tamaños y una pequeña cantidad de materia orgánica. Mientras que la fracción vacía, se compone generalmente de gas, fracción comúnmente conocida como *porosidad*; sin embargo, si esta fracción de volumen está ocupado por agua entonces la fracción recibe el nombre de *contenido de humedad* (Vargas, 2009).

Por su naturaleza gaseosa y vida media suficientemente larga, el radón posee una gran movilidad al interior de los suelos, que le permite migrar por emanación, desde el lugar de su origen en la fracción sólida que posee minerales con contenido de radio, hacia la fracción vacía como poros, grietas y fisuras de la corteza terrestre por difusión molecular, que es un proceso de transporte del gas descrito por la ley de Fick. Esta ley sugiere que las moléculas del gas se transportan desde regiones de alta concentración de radón en el suelo a regiones de baja concentración de radón cerca de la superficie. Sin embargo, si la fracción de volumen está compuesta por agua, el transporte de radón se ve afectado desde la emanación, ya que el agua contenida en los poros impide en cierto grado el paso del radón hacia la atmosfera, pues el radón tiene la capacidad de disolverse en agua y a través de ella logra desplazarse unos pocos centímetros, en tanto que en terrenos secos el radón puede alcanzar a desplazarse varios metros antes que se desintegre. Finalmente, el radón alcanza la atmosfera (figura 15) mediante la exhalación (Appleton, 2012; Quindós, 2016).

### Figura 15

*Proceso de transporte del radón desde la fuente*

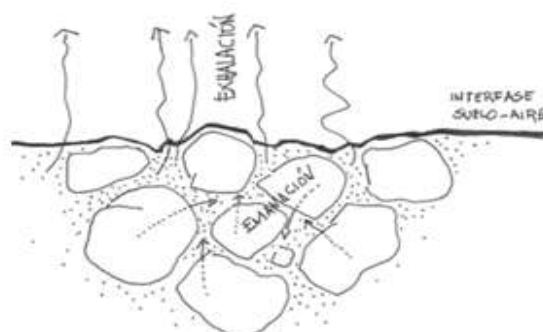


Imagen extraída de Frutos (2009)



### 2.2.1.3 Radón en la atmósfera

Cuando el radón exhalado por el suelo llega a la atmósfera, este se difunde rápidamente debido a la velocidad de los vientos, diferencias de presión y temperatura entre el suelo y aire. La concentración típica del gas radón en la atmósfera es del orden de  $10 \text{ Bq/m}^3$ , sin embargo, dependiendo de la porosidad y del contenido de cada terreno, esta concentración puede variar entre  $1 \text{ Bq/m}^3$  y  $100 \text{ Bq/m}^3$  (Hernández, 2016).

Villaverde L. (2018) sostiene que la acumulación del gas radón en ambientes cerrados depende de la variación de algunos parámetros meteorológicos principalmente de la presión atmosférica. Señala que en regiones ubicadas a mayor altura la exhalación del radón es mayor debido a la menor presión atmosférica.

La concentración del radón también está condicionada por variaciones estacionales, en épocas de lluvia la humedad del suelo impide la exhalación del radón a la atmósfera en cambio en época de secas el contenido de agua en los poros del suelo es muy bajo, se agrietan los suelos, por lo tanto, aumenta la exhalación del radón hacia la atmósfera (García Vindas, J. R., 2003; Villaverde L. 2018)

La presencia del gas radón en la atmósfera de espacios cerrados se ve incrementado, en menor proporción respecto al radón que exhala el suelo, por el radón que exhalan los materiales de construcción debido al contenido de radio que poseen. Radón que decae emitiendo una partícula alfa y un ion de polonio, plomo o bismuto que son metales pesados cargados positivamente, que interaccionan de inmediato con las moléculas del vapor de agua y de otros gases, asociándose a ellos para luego unirse a aerosoles suspendidos en el aire que respiramos (Espinosa, 2018; Frutos, 2009; Piedecausa et al., 2011)

#### **2.2.1.4 Radón en agua**

El gas radón es soluble en agua y su contenido en aguas subterráneas depende de la concentración de radio contenido en las rocas a través de las cuales fluye. Akerblom & Lindgren, (1997) mencionan que las aguas subterráneas que discurren en rocas sedimentarias presentan concentraciones de radón que varían entre 5 a 70 Bq/L (5 000 a 70 000 Bq/m<sup>3</sup>), en cambio, las aguas subterráneas en contacto con rocas ígneas, presentan mayores concentraciones de radón que varían de 50 a 500 Bq/L (50 000 a 500 000 Bq/m<sup>3</sup>). Sin embargo, estas concentraciones altas pueden disminuir a 2 Bq/L (2 000 Bq/m<sup>3</sup>) cuando las aguas subterráneas entran en contacto con las aguas superficiales, lo que permite liberar al radón a la atmósfera en poco tiempo.

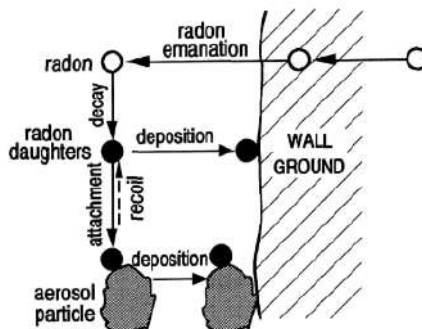
#### **2.2.1.5 Radón en materiales de construcción**

Zeeb & Shannoun, (2015) consideran que los materiales de construcción son otra fuente que emana gas radón al interior de las viviendas; sin embargo, no tan importante como es la infiltración de radón a través del suelo y que se concentra en el primer piso de las viviendas. Por ello, se recomienda a la industria realizar controles sobre la exhalación del radón en materiales de construcción que se extraen de rocas o terrenos que podrían contener radionúclidos o que derivan de subproductos de procesos industriales que contienen uranio U-238, torio Th-232 entre otros.

La figura 16, describe como el radón después de ser exhalado por las paredes, se desintegra en su progenie y a la vez ésta se deposita en las partículas suspendidas en la atmósfera, que serán el medio de transporte de los descendientes sólidos hasta ser inhalados o acumularse en superficies.

### Figura 16

*Esquema de liberación del radón y su progenie desde paredes*



Extraído de Durrani & Bull (2013)

Los materiales radiactivos que existen de forma natural, se denominan materiales NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) contienen y liberan radionucleidos que ponen en riesgo la salud principalmente de los trabajadores en la construcción y de población en general, que están expuestos a la radiación ionizante asociada al gas radón que exhalan estos materiales Durante la extracción y procesamiento físico o químico de productos como rocas y minerales de la corteza terrestre, los radionucleidos pueden distribuirse en diferentes proporciones en los diversos materiales que surgen del proceso. Estos productos NORM pueden aumentar significativamente la concentración de radionucleidos en nuestro ambiente y el aire que respiramos (Ishimori,2013; Osore, 2008).

Los productos NORM que pueden estar presentes en los materiales de construcción son minerales no metálicos como arenas, pizarras, calizas, arcillas, que se utilizan para la elaboración de ladrillos de concreto, ladrillos de arcilla, adobes, bloques de concreto, cerámicos, concreto utilizado para la construcción de cimientos, columnas, vigas, losas, pisos utilizados también para tarrajados, en mortero para asentar bloques para muros.

Minerales como el yeso (fosfoyesos) se utilizan para la elaboración de las paredes de yeso y para acabados. Algunas rocas que se extraen del suelo se utilizan para la construcción de cimientos, otras rocas se trituran para la elaboración del cemento y otras rocas se usan para la ornamentación, estas pueden ser mármoles, granitos y piedra laja, entre otros.

Ruano et al., (2014) menciona que los materiales de construcción contribuyen a la acumulación del gas radón, en espacios cerrados, a lo mucho entre el 15% a un 20% del total, según la cantidad de elementos radiactivos, como el radio y torio entre otros, que permanezcan en los materiales de construcción, después de su elaboración industrial.

Las tabla 3 y 4, muestran la actividad por kilogramo de radio y torio en algunos materiales de construcción, usados en Europa y en la costa central peruana, respectivamente.

**Tabla 3**

*Actividad por kilogramo de radio y torio en algunos materiales de construcción usados en Unión Europea*

<b>Material</b>	<b>Radio 226 (Bq/kg)</b>	<b>Torio 232 (Bq/kg)</b>
Concreto	40	30
Yeso natural	10	10
Ladrillos de arcilla roja	50	50
Piedras naturales de construcción	60	60
Fosfoyesos	390	20

Datos extraídos de EC-European Commission, (1999)

**Tabla 4**

*Actividad por kilogramo de radio y torio en algunos materiales de construcción usados en la costa central peruana*

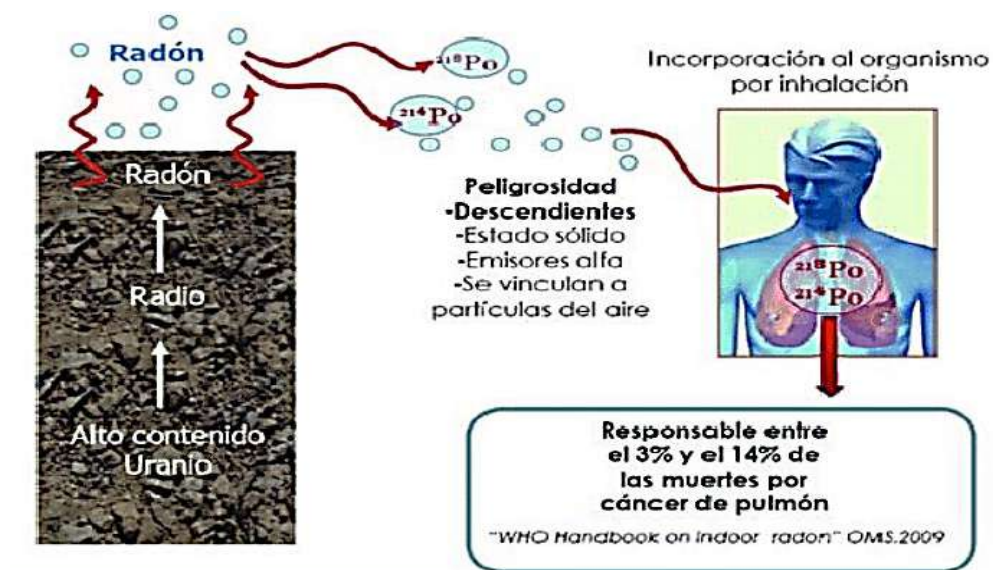
Material	Concentración de Actividad (Bq/kg)	
	Ra -226	Th 232
Cemento S	33.3	7.8
Cemento PR	42.5	10.8
Cemento A	31.8	7.8
Cemento PV	43.8	9.9
Cemento Y	30	9.5
Arena G	40.9	15.4
Arena F1	23.8	7.7
Arena F2	42.1	13.4
Yeso M	1.1	
Yeso L	1	
Concreto 1	44.4	19.6
Roca C	28.7	10.8
Ladrillo P8	60.6	21.4
Ladrillo P9	50.6	22.3

Datos extraídos de Liza, (2023)

#### **2.2.1.6 Efectos del radón en la salud**

La humanidad, desde su existencia ha estado expuesta a la radiación de fondo, que como ya se ha visto anteriormente, esta radiación es emitida por radioisótopos que se pueden hallar en el agua, aire, suelo, inclusive en algunos alimentos que consumimos.

La preocupación por la inhalación del gas radón radica en que este gas sirve como medio de transporte a sus descendientes, desde la roca madre ubicada en el suelo hacia el aire de las viviendas y lugares de trabajo. Una vez inhalado el radón éste continúa decayendo por emisión alfa en polonio Po-218, plomo Pb-214 que a su vez decae por emisión beta en bismuto Bi-214 y polonio Po-214 que son en partículas sólidas y metales pesados que se depositan en el tracto respiratorio (Figura 17) ionizando el medio en el que se hallan y como consecuencia deteriorando las células del epitelio pulmonar (CSN, 2013).

**Figura 17***Radón un peligro para la salud*

Fuente: CSN, (2013)

Según Aceña & Crespo, (1989) los descendientes del radón como el bismuto y polonio tienen la capacidad de vincularse a elementos en la sangre y ser transportados por ella desde el pulmón a todo del cuerpo, emitiendo partículas alfa en su proceso de desintegración hasta llegar a la estabilidad. Por tanto, la cantidad de energía depositada en el pulmón se atribuye a las partículas alfa, emitidas por los descendientes o hijas del radón, más que al propio radón inhalado, sin embargo; medir el radón es muy importante porque es un indicador de la presencia de su progenie.

La OMS, desde 1986 alerta sobre los riesgos de padecer cáncer de pulmón inducido por la inhalación del gas radón, riesgos que en 1993 se confirman al realizarse los primeros estudios epidemiológicos a trabajadores de minas de uranio subterránea. Estos estudios fueron realizados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (Aicardi et al., 2015; OMS, 2015; ICRP, 2010).

Ruano et al., (2014) afirmaron lo siguiente:

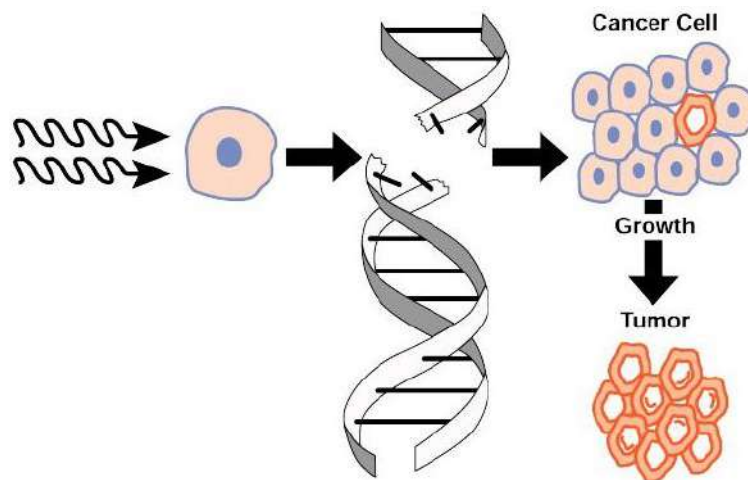
El *pooling study* europeo incluyó más de 7000 casos y 14.000 controles, y observó una relación lineal significativa entre la exposición al radón y el riesgo de cáncer de pulmón (un aumento lineal del 16% en el riesgo de cáncer de pulmón por cada 100 Bq/m<sup>3</sup> que aumentaba la exposición al radón residencial). El *pooling study* norteamericano, aunque con una muestra menor, obtuvo resultados similares. (pág. 439)

Razones más que obvias, por las que se debe evaluar la exposición al gas radón al interior de viviendas.

Los efectos biológicos causados por las radiaciones básicamente ocurren cuando al incidir la radiación sobre los organismos vivos, figura 18, las partículas cargadas positivamente a su paso por los tejidos, ionizan las moléculas de agua, que es abundante en el citoplasma celular, dando lugar a la producción de radicales libres que son reactivos químicamente y responsables de producir la ruptura de las macromoléculas como los ácidos nucleicos. Inclusive estas alteraciones en las moléculas pueden ocasionar el desarrollo anormal de las células, Rodríguez, (2016).

**Figura 18**

*Desarrollo de cáncer a partir de mutaciones producidas por radiaciones ionizantes*



Extraído de “A Portal to Earth Education Resource”, por Laura Gilstrap

[https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/health/case\\_studies/radiation\\_cance.html](https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/health/case_studies/radiation_cance.html)

La figura 19 muestra como la radiación ionizante a su paso por la célula es capaz de producir radicales libres responsables de la ruptura de macromoléculas como el ADN y su consecuente mutación de células que dan origen al cáncer.

Con el avance de la tecnología, el uso de radiación ionizante y la producción de radioisótopos por aceleradores nucleares y otros equipos de radio agnóstico en el campo de la medicina y la industria, constituyen una fuente de radiación artificial a la que también se expone la salud de la humanidad.



### **2.2.1.7 Medición del radón en aire**

El manual de la OMS (2015) sugiere realizar mediciones preliminares de radón en aire para identificar la presencia o no de éste en viviendas y espacios de trabajo. Para este propósito la OMS, recomienda utilizar inicialmente monitores continuos de radón, como la cámara iónica de electreto i/o el detector de carbón activo, estos detectores toman la muestra en un tiempo muy corto e indicaran si hay o no presencia del gas radón en viviendas y espacios de trabajo. Dado el caso, se sugieren realizar medidas de radón integradas a largo plazo, con detectores de trazas para partículas alfa (DTPA) expuestos a la radiación natural desde 1-12 meses. También se puede usar la cámara iónica de electreto (CIE) con un periodo de muestreo desde 5 días a un año o el monitor continuo de radón (MCR) con un periodo de muestreo desde una hora a 1 año, entre otros.

### **2.2.2 Trazas Nucleares**

Es el daño causado en un material al incidir sobre éste una partícula cargada.

#### **2.2.2.1 Detectores de trazas nucleares**

Son materiales capaces de registrar daños en su estructura, producto de la interacción con las partículas ionizantes. Estos daños ocurren cuando las partículas cargadas atraviesan el material, arrancan los electrones de las moléculas del material, y estos electrones liberados, forman los rayos delta que producirán una segunda ionización y excitación de las moléculas que las llevara a la ruptura de las mismas, evidenciando el daño producido en el material, conocido como “traza nuclear”. La formación de trazas ocurre en una región en la que se registra la mayor densidad de ionización, la que se lleva a cabo justo antes de que la partícula cargada se detenga en

su recorrido a través del material. De forma equivalente, se formará una traza, cuando el número de iones excede un cierto valor umbral que depende material del detector (Durrani, 1997).

Los detectores de trazas nucleares, pueden ser de nitrato de celulosa LR-115 y de carbonato de polialil-diglicol (CR-39).

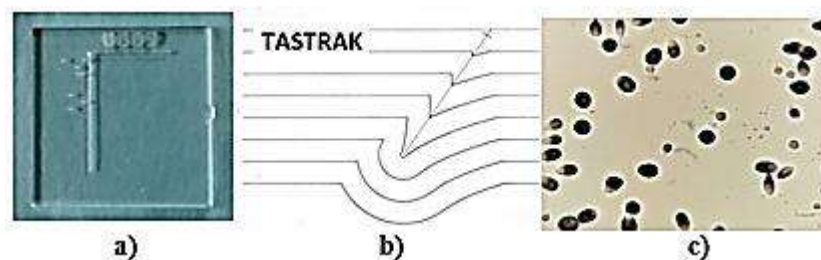
#### **2.2.2.1.1 Polímero CR – 39**

CR-39, "Columbia Resin #39", de TASTRAK utilizado en este estudio, su nombre químico: Polialil di glicol carbonato (PADC), es un plástico que se caracteriza por ser sensible a la detección de partículas alfa, protones con energías próximas 9 MeV y neutrones, es insensible a los rayos X,  $\gamma$  y partículas  $\beta$ . Su uso es sugerido en el manual de OMS, (2015) y en cámaras de difusión, constituye un método pasivo más fiable y de bajo costo para determinar las concentraciones de radón integradas en el tiempo. Su sensibilidad a la detección del radón 222 depende de las condiciones de grabado (Fleischer y Walker, 1965; TASTRAK, 2021; OMS, 2015).

Al incidir una partícula alfa sobre el detector de huellas CR -39, crea un rastro de daño a lo largo de su trayecto, dejando una huella latente invisible que luego de un ataque químico serán visibles ante un microscopio. La Figura 20 a) muestra el detector CR-39 utilizado en este estudio, b) describe crecimiento de la huella nuclear, en el proceso de grabado, por desgaste superficial del detector, a lo largo de la huella latente producida por la partícula alfa cuando atraviesa el material y c) muestra las trazas nucleares ya visibles bajo la lente de un microscopio óptico, con un aumento de 20X.

## Figura 19

*Formación de trazas en el detector CR-39*



### 2.2.2.1.2 Nitrato de Celulosa LR 115

Este detector es un polímero que posee una capa de nitrato de celulosa de  $12\mu\text{m}$  de espesor distribuida uniformemente sobre un poliéster de  $100\mu\text{m}$  de espesor. Este detector según las especificaciones técnicas del detector Kodalpha (GT Analytic) es sensible a la radiación alfa de energías comprendidas en el intervalo  $[0,8; 4,5]$  MeV. Al incidir la radiación sobre la superficie activa del detector, las partículas causan daños en la superficie, producidos por las interacciones antes explicadas, las trazas de daño dejadas en el material pueden ser observables al microscopio, posteriormente a un tratamiento químico que amplía el diámetro de las huellas desde  $1\mu\text{m}$  hasta  $15\mu\text{m}$ ., Kodalpha (GT Analytic).

### 2.2.2.2 Método de trazas nucleares en sólidos

El desarrollo de este método se documentó por primera vez en el artículo de Young publicado en Nature en 1958, en el que se señala que observó que los fragmentos de la fisión nuclear del uranio causaron daños (huellas) permanentes en cristales de fluoruro de litio, observables solo en microscopios electrónicos. En 1960 Fleischer, Price y Walker hallaron que las huellas dejadas por la radiación en estos cristales, vidrios, plásticos y minerales cristalinos, luego de ser sometidas a soluciones químicas

corrosivas, fueron químicamente más reactivos que los sitios no dañados, ampliándose sus dimensiones para ser observables bajo un microscopio óptico común.

El bajo costo, la simplicidad y la naturaleza específica de la respuesta de estos detectores de trazas nucleares en sólidos de siglas SSNTD , condujeron a su amplia difusión y aplicación a varios campos de investigación como: detección de radón ambiental, dosimetría personal, fechado geológico, contaminación ambiental, detección de uranio en mares, lagos y fuentes de agua, estudios para la predicción de terremotos, mapeo de Boro en rocas y minerales dosimetría biológica de iones pesados, entre otros (Saint Martín, 1999).

Rojas, et al., (2017) mencionan que estos detectores pasivos son ideales para el monitoreo de concentraciones de radón a gran escala y a largo plazo. En particular, el detector CR-39 contenido en cámaras de difusión constituye el procedimiento adecuado para determinar la concentración de radón bajo diferentes condiciones ambientales. Cuando el gas radón ingresa a la cámara de difusión lo hace atravesando membranas semipermeables o brechas estrechas de la cámara de difusión, que no permiten el paso del polvo y/o vapor de agua.

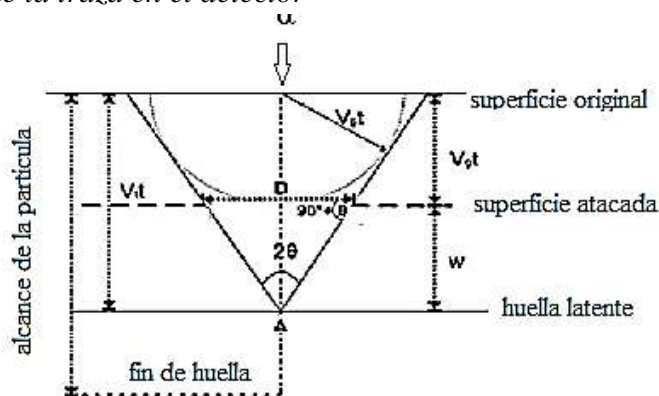
Las etapas del método de detección de trazas en sólidos (DTS) son a) Exposición a la radiación ionizante, b) tratamiento químico para el revelado de huellas latentes y c) caracterización y cuantificación de las trazas o huellas nucleares (Espinosa y Ángeles, 2018).

### 2.2.2.3 Formación de trazas nucleares en sólidos

Las trazas nucleares en sólidos únicamente pueden ser formadas por partículas altamente ionizantes, dentro de este grupo están consideradas las partículas alfa, que al incidir sobre la superficie del detector pierden su energía debido a la serie de interacciones que ocurren con los electrones del material del detector y muy raramente, cuando interactúan con los núcleos, dejando a su paso pequeñas trazas de daño en el material del orden de 3nm a 10 nm, conocidas como huellas latentes (Durrani y Bull, 2013).

En los plásticos, el daño por radiación produce la ruptura de las cadenas moleculares y radicales libres que al ser tratados con ciertos reactivos químicos degradan las regiones de daño a un ritmo mucho más alto que el material no dañado, formando agujeros hasta ser amplificadas a escala micrométrica para lograr una huella observable bajo un microscopio (Saint, 1999).

La figura 20, muestra la geometría de la traza latente, después del grabado químico que dejó una partícula alfa que incide perpendicularmente a la superficie del detector, siendo  $D$ , el diámetro de la traza revelada,  $v_{lt}$ , la longitud de la traza y  $v_{ot}$ , espesor de la superficie removida por desgaste químico en el tiempo de grabado " $t$ ".

**Figura 20***Formación de la traza en el detector*

Modificado de Aparicio, C., &amp; Zúñiga, A. (2005).

La formación de trazas nucleares inicia cuando las partículas alfa interactúan a través de la fuerza de Coulomb con los electrones de las órbitas de los átomos del material, generando a su vez dos efectos: excitar los electrones a niveles energéticos más altos o perder los electrones (ionizar); durante esta interacción, la partícula alfa transfiere energía a los electrones, generando cascadas de colisiones electrónicas (Rayos delta) que llevan consigo energía y carga negativa, desde el punto de su liberación, hasta distancias del orden de  $1\mu\text{m}$  (Durrani y Bull, 2013; Saint, 1999).

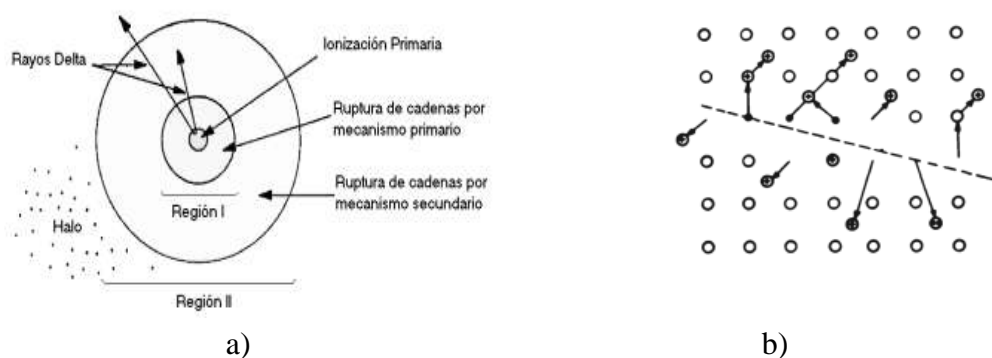
Cuando la partícula alfa ocasionalmente interactúa con los núcleos de los átomos del material les transfiere cantidad de movimiento y energía provocando la reubicación de los mismos en lugares diferentes a los que tenían en las cadenas moleculares. La deposición o transferencia de energía produce cascadas de colisiones atómicas debido a la fuerza de repulsión que se establece entre los iones positivos que han quedado a lo largo de la trayectoria de la partícula, el rango de esta cascada es del orden de  $0.01\mu\text{m}$ , (Saint, 1999).

Particularmente, los polímeros son materiales orgánicos sensibles a la formación de trazas, debido a que sus cadenas moleculares están separadas por ligaduras químicas que pueden romperse transfiriéndoles energías (2 a 3 eV) menores a la energía de ionización, energía trasferida por la partícula alfa ionizante o trasferida por los rayos delta. Ambos casos contribuirían a la formación de la traza. (Durrani y Bull, 2013; Fleischer et al., 1965).

La figura 21 a), muestra la ionización y excitación primaria, ocurren cerca de la trayectoria del ion, mientras que la ionización y excitación secundaria se extienden a distancias radiales más grandes desde el núcleo de la traza.

### Figura 21

*Mecanismos para la formación de la traza*



- Muestra las regiones en las que ocurren la ionización y excitación primaria y secundaria. Extraído de Rigitano (1991).
- Formación de traza según el modelo de “punta de explosión iónica”. La ionización producida al paso de una partícula cargada es inestable debido a la fuerza de repulsión entre iones positivos. Extraído de Saint (1999).

En la figura 21 b, se muestra otro modelo que describe la formación de trazas en sólidos se denomina “punta de explosión iónica”, propuesto inicialmente por Fleischer, Price y Walker (1965), explica que la formación de la traza se debe a los desplazamientos de los iones, producto de la ionización primaria, a posiciones intersticiales en el material. Estos iones positivos se repelen mutuamente hasta ser finalmente neutralizados por los electrones libres del material (proceso de recombinación).

### 2.2.2.3.1 Poder de Frenado

Esta magnitud describe la pérdida de energía de las partículas cargadas por unidad de recorrido, cuando interactúan con la materia, fue propuesto por Bohr, modificado por Bethe considerando efectos cuánticos y finalmente modificado por Bloch, considerando aspectos relativistas (Espinosa, 2018).

Esta pérdida de energía o poder de frenado, se define por:

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_0 v^2} N \left[ \ln \frac{2m_0 v^2 W_{\max}}{I^2 (1 - \beta^2)} - 2\beta^2 - \delta - U \right] \quad (2.13)$$

Donde:

$(-dE/dx)$ , es la energía perdida por la partícula en la longitud  $dx$ , también conocida como transferencia lineal de energía (LET)

$z$  = es la carga eléctrica de la partícula incidente

$v$  = velocidad de la partícula

$\beta = v/c$

$m_0$  = la masa en reposo del electrón

$N$  = densidad de electrones



$I$  = potencial de excitación promedio de los electrones en el material.

$W_{\max}$  = valor máximo de transferencia de energía al electrón

$\delta$  = corrección por polarización

$U$  = toma en cuenta la no participación de los electrones internos en la colisión.

### 2.2.2.3.2 Poder de frenado másico

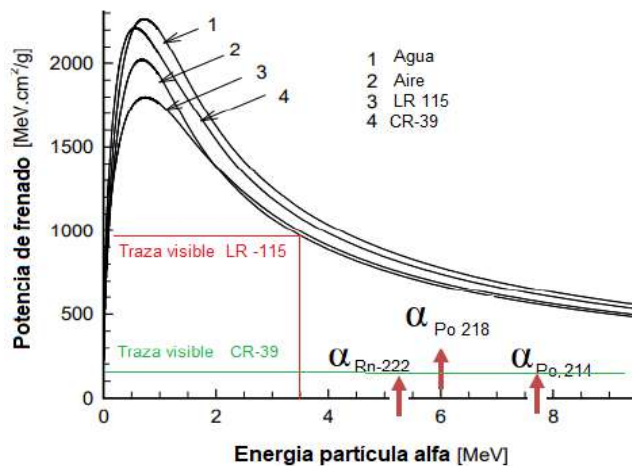
CSN, (2013) afirma que, “en muchos casos de interacción de partículas con la materia, existe una relación funcional con la densidad del medio” (pág. 13) por tanto, define a la magnitud denominada espesor másico, por:

$$X_M = X \cdot \rho, \text{ medido en: kg/m}^2 \quad (2.14)$$

Entonces, el poder de frenado másico expresado en  $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , se define como:

$$\left[ -\frac{dE}{dX_M} \right] = \left( \frac{1}{\rho} \right) \left[ \frac{dE}{dx} \right] \quad (2.15)$$

La figura 22. muestra el poder mínimo de frenado másico necesario para producir pistas latentes que se puede hacer visible por el grabado químico de los detectores CR-39 Makrofol y LR -115.

**Figura 22***Poder de frenado másico en DTS*Adaptado de Beck, T. R. ([www.bfs.de](http://www.bfs.de))

### 2.2.2.3.3 Alcance

Es la distancia máxima que logra desplazarse la partícula cargada cuando penetra en un medio absorbente. Para la partícula alfa, ésta distancia resulta ser igual a la longitud de la trayectoria rectilínea que describe mientras interactúan con los átomos y moléculas del medio que penetra. Mientras las partículas interactúan con la materia pierden gradualmente su energía hasta detenerse, capturando dos electrones del entorno, convirtiéndose en átomos de helio (Soria,2020; CSN, 2013).

Las partículas alfa a su paso por la materia colisionan con los electrones y núcleos de los átomos produciendo una ionización específica muy elevada justo antes de perder la totalidad de su energía, en un recorrido muy corto (PNUMA, 2016).

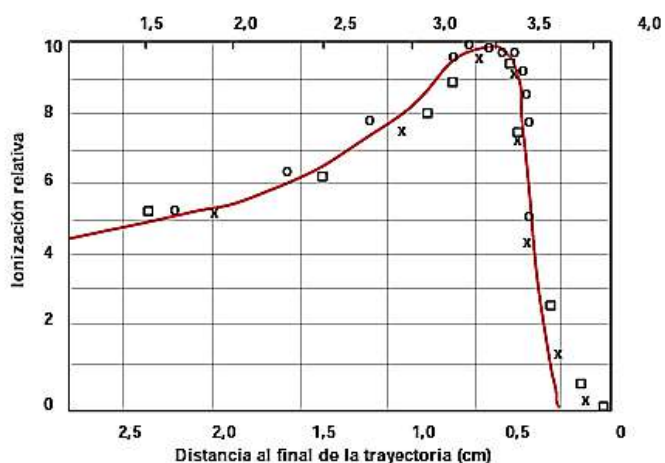
La tabla 5 muestra el alcance de las partículas alfa en el aire y en el detector CR-39

**Tabla 5***Alcance de las partículas alfa*

<i>Partícula alfa</i>	<i>Energía (MeV)</i>	<i>Vida media</i>	<i>Alcance en Aire(cm)</i>	<i>Alcance en CR-39(<math>\mu\text{m}</math>)</i>
Rn - 222	5,48	3.82 días	4,0	35,5
Po - 218	6,00	3.09 minutos	4,6	44,5
Po - 214	7,70	164.3 $\mu\text{s}$	6,9	65,6
Rn - 220	6,28	55,6 s	4,9	47,7
Po - 216	6,77	145 ms	5,6	43,6
Po - 212	8,78	300 ns	8,5	83,3

Datos extraídos de Durrani & Bull (2013)

La ionización específica en función de la distancia recorrida se representa mediante la Curva de Bragg, el pico se produce inmediatamente antes de que las partículas hallen el reposo, como se muestra en la figura 23.

**Figura 23***Curva de Bragg para la ionización específica de una partícula alfa*

Extraído de Ciemat - CSN (2013)

La figura 23, muestra el paso de una partícula de 7,68 MeV de energía a través de la materia y que al colisionar con la ella produce 2 200 pares, formados por un electrón y un ion, producto de la ionización en 1 mm de recorrido y esta cantidad de pares, se incrementa a medida que las partículas pierden energía. A tres centímetros de la fuente, la partícula alfa produce un aproximado de 7 000 pares/mm, para luego disminuir muy rápidamente hasta detenerse. (Soria, 2020; CSN, 2013; Tsoulfanidis, 2021).

### 2.2.3 Concentración de radón

El parámetro que se utiliza para la medir la acumulación del gas radón, es la actividad de la concentración del radón y su progenie C, que representa al número de desintegraciones que ocurren en cada segundo en un determinado volumen de aire y se mide en Bq/m<sup>3</sup> (Frutos, 2009).

Cada traza o huella nuclear hallada en los detectores pasivos, como el CR -39 y LR-115, es el registro del impacto de una partícula alfa emitida por el radón y su progenie, por lo tanto, la concentración de gas radón C, es directamente proporcional a la densidad de trazas “p” hallada en la superficie del detector después de haber sido expuesto a la radiación natural en un intervalo de tiempo. El intervalo de tiempo, puede ser de semanas o meses, dependiendo del lugar donde se realizará la medición y evitando la saturación de trazas en la superficie del detector

( Durrani y Bull, 2013; Eappen, K. P., & Mayya, Y. S., 2004)

En muchos casos, los detectores pasivos como el Cr- 39 y el LR -115 se colocan dentro de cámaras de difusión permeables al gas radón pero que evitan que el torón adherido a

partículas suspendidas ingrese al interior, de esta manera el detector podrá registrar solo la incidencia de las partículas alfa producto de la desintegración del radón y la de su progenie, que se hallan en el aire al interior de la cámara de difusión.

Por consiguiente, la concentración de gas radón se determina mediante la ecuación (2.16)

$$C \left( \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right) = \frac{(\rho - \rho_f) \frac{\text{tr}}{\text{cm}^2}}{F \left( \frac{\frac{\text{tr}}{\text{cm}^2}}{\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3 \text{h}}} \right) \cdot t_{\text{exp}}(h)} \quad (2.16)$$

Donde:

$\rho$ , es la densidad de trazas en el detector

$\rho_f$ , es la densidad de trazas de fondo del detector

F, es el factor de calibración

$t_{\text{exp}}$ , es el tiempo de exposición del detector a la radiación ionizante

#### 2.2.4 Radón en viviendas

Según el Organismo Internacional de Energía Atómica, de siglas AIEA, las concentraciones de radón en viviendas pueden presentar valores diferentes de país a país, debido a que sus distintas ubicaciones geográficas presentan diferentes climas. Esta variación en la concentración de radón también se puede presentar de vivienda a vivienda, debido a los distintos sistemas de ventilación y diferentes materiales utilizados en la construcción. La AIEA, OMS y otros organismos coinciden en que la principal fuente que contribuye a la concentración de radón en viviendas es el sustrato geológico sobre el cual se edifican las mismas, especialmente aquellos suelos que tienen un alto

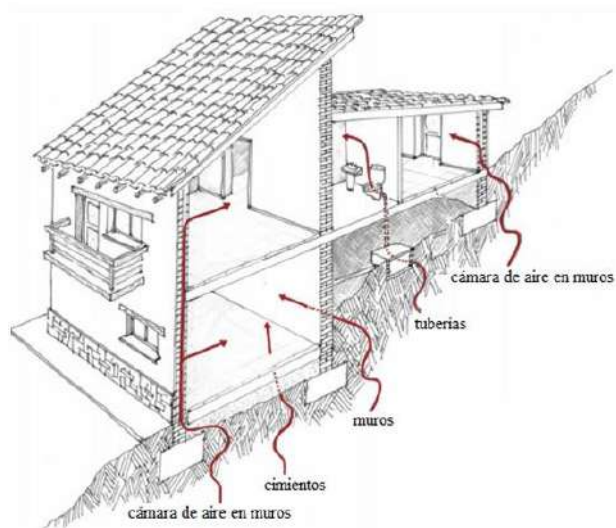
contenido de radio Ra-226 y sean permeables al radón (AIEA, 2013; Ruano et al., 2014; OMS, 2015).

El radón exhalado por el terreno, visto en el ítem 2.2.1.2, se puede concentrar en espacios cerrados y de poca ventilación, debido al flujo del aire que transporta al radón desde los poros del terreno, por los cuales se difunde el radón, hasta el interior de la vivienda, por diferencia de presión (Frutos, 2009; Hernández, 2016)).

El radón ingresa al interior de los edificios a través de grietas formadas en el cimiento o en las paredes en contacto con el terreno o a través de las perforaciones en muros i/o cimientos que se realizan para la instalación de tuberías, como se ve en la figura 24.

#### **Figura 24**

*Vías de acceso del gas radón al interior de las viviendas*



Extraído de CSN (2010)

Según el Manual Suizo del radón. (Oficina Federal Suiza de Salud Pública 2000), los niveles de concentración que se puede hallar en estos espacios, dependerán del

contenido de uranio o radio que tenga el terreno y también de la porosidad y permeabilidad que posea. La tabla 6, muestra el contenido de uranio y torio en diferentes rocas que pueden hallarse en el terreno sobre el cual se edifican las viviendas, en ella se puede apreciar que la mayor concentración de uranio y torio pertenece a las rocas Ígneas: Intrusivas y efusivas ácidas (granito) y a las rocas sedimentarias como la Lutitas, arcillas y pizarras (Nazaroff, 1992).

**Tabla 6**

*Uranio y torio presente en algunas rocas*

<b>Rocas</b>	<b>Uranio (ppm)</b>	<b>Torio (ppm)</b>
<b>Rocas Ígneas</b>		
Ultra básicas	0,02	0,1
Intrusivas y efusivas básicas	0,6	3
Intrusivas y efusivas intermedias	2	5
Intrusivas y efusivas ácidas (granito)	4,5	15
<b>Rocas sedimentarias</b>		
Arenitas y ruditas (areniscas, arcosas, grauvacas y conglomerados)	1.5	5
Lutitas, arcillas y pizarras	3.5	12
Precipitados (calizas, dolomías, sideritas)	2	3
Evaporitas (yesos y anhidritas)	0,1	0,2
<b>Rocas metamórficas</b>		
Cuarcitas, meta grauvacas y meta conglomerados	1,5	5
Mármoles y dolomitas cristalinas	0,5	1
Filitas, metargilitas, pizarras	2,5	10
Esquistos formados a partir de rocas ígneas	2	6

Nota. Extraído de Colmenero et al., (2004)

El *Boletín 138<sup>a</sup>*, que describe la geología de los suelos de la ciudad Cusco, Carl otto et al., (2011) menciona que “mayormente contiene areniscas feldespáticas (ígneas),

intercaladas con lutitas rojas, micro conglomerados, cuarcitas y areniscas”, andesitas y otras, que según la tabla 3, pueden contener uranio y torio.

## **2.3 Antecedentes empíricos de la investigación**

### **2.3.1 Antecedentes internacionales**

Poncela et al., (2008) escribieron el artículo científico intitulado *Radón interior en una región española con diferentes niveles de exposición gamma*. Publicada en la *Revista de radiactividad ambiental*, 99(10), 1544–1547.

El objetivo de esta investigación fue realizar mediciones de radón al interior de más de 100 viviendas en la región de Galicia tomando en cuenta el lecho rocoso sobre el cual se edificaron dichas viviendas, hallando valores comprendidos entre 45 y 130 Bq/m<sup>3</sup>. Para medir el radón en esta investigación se utilizaron el contador Geiger-Mueller.

La diferencia con la investigación presente radica en el método de medición de la concentración del radón.

Espinosa et al., (2013) escribieron el artículo científico intitulado *A study of indoor radon in greenhouses in México City, México*. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* publicado en *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*.

El objetivo de este estudio fue medir la concentración de radón en 12 invernaderos de diferentes ubicaciones en la ciudad de México, considerando al suelo como la principal y única fuente de radón en interiores. Para cumplir con los objetivos de la investigación se empleó el método de trazas nucleares en sólido y el detector CR- 39 Lantrack®. Los resultados hallados no superaron el límite de 100 Bq/m<sup>3</sup> ni se halló variaciones estacionales.



La diferencia con la investigación presente radica en el lugar de medición.

Villalba et al., (2020) escribieron el artículo científico intitulado *Study of Radon concentrations in a single-family home and their relationship with the ventilation sistema* publicado en la Revista de la Construcción Scielo-Chile. El propósito de este artículo fue de determinar la concentración de radón en diferentes espacios de la vivienda unifamiliar en la localidad de Dudar ubicada al sur de España. En esta investigación se destaca la importancia del sistema de ventilación de la vivienda ante la acumulación del radón. Para medir el radón se utilizó el monitor activo SARAD radón-Scout (alemán). Los resultados hallados en los diferentes espacios de la vivienda se encuentran por debajo del límite de  $300 \text{ Bq/m}^3$  establecido por la norma EURATOM, excepto en el sótano.

La diferencia con la investigación presente radica en el método empleado para medir la concentración del radón.

Salinas et al., (2020) escribieron el artículo científico intitulado, “Niveles de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en oficina pública de Aldama, Chihuahua, México y grado de exposición al trabajador”, publicado por la revista científica - Scielo “Acta universitaria” de la Universidad de Guanajuato. El propósito de este estudio fue cuantificar la concentración de radón  $\text{Rn-222}$  en una oficina pública de Aldama usando el detector de gas radón Alpha Guard. Una de las conclusiones importante a la que llegó es que los niveles de radón se correlacionan con la temperatura, hallando que, en la época de invierno, los trabajadores están más expuestos al radón.

La diferencia con la investigación presente, radica en el método de medición de la concentración del radón.

Bezuidenhout, (2019), escribió el artículo “*Estimation of radon potential through measurement of uranium concentrations in granite geology*”, publicado en South African Journal of Science – Scielo. Este estudio tuvo como objetivo estudiar las concentraciones de radón en viviendas considerando el suelo en la provincia de Sudáfrica, Cabo occidental como la principal fuente de radón Rn-222. Los resultados de esta investigación muestran que aproximadamente el 6% de las casas en Paarl, las concentraciones de radón en interiores superan los 300 Bq/m<sup>3</sup>, valores que se correlacionan con el lecho rocoso de granito, que se caracteriza por contener radionúclidos en altas concentraciones. Las medidas de la concentración de radón se realizaron aplicando el método de centelleo líquido.

La diferencia con la investigación presente, radica en el método de medición de la concentración del radón.

### **2.3.2 Antecedentes nacionales**

Pereyra, (2023) presentó el artículo intitulado: *Mediciones de la concentración de radón 222 en ambientes interiores en Lima-Perú*. El artículo se presentó en la Pontificia Universidad Católica del Perú para optar al grado de Magíster en Física. El objetivo principal de esta investigación fue determinar las concentraciones de radón en viviendas de la provincia de lima utilizando el detector LR -115. Los resultados, hallados son menores 200 Bq/m<sup>3</sup> y se correlacionan con la geológica de la zona, los materiales de construcción y los sistemas de ventilación de las viviendas muestreadas.

La diferencia con la investigación presente, radica en el método de medición del radón.

Pillaca, (2019), desarrolló la tesis intitulada: “Medición de radón 222 en Lima Metropolitana utilizando tres tipos de monitores con detectores de trazas nucleares” La tesis se presentó en la Pontificia Universidad Católica del Perú para optar al grado de Magíster en Física. En esta investigación se evaluó la concentración de radón al interior de viviendas de Lima metropolitana usando el LR -115 contenido en diferentes cámaras de difusión y también en modo desnudo. Los resultados obtenidos se hallan por debajo de  $100 \text{ Bq/m}^3$  límite establecido por la OMS.

La diferencia con la investigación presente, radica en el método utilizado para medir la concentración del radón.

Vilcapoma, et al., (2019) escribieron el artículo científico intitulado: “Measurement of radon in soils of Lima City - Peru during the period 2016-2017”, publicado en Earth Sciences Research Journal. El objetivo de esta investigación es describir el comportamiento espacio - tiempo del gas radón en suelos de quince distritos de la ciudad de Lima, utilizando el detector de trazas LR-115. Los resultados de esta investigación muestran valores altos registrados en zona volcánicas y en período de máxima crecida de los ríos debido al fenómeno "El Niño Costero"

La diferencia con la investigación presente, radica en el método y lugar de medición del radón.

## **2.5 Identificación de variables e indicadores**

### **Variable independiente:**

Densidad de trazas nucleares.

**Variable dependiente**

Concentración de radón

**Indicadores**

1. La OMS propone a los países, establecer un nivel de referencia de  $100 \text{ Bq/m}^3$  que reduce los riesgos para la salud que implica exponerse al radón en interiores (OMS, 2015).
2. Según el Reglamento de Protección Radiológica de Perú, aprobada mediante D.S. N°009-97-EM del 20 de mayo de 1997, ANEXO IV, “El nivel de actuación para la exposición crónica de radón en viviendas es una concentración media anual de 200 a  $600 \text{ Bq/m}^3$  de Rn - 222 en el aire” (Montoya, M., & Mallaupoma, M. 2014, pág. 69).

**2.6 Operacionalización de variables**

Las variables del presente estudio se consignan en la tabla 7, siguiente:

**Tabla 7**

*Operacionalización de las variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable 1°: Densidad de trazas nucleares	Patrones finos de daño intenso en la escala atómica en los detectores de Cr -39 expuestos a la radiación ionizante natural proveniente del gas radón acumulado en viviendas	$\rho = \frac{\#trazas}{A}; \frac{tr}{cm^2}$ <p>ρ: densidad de trazas nucleares. A: área del campo de visión tr = incidencia de una partícula sobre el detector, producto de la desintegración radiactiva</p>	Forma Tamaño Incidencia	La desintegración radiactiva es un proceso espontáneo y estocástico (aleatorio y probabilístico) Se ajusta a la distribución de probabilidad de Poisson
Variable 2°: Concentración de radón	Desintegraciones nucleares por segundo en un volumen	$C_{Rn} = \frac{\rho}{F * t} \left[ \frac{Bq}{m^3} \right]$ <p>CRn = concentración de radón expresado en Becquerel/segundo. ρ: densidad de trazas nucleares. F: factor de Calibración t: tiempo medido en horas</p>	Viviendas de material noble. Viviendas de adobe Estación del año	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OMS: Nivel de referencia ideal hasta 100 Bq/m<sup>3</sup>, no debe superar 300 Bq/m<sup>3</sup></li> <li>• La concentración media anual radón - 222 en viviendas de 200 a 600 Bq/m<sup>3</sup> de radón-222 en el aire, es considerada como exposición crónica, según el Reglamento de Protección Radiológica, aprobada mediante D.S. N°009-97-EM(1997) de Perú.</li> </ul>

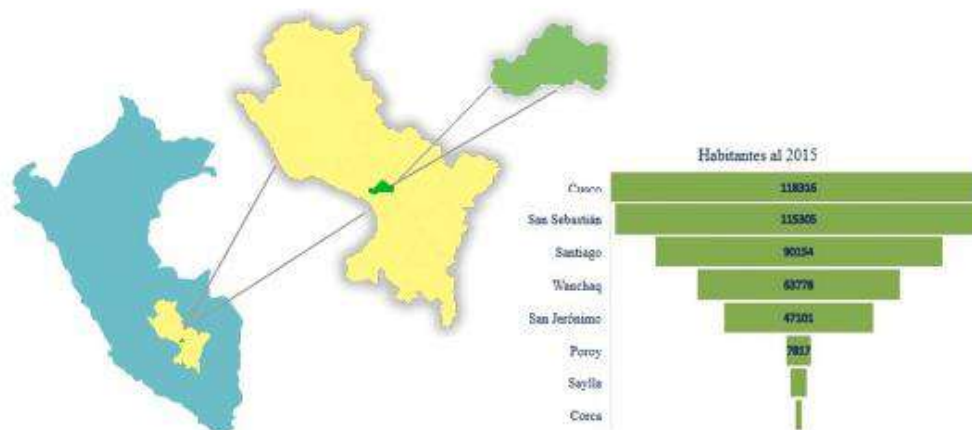
## CAPITULO III: METODOLOGÍA

### 3.1 **Ámbito de estudio: localización política y geográfica**

La ciudad del Cusco se ubica a 3250 m.s.n.m, tiene una extensión de 719 km<sup>2</sup>. Es una de las trece provincias de la región Cusco ubicada en la región sur oriental del Perú (INEI, 2018). La presente investigación se realizó en la zona urbana de la provincia del Cusco comprendida por los distritos: Cusco, San Sebastián, Santiago, Wánchaq y San Jerónimo. Los resultados del censo 2017, en la provincia del Cusco revelan que el 59,2% de la población pertenece al área urbana, el 53,9 % del total de las viviendas urbanas tienen paredes de ladrillo o bloque de cemento y el 45,12% tiene paredes de adobe (INEI, 2018).

#### **Figura 25**

*Ubicación de la ciudad del Cusco y número de habitantes por distrito*



Datos extraídos del INEI (2018)

La presión atmosférica registrada en la ciudad del Cusco al 2017 es 694.5 milibar, la altitud en la que se ubica la ciudad del Cusco define dos estaciones bien definidas: la estación de lluvias, que va desde septiembre hasta marzo y la estación de seca que va desde abril hasta agosto (Boulangger et al., 2019).

### 3.2 Tipo y nivel de investigación

Esta investigación ha seguido un enfoque cuantitativo del tipo **básico**, porque se orienta conocer las características radiológicas del aire al interior de las viviendas, midiendo la concentración de radón.

El nivel de esta investigación es **descriptivo** porque se mide la concentración de radón en aire al interior de las viviendas y **correlacional**, porque este resultado permite determinar si existe o no exposición por inhalación al gas radón.

### 3.3 Unidad de análisis

Está referida a cada una de las viviendas muestreadas que conforma el universo y que a través del muestreo han sido seleccionados para la presente investigación.

### 3.4 Población de estudio

Viviendas con paredes de ladrillo o bloque de cemento y adobe de los distritos de Santiago, Cusco, Wánchaq, San Sebastián y San Jerónimo.

### 3.5 Tamaño de Muestra

Se instaló 141 monitores de radón UNSAAC y 141 monitores de radón UNSAAC-PUCP proporcional a la densidad poblacional, como se muestra en la figura 26.

## Figura 26

*Distribución de detectores CR -39 y LR -115 en la ciudad del Cusco*



### 3.6 Técnicas de selección de muestra

La selección de la muestra es no probabilística, puesto que ha sido seleccionada a criterio del investigador. Se instalaron detectores de radón en los primeros pisos de las viviendas cuyos propietarios han accedido voluntariamente a participar del ensayo.

La muestra se ha adquirido, gracias a la participación voluntaria de aproximadamente 300 estudiantes de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, así como la colaboración de la administración del Museo Inca y Casa Concha al permitir colocar monitores en algunos ambientes específicos del sitio.

### 3.7 Técnicas de recolección de datos

#### 1) Análisis documental.

Esta técnica se empleó para recopilar información de fuentes documentales como libros, artículos científicos, tesis doctorales y de maestría, que se reportan en la bibliografía.



## 2) Encuestas.

Los habitantes de las viviendas otorgaron su consentimiento para registrar las características físicas de las viviendas y ubicación, datos importantes para el cumplimiento de los propósitos de nuestra investigación. El formato se adjunta en el ANEXO B.

## 3) Detección de trazas nucleares en sólidos.

En el presente estudio, se ha utilizado el método de **Detección de trazas nucleares en sólidos**, Este método consiste en cuantificar las huellas de impacto que dejaron las partículas alfa al incidir sobre la superficie del detector, que es sensible a esta radiación. Estas huellas tienen dimensiones que dependen de la masa y energía de la partícula que haya impactado en el detector y para hacerlas visibles bajo la lente de un microscopio, los detectores se someten a un tratamiento químico con soluciones básicas como el NaOH y KOH, que son reactivos en la zona de daño producido en el detector al paso de la partícula alfa (Fleischer y Walker, 1965; Durrani y Bull, 2013).

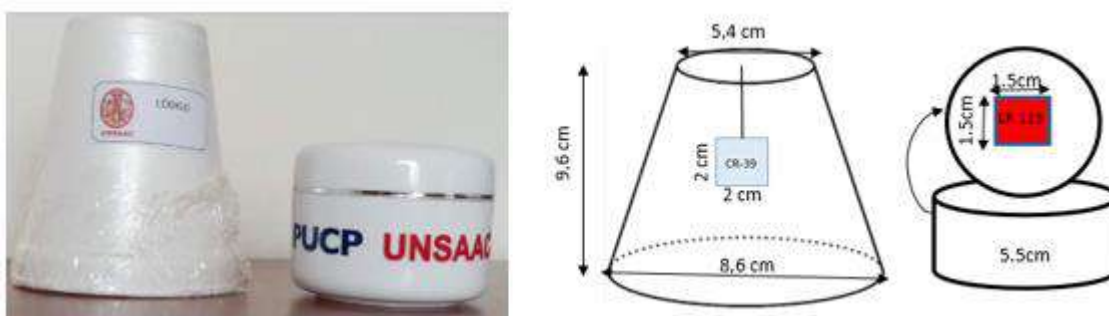
Para esta investigación se adquirieron detectores pasivos de policarbonato CR-39<sup>TM</sup> Tastrak que se caracteriza por ser sensible sólo a partículas alfa de energías comprendidas en un amplio rango de 0.3 MeV a 13 MeV y su sensibilidad a la detección del radón 222 dependerá de las condiciones de grabado y nitrato de celulosa LR-115 que detecta partículas alfa con un rango de energías desde 0,8 MeV y 4.5MeV Durrani & Ilic (1997).

Los detectores CR- 39 y LR -115 se colocaron al interior de una cámara cerrada permeable al radón. El radón ingresa a la cámara por difusión a través de membranas semipermeables o brechas estrechas del contenedor, con el objetivo de impedir la entrada de partículas suspendidas que puedan transportar el torón o las hijas del radón.

Los monitores utilizados, se denominaron: “UNSAAC “con el detector CR-39 y el monitor “G2 PUCP – UNSAAC” con el detector LR -115, el esquema de cada monitor se presenta en la figura 27.

### Figura 27

*Monitores de radón UNSAAC Y PUCP-UNSAAC*



El diseño de la cámara de difusión del monitor UNSAAC, se basa en el principio de funcionamiento de la cámara de difusión utilizada por Espinoza, (1994) y Durrani & Ilic (1997). La cámara de difusión es un vaso de poliestireno que tiene la forma geométrica de cono **truncado** dentro del cual se coloca el detector CR- 39 y se cubre con plástico de PVC (plástico film) que es permeable al radón e impermeable al polvo y otros aerosoles a los que puedan adherirse la progenie del radón. El monitor es estable frente a la condensación de humedad, efectos electrostáticos, fluctuaciones de

temperatura (Frank y Benton, 1982, Humar et al., 1982; Likes et al.,1979; Urban y Piesch, 1982, como se citó en Durrani & Ilic (1997).

El diseño de la cámara de difusión del monitor UNSAAC- PUCP que contiene el detector LR -115, presenta brechas estrechas (rosca de 4 pasos y 6 cm de diámetro) al paso del aire que impide la entrada de aerosoles a los que puedan adherirse el torón o las hijas del radón y minimizar la humedad.

Los monitores de radón se ubicaron al interior de los primeros niveles de las viviendas a una altura de 1,50 m medido desde el suelo y alejado de las paredes, por un tiempo de 90 días de exposición al radón Canoba et al., (2006). Al cabo de este tiempo se recogieron los detectores y fueron llevados al laboratorio para su correspondiente tratamiento químico.

#### **4) Revelado de trazas**

Para revelar las trazas latentes grabadas en los detectores del Cr -39 <sup>TM</sup>, empleados en este estudio, se utilizó una solución de NaOH 6.25 N contenido en vasos pírrex en los que se sumergieron los detectores, el conjunto fue colocado a baño maría al interior de un sistema termorregulado cerrado, por el tiempo de 6 horas manteniendo la temperatura constante de 75°C, como se aprecia en la figura 28.

**Figura 28**

*Revelado de detectores CR- 39 al interior del sistema termorregulado*



*Nota:* A la izquierda se muestra el arreglo de detectores para el revelado y a la derecha se muestra a los detectores Cr- 39 sumergidos en NaOH, al interior del sistema termorregulado.

Al cabo de las seis horas, se procede a retirar los detectores del recipiente para colocarlos en lunas de reloj y enjuagarlos de tres o cuatro veces cada uno con agua destilada, con el objetivo de retirar por completo los restos del hidróxido de sodio de la superficie de los detectores. Finalmente se dejan secar por 24 horas a temperatura ambiente.

Previamente al revelado de los detectores LR - 115, estos deben ser codificados para posteriormente registrar la densidad de huellas presentes en cada uno de ellos.

Para el revelado de las huellas latentes en los detectores LR-115, se utilizó hidróxido de sodio 2,5 N al 10% contenido en vasos pírex dentro de los cuales se sumergen los detectores, y se calientan en baño maría durante 90min. a la temperatura de 60 °C. Finalizado el tiempo de revelado, se procede a retirar los detectores de la solución, para su correspondiente enjuague.

Con ayuda de un sistema de agitación magnética de 300 rpm de frecuencia, se realiza el primer enjuague de los detectores sumergidos en agua destilada contenida en vasos

pírex por un tiempo aproximado de 20 min. El proceso se repite un par de veces más, hasta quitar de la superficie del detector restos de la solución de NaOH.

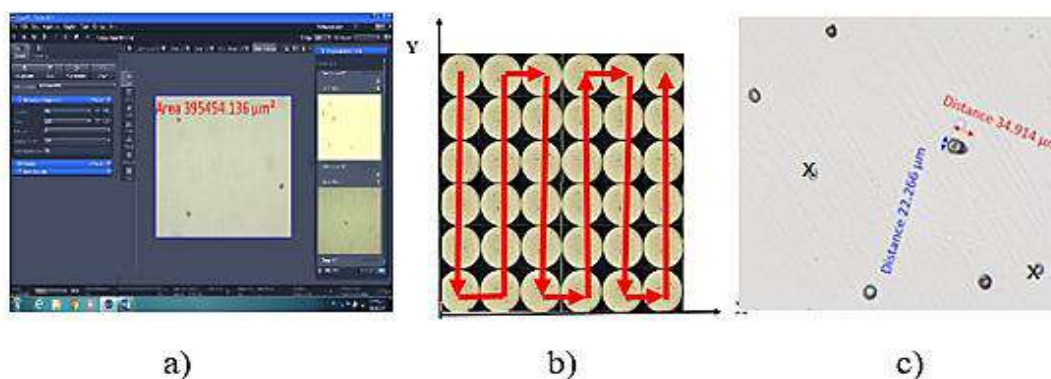
### 5) Procedimiento de lectura de detectores CR -39

Para cuantificar las huellas o trazas grabadas en el detector, se utilizó el microscopio Primo Tech -Zeiss y el software Zen-Lite del laboratorio de *radón Ambiental* de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, microscopio que permite capturar imágenes de las huellas recibidas a nivel microscópico, para caracterizarlas y cuantificarlas con ayuda del software Zen-Lite, constituyendo así una gran herramienta que también nos permite generar una base de datos.

Bajo una lente de 20x, se colocaron los detectores para caracterizar y contabilizar las trazas o huellas reveladas, explorando el detector como se muestra en la figura 29 y cuantificando las huellas de radón contenidas en cada uno de los 100 campos de visión de  $0.3954 \text{ mm}^2$  de área cada uno.

#### Figura 29

*Procedimiento de lectura y conteo de trazas nucleares*



La figura a) muestra la imagen adquirida por el software Zen Lite de un campo de lectura en el detector que contiene huellas nucleares, b) muestra el método de

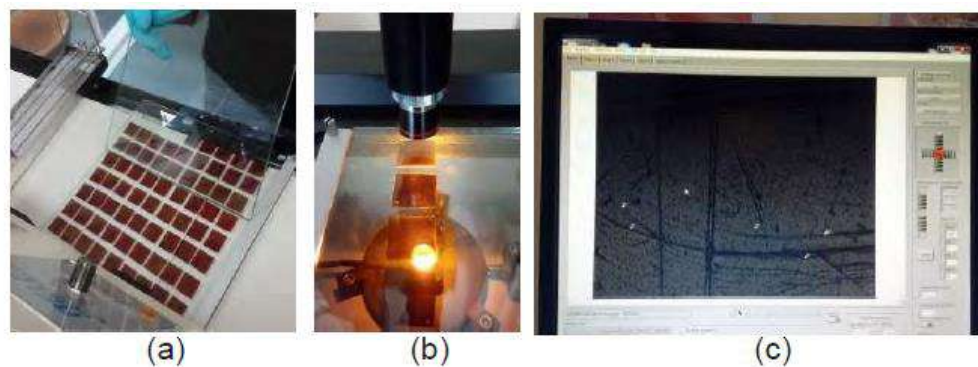
exploración de 100 campos de visión en el detector, bajo la lente del microscopio, c) La foto muestra las huellas de las partículas impresas en el detector.

#### 6) Procedimiento de lectura de detectores LR - 115

La identificación y cuantificación de las huellas grabadas en los detectores LR-115, se realizó mediante el sistema automático del equipo “Politrack” de la Pontificia Universidad Católica del Perú, descrito por Pillaca (2019). Este sistema automatizado permite escanear varios detectores y bajo ciertos parámetros detecta las huellas de radón en cada campo de lectura y las contabiliza (Pillaca, 2019).

#### Figura 30

*Proceso de lectura y conteo de trazas en el detector LR -115*



a) Arreglo de detectores LR -115 para su lectura con el Politrack, b) lectura de los detectores con cámara CCD, c) imagen de trazas nucleares en el detector LR -115

Extraído de Pillaca, C. J. G. (2019)

### 3.8 Técnicas de análisis de interpretación de la información

Con el número de trazas distribuidas en la unidad de superficie, halladas en los detectores expuestos al gas radón, se calcula la densidad de trazas ( $\rho$ ) que es directamente proporcional a la concentración de radón, **C**.

Antes de realizar los cálculos de las anteriores magnitudes mencionadas líneas arriba, es importante verificar si el total de huellas por unidad de área, se aproxima o está muy desviado de su valor medio, para ello se debe aplicar la prueba estadística de Chi cuadrado ( $\chi^2$ ), luego el número total de desintegraciones nucleares por unidad de tiempo o área se puede representar por una variable discreta y aleatoria con distribución de Poisson (Huertas y Hueso, 2008; Tsoufanidis, 2021; Burcham, W. E., 2020).

### 3.8.1 Prueba del Chi cuadrado: $\chi^2$

Debida a la naturaleza estadística del proceso de desintegración, hay variables que afectan a las cuentas por unidad de tiempo o de área y que tienden a hacer aumentar el error en la contabilidad de trazas. Para conocer la calidad de los datos experimentales aplicaremos la prueba del Chi cuadrado ( $\chi^2$ ), dada por la ecuación (4.1)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\bar{x}} \quad (4.1)$$

Donde:

$x_i$ , es el número de trazas contadas en el  $i$ -ésimo campo

$\bar{x}$ , el promedio de trazas por campo (UDELAS, s.f.)

Cuando a partir de una muestra de  $n$  datos o medidas se determina uno o más parámetros de la muestra, se debe comparar  $\chi^2$  con el número de grados de libertad, es decir se debe calcular  $\chi^2$  reducido (Huertas y Hueso, 2008).

definido por:

$$\chi^2_{\text{red}} = \frac{\chi^2}{\nu} \approx 1 \quad (4.2)$$

Tsoufanidis, (2010) bajo esta prueba si alguno de los datos es rechazado, es porque podría no haber uniformidad de la muestra, o si resulta que  $\chi^2$  es grande, una o dos medidas caen lejos del promedio. Estos resultados se denominan "valores atípicos".

En el presente estudio se ha realizado el conteo de huellas nucleares grabadas en la superficie de los detectores ya revelados, contenidas en un total de 100 campos de visión tomadas al azar. El conteo total de trazas por detector, proporciona aproximadamente el número de partículas alfa incidentes en un área de  $0,003954 \text{ cm}^2$  del detector. A este total se le restan las huellas nucleares de la radiación de fondo que tenían en promedio los detectores.

La técnica aplicada en el presente estudio no está exenta de incertidumbre en la contabilidad de las trazas ya que, en el proceso, se escogen al azar áreas para determinar la densidad de trazas presentes en cada detector, trazas que no se distribuyen de manera homogénea en la superficie del detector puesto que ellas son la manifestación de un proceso del decaimiento radiactivo que tiene naturaleza aleatoria y probabilística.

Por lo tanto, con el objetivo de lograr una data confiable, el conjunto de trazas contabilizadas por unidad de área ha sido sometido al algoritmo del criterio de Chauvenet para eliminar datos llamados atípicos.



### 3.8.2 Criterio de Chauvenet

Este criterio se utiliza para descartar las medidas estadísticamente no representativas, en nuestro caso algunas de las trazas contabilizadas podrían no ser estadísticamente representativas.

Este criterio establece que un valor medido  $x_i$  debe ser eliminado si el valor de  $r$  calculado en la ecuación (4.3) es mayor que el valor de  $R_c$ , que se halla en el ANEXO B, tabulado para el criterio de Chauvenet (Barrios et al., 2016).

$$r = \frac{|x_i - \bar{x}|}{\sigma} \quad (4.3)$$

Siendo:

- $x_i$ , valor del dato a evaluar
- $\bar{x}$ , media del conjunto de todos los datos
- $\sigma$ , desviación estándar del conjunto

### 3.8.3 Distribución de probabilidad de Poisson.

Tsoufanidis, (2010) menciona que la desintegración nuclear obedece a las reglas de la teoría cuántica, por lo tanto, no se puede predecir en qué momento un núcleo se desintegrará emitiendo una partícula, sin embargo, se puede describir el comportamiento de un número mayor de núcleos mediante la distribución de probabilidad de Poisson.

La probabilidad de obtener un determinado número de desintegraciones  $x$ , registrado en la superficie del detector, dada la media  $\mu$ , se define por:

$$P_{\mu}(x) = \frac{\mu^x}{x!} e^{-\mu} \quad , \quad \text{para } x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (4.4)$$

Con una condición de normalización

$$\sum_{x=0}^{\infty} P_{\mu}(x) = 1 \quad (4.5)$$

Y una desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\mu} \quad (4.6)$$

Siendo el error de la media:

$$\sigma_{\mu} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.7)$$

Con:

$\sigma$ , la desviación estándar

$N$ , el número de medidas

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Procesamiento, análisis, interpretación y discusión de resultados

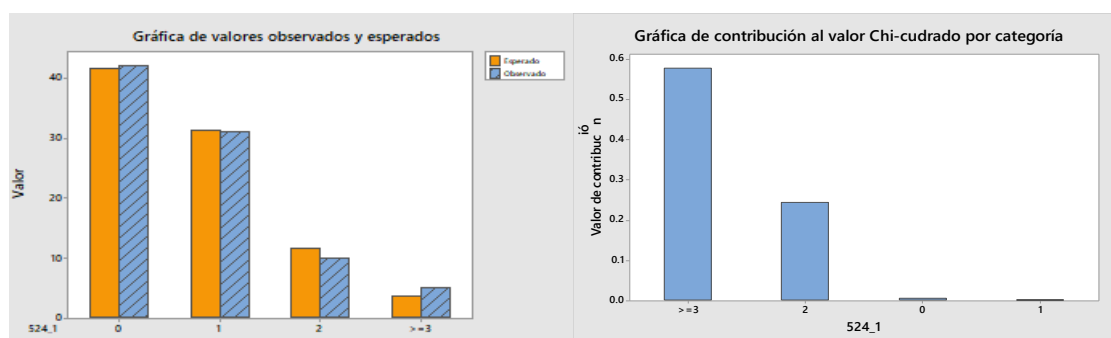
Se instalaron un total de 141 detectores Cr -39 y LR-115 instalados en dos etapas; la primera etapa corresponde a los meses de diciembre y enero y en la segunda etapa a los meses de febrero y marzo. Periodo de cuatro meses correspondiente a la época de lluvias en la región. Y un conjunto de 79 detectores instalados en la época de ausencia de lluvias comprendida entre los meses de junio a setiembre (Curie, et al., 2022).

Luego de la lectura de las trazas halladas en cada detector, se procedió a determinar los valores atípicos o llamados “outlier” asociados al proceso de conteo de trazas nucleares en cada campo de visión bajo el criterio de Chauvenet, los mismos que fueron retirados con el fin de tener una data más confiable y que se ajuste a la distribución de probabilidad de Poisson, que caracteriza a las desintegraciones nucleares (Huertas y Hueso, 2008)

La figura 31, muestra que los valores esperados del número de huellas son muy próximos a los valores observados, lo que demuestra que la contabilidad de huellas en los detectores, se ajusta a la distribución de Poisson.

#### Figura 31

*Valores observados de número de huellas versus esperados y su contribución Chi -2*



En base a los datos, libres de valores atípicos, se procedió a calcular la densidad de trazas  $\rho$  en cada detector, expresado en Trazas/cm<sup>2</sup> y su respectiva incertidumbre mediante la ecuación,

$$\rho = \frac{N \pm \sqrt{N}}{A} \quad (5.1)$$

$\rho$ : la densidad de trazas expresado en tr/cm<sup>2</sup>

N = número de trazas representativas

A: el área de campo de visión 0.00395 cm<sup>2</sup>

A esta cantidad se le restó la densidad de trazas media de fondo de un total de 10 detectores Cr -39 y diez de LR-115, que no fueron expuestos a la radiación, más al contrario, fueron envueltos en papel aluminio y almacenados en bolsas de cierre hermético. Posteriormente fueron revelados con la misma técnica descrita en el ítem 4.6 para determinar las trazas de fondo que presentaba cada detector.

Luego se procedió a determinar la concentración de radón mediante la ecuación (5.2)

$$C = \left[ \frac{\rho}{(F_c \cdot t_{exp.})} \right] \quad (5.2)$$

Siendo:

C, la concentración de radón, medido en Bq/m<sup>3</sup>

$\rho$ , la densidad de trazas, medido en tz/cm<sup>2</sup>

F<sub>c</sub>, el Factor de calibración expresado en tz/cm<sup>2</sup>/KBq/m<sup>3</sup>h, ANEXO D

t<sub>exp</sub>, tiempo de exposición

La incertidumbre fue calculada por la ecuación:

$$\Delta C = \sqrt{\left[\left(\frac{1000 \Delta T}{A.F_c.t_{exp}}\right)^2 + \left(\frac{1000 \Delta T_{fondo}}{A.F_c.t_{exp}}\right)^2 + \left(\frac{1000(\Delta T - \Delta T_{fondo})\Delta F_c}{A.F_c^2.t_{exp}}\right)^2\right]} \quad (5.3)$$

Siendo:

$\Delta T$ , error de las trazas en el detector expuesto

$\Delta T_{fondo}$ , error en trazas de fondo

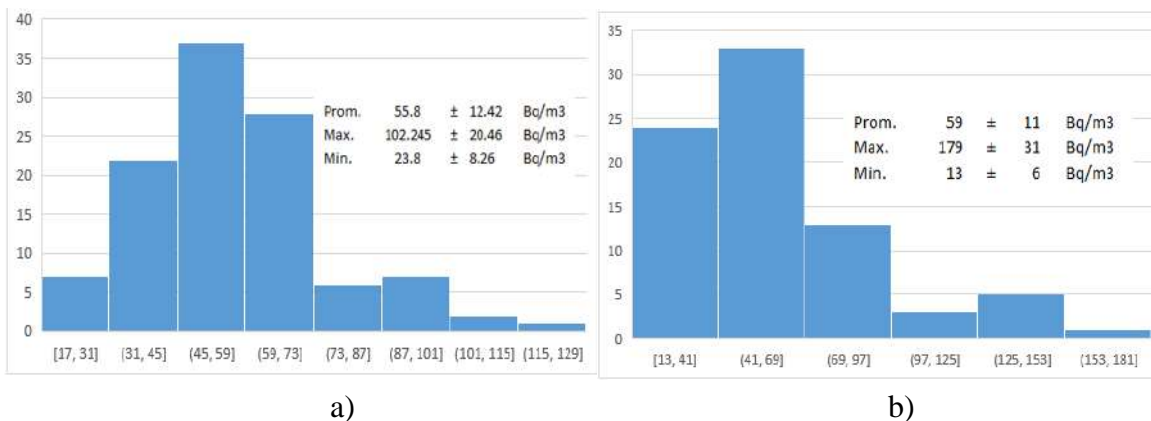
$\Delta F_c$ , error del factor de calibración del detector

#### 4.1.1 Valor medio de la concentración del radón en la ciudad de Cusco

Los gráficos mostrados en la figura 32 representan a la distribución de concentraciones de radón medidos con un total de 128 detectores CR-39 y 110 detectores LR-115 instalados en viviendas de la ciudad del Cusco. Se puede apreciar que el valor medio de  $(55.89 \pm 12.42)$  Bq/m<sup>3</sup> hallado con el detector LR -115, pertenece al intervalo [45-59] Bq/m<sup>3</sup>, mientras que para el detector CR-39 el valor medio de  $(59,94 \pm 10.53)$  Bq/m<sup>3</sup> se halla comprendido en el intervalo [41-69] Bq/m<sup>3</sup>.

**Figura 32**

*Distribución de concentraciones de radón*



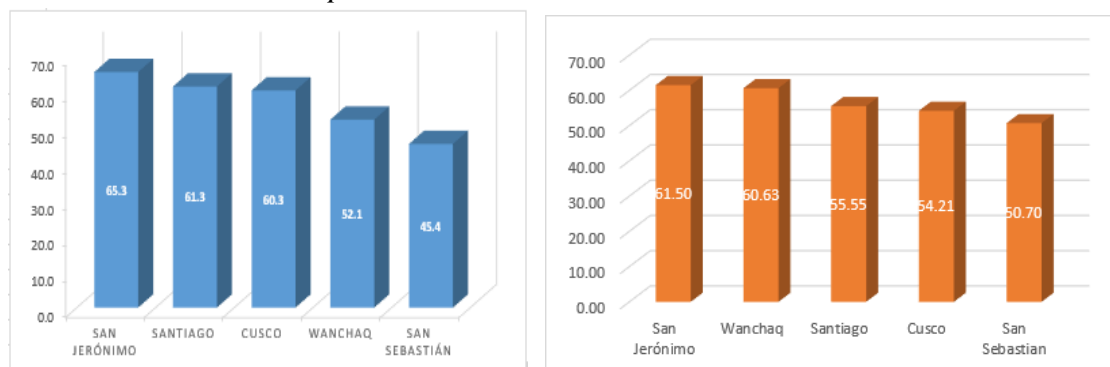
a) Distribución de C-Rn-222: LR-115, b) Distribución de C-Rn-222: CR-39

#### 4.1.2 Concentración media de radón por distrito

Los valores medios de la concentración de radón por distrito se muestran en la figura 33, en ella se puede apreciar que ninguno de los valores supera en promedio al límite de seguridad, sin embargo, se han encontrado valores superiores a  $100 \text{ Bq/m}^3$  en diferentes viviendas ubicadas en los distritos de Cusco y Santiago que requieren ser monitoreadas en el tiempo. Cabe mencionar que en estos distritos se concentran la mayor cantidad de viviendas antiguas, construidas de adobe en su totalidad y otras que están construidas con muros incas de roca (caliza o granito) algunos de doble jamba y adobe.

**Figura 33**

*Concentración de radón por distrito*



a)

b)

Nota. a) Medido con el detector CR-39, expresado en  $\text{Bq/m}^3$   
 b) medido con el detector LR-115, expresado en  $\text{Bq/m}^3$

En la Tabla 8. Se puede apreciar algunos valores de la concentración de radón en viviendas, halladas con el detector CR -39, que superan los  $100 \text{ Bq/m}^3$  límite ideal establecido por la OMS (OMS,2015).

**Tabla 8**

*Medidas de concentración de radón mayores a 100 Bq/m<sup>3</sup>*

Código	Densidad (Tr/cm <sup>2</sup> )		Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	
	A	B	A	B
CR-39				
C2-548	504 ± 39.68	800 ± 63.40	90.65 ± 15.50	136.00 ± 23.20
C2-612	242 ± 29.96	242 ± 29.96	43.53 ± 7.50	32.40 ± 5.50
C1-592		87 ± 18.95		15.65 ± 2.80
C1-867	635 ± 53.42	602 ± 44.47	115.97 ± 19.80	109.94 ± 18.80
C1-803	170 ± 20.83		31.05 ± 5.30	
C1-890	393 ± 36.17	298 ± 30.69	71.77 ± 12.30	54.42 ± 9.30
C1-868	216 ± 24.35	228 ± 25.61	39.45 ± 6.70	41.64 ± 7.10
C1-546	931 ± 60.60	1029 ± 55.38	170.00 ± 29.10	188.00 ± 32.10
C1-576		793 ± 55.49		144.82 ± 24.80

También, en algunos de estos detectores se han observado regiones de alta densidad de huellas nucleares características de radón (figura 34) que en la mayoría de los casos se superponían dificultando el conteo de trazas.

**Figura 34**

*Fotografía de huellas*



*La fotografía muestra la alta densidad y superposición de trazas nucleares halladas en varios detectores.*

La figura 35, muestra la concentración de radón promedio, expresado en Bq/m<sup>3</sup>, en los diferentes puntos de muestreo de la ciudad del Cusco y dentro del conjunto se aprecian valores en rojo que señalan ser superiores al límite establecido por la OMS. Estos

valores se concentran en los distritos de Cusco y Santiago, coincidentemente la mayoría de estos valores corresponden a viviendas construidas de adobe.

### Figura 35

Mapa de concentración de radón en la Ciudad el Cusco



Google map

Al encontrar valores de concentración que superan los límites establecidos, se ha procedido a realizar una segunda medida con el monitor de radón en aire *Corentium Home Airthings*, que mide la concentración de radón por el método de espectrometría alfa con un rango de medición de 0 - 9999 Bq/m<sup>3</sup> con una precisión a 5,4 pCi/L o su equivalente de 200 Bq/m<sup>3</sup> (Airthings, 2008).

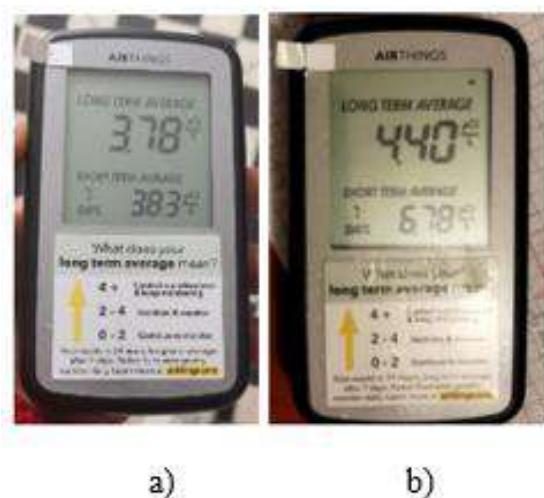
Estas especificaciones técnicas del monitor se muestran en el Anexo E.

El monitor fue instalado en el primer piso de una vivienda de adobe durante 32 días, al cabo de los cuales monitor registra una concentración de radón 4.4 pCi/l, equivalente a 162.96 Bq/ m<sup>3</sup>, corroborando la primera medida realizada con el monitor UNSAAC ver figura 36.



**Figura 36**

Medidas realizadas con el monitor Corentium Home Airthings



a) Medida registrada al cabo de dos semanas, b) Medida registrada al cabo de dos meses de instalado a partir del cual se mantuvo constante.

El reporte alcanzado por Airthings, en el ANEXO E, revela que la medida realizada supera el valor límite, por lo que, recomienda reducir la concentración de radón en la vivienda muestreada.

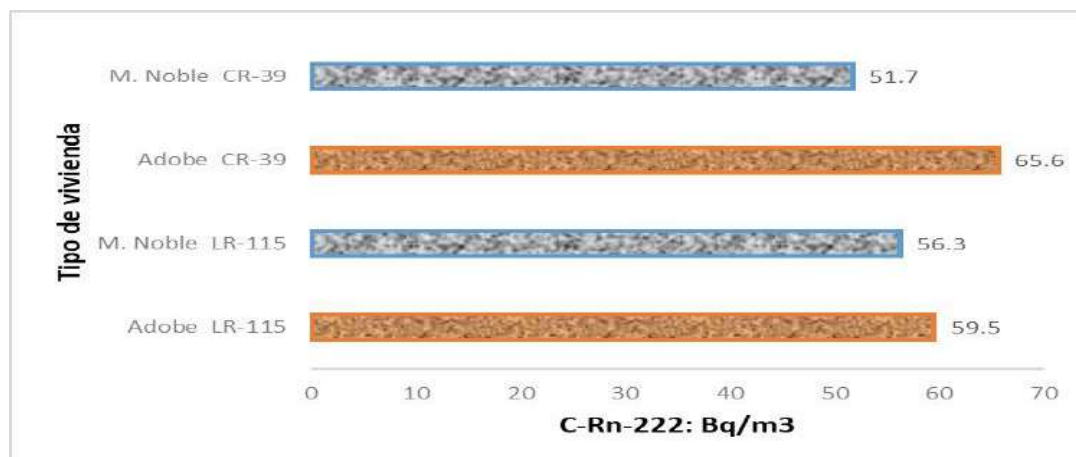
#### 4.1.3 Concentración de radón según el tipo de vivienda

Del total de viviendas muestreadas en la ciudad del Cusco el 56,33% son viviendas construidas con ladrillo y cemento o bloquetas y cemento (material noble) y el 43,67% son viviendas de adobe y en algunos casos adobe con muros de roca. Como se muestra en la figura 37, los valores de las concentraciones de radón medidos con los detectores Cr-39 y LR-115 en las viviendas de adobe son apenas mayores a la concentración de radón hallada en viviendas de material noble, una diferencia pequeña pero significativa que concuerda con otros estudios realizados en los que se afirma haber registrado mayores concentraciones de radón en viviendas de adobe, debido a la

contribución del torón Th -220 que puede exhalarse desde las capas superficiales porosas de los bloques de arcilla al aire interior (Meisenberg et al.,2017; Nguyễn, (2019).

**Figura 37**

*Concentración de radón en viviendas de material noble y adobe de la ciudad del Cusco (noviembre marzo)*



Según la Organización Mundial de la Salud, los materiales de construcción se consideran como una fuente de radón que contribuyen a la concentración de radón al interior de las viviendas, aproximadamente con un 20%, es decir entre 5 Bq/m<sup>3</sup> y 20 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que el terreno bajo las viviendas es la principal fuente de radón y contribuyen con el 80% de la radiación al interior (OMS, 2015).

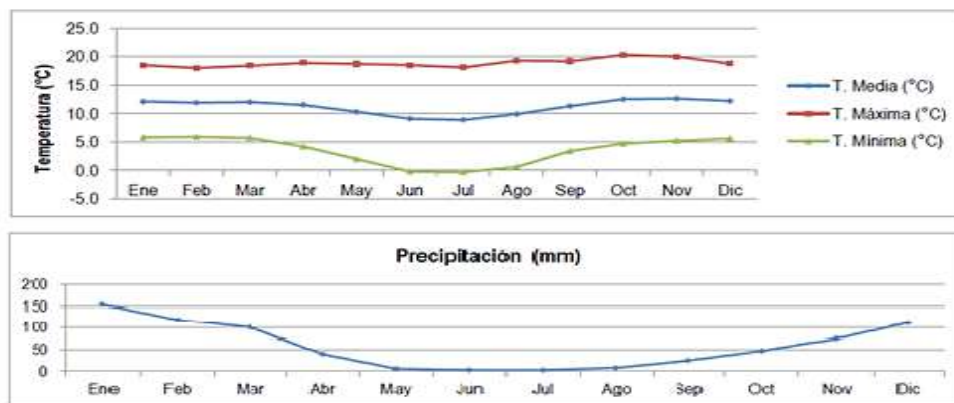
#### 4.1.4 Concentración de radón durante el año

Según el Boletín Serie B: Geología Económica N° 62 publicado por el INGEMMET, la ciudad capital del Cusco se halla a una altitud de 3414 m.s.n.m y abarca una superficie de 617.00 km<sup>2</sup>. La Figura 38, muestra las variaciones de temperatura en el periodo de un año, así como las precipitaciones mensuales de la región de Cusco, que definen la existencia de dos épocas, una correspondiente al periodo de ausencia de

lluvias (época seca) que está comprendido entre los meses de mayo y agosto y el periodo de lluvias se halla entre los meses de setiembre – abril (Boulangger et al., 2019).

**Figura 38**

*Temperatura y precipitación en el periodo de un año en la región del Cusco*



Datos extraídos de Boulangger et al., (2019)

En este estudio se han instalado detectores CR -39 en los dos periodos: seca y lluvia, y los valores de las concentraciones de radón halladas se muestran en la figura 39.

**Figura 39**

*Variación temporal de la concentración de radón (Bq/m<sup>3</sup>) por tipo de vivienda*



Nota. a) Concentración de radón en viviendas: época de lluvia y b) Concentración de radón en viviendas: época de seca

En la figura 39, se observa que las medidas de concentración de radón en viviendas de adobe correspondiente a la época de seca, es notablemente mayor a la medida realizada en la época de lluvia. Esta diferencia se debe a que en la época de lluvia los suelos se saturan de agua, evitando que el radón se difunda con mayor velocidad que  $5 \times 10^{-6}$  cm/s aproximadamente. Un valor mucho menor comparado con la velocidad de  $5 \times 10^{-2}$  cm/s con que el radón se difunde en el suelo poroso y seco. De forma equivalente se puede afirmar que mientras el gas radón recorra 155cm en suelo poroso seco antes de desintegrarse, en suelo saturado recorrerá apenas 1,55 cm antes de desintegrarse. Está claro que la difusión del radón dependerá del medio en el que se difunda (Durrani y LLIC, 1997).

La tabla 9 muestra la difusión del radón en diferentes medios, se puede apreciar que el radón tiene mayor recorrido en el medio aire y en suelo poroso que en el agua.

**Tabla 9**

*Distancias medias de difusión del radón y torón en diferentes medios*

Medio	Distancias medias		Constante de difusión cm <sup>2</sup> /s
	Rn-222 (cm)	Rn-220 (cm)	
Aire	220	2.85	$1 \times 10^{-1}$
Suelo poroso	155	2	$5 \times 10^{-2}$
Agua	2.2	0.0285	$1 \times 10^{-5}$

Nota: Adaptado de Durrani y Ilic, (1997)

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **PRIMERA**

La concentración media del radón medido con ambos detectores CR- 39 y LR -115 en viviendas y lugares de trabajo construidas con ladrillo o bloques de cemento en la ciudad del Cusco, son menores al límite de seguridad de  $100\text{Bq/m}^3$  propuesta por la OMS, por lo que no significaría riesgo para la salud de los habitantes.

No existe diferencia significativa entre las concentraciones medias de radón, en viviendas de ladrillo o bloque de cemento, medida en la época de lluvias y en la época de seca.

### **SEGUNDA**

La concentración media de radón en viviendas construidas de adobe halladas en la época de lluvia, no superan los valores medios en la época de seca. Según el reporte de Curie et al., (2022) el valor medio de radón en viviendas construidas de adobe en la época de seca, fue de  $(82,4\pm 25.2)\text{Bq/m}^3$  que resulta ser superior en  $16.8\text{Bq/m}^3$  al valor medio hallado en la época de lluvias, debido a que la difusión del radón es menor en suelos húmedos.

Los resultados obtenidos para las viviendas de adobe y adobe-roca, presentan mayor concentración de radón en la época de seca, puesto que el 6.45% de las medidas realizadas en el distrito de Cusco y el 4.8% en el distrito de Santiago, con el detector CR- 39 muestran valores por encima del límite de  $100\text{Bq/m}^3$  (OMS, 2015).

Es importante mencionar que en los distritos de Santiago y Cusco se concentran una gran cantidad de viviendas antiguas de adobe con valor histórico y de acuerdo a estudios geológicos realizados en estas zonas, se presentan afloramientos de rocas intrusivas plutónicas, rocas volcánicas, andesíticas cuaternarias, lutitas rojas lacustres con areniscas, micro conglomerados, feldespatos, entre otras. Siendo el granito, pizarra, lutita, ocasionalmente en andesita, conglomerados y areniscas, las que presentan mayor concentración de elementos radioactivos, según: INGEMET (2020), Carlotto et al. (2011), Bruce & Hurley (2009).

Por tanto, el lecho rocoso sobre el cual se construyen las viviendas en los distritos mencionados, puede ser la fuente más importante que contribuye a la acumulación del radón en viviendas, como se muestran en los resultados. Sin embargo; las concentraciones medias de radón, en viviendas de ladrillo o bloque de cemento, medida en la época de lluvias no registraron diferencia considerable respecto de los valores hallados en la época de seca.

### **TERCERA**

Se puede concluir que la concentración media de radón en las distintas viviendas presenta una gran variación de acuerdo al estudio realizado, esto se debe a que cada vivienda o centro de trabajo tiene sus propias características, como: la antigüedad, el material de construcción, el suelo sobre el cual se edifican, etc.

Para adoptar medidas de mitigación del gas radón en las viviendas que registraron altas concentraciones de radón, primero se recomienda monitorear al radón durante todo el año, para contrastar con los resultados obtenidos en la exploración inicial, con el objetivo de determinar si hay o no exposición al gas radón por inhalación. En caso de ser positivo, se deben mejorar los sistemas de ventilación o si los valores son de preocupación, la EPA, recomienda realizar la despresurización o la impermeabilización del suelo al gas radón (Poncela et al., 2010).

## **RECOMENDACIONES**

**Primera:** Por los valores obtenidos en una primera medición del radón en un año, se recomienda repetir las medidas en viviendas y lugares de trabajo construidas de adobe, ya que estos materiales pueden contener cantidades importantes de radio que desintegraran en radón y su progenie que, al concentrarse en cantidades importantes, significarían un peligro para la salud a sus habitantes.

**Segunda:** Se recomienda evaluar la exhalación de radón en suelos de edificaciones destinadas a vivienda u oficinas que registran valores mayores a  $100 \text{ Bq/m}^3$ , con la finalidad de garantizar la salud de las personas.

**Tercera:** Se recomienda al IPEN, promover la vigilancia radiológica del aire que se respira al interior de viviendas y centros de trabajo ya que, en las últimas décadas a nivel mundial, se ha incrementado el interés por determinar la exposición al gas radón en los hogares.

**Cuarta:** Se recomienda realizar más monitoreos continuos de radón durante todo un año en la ciudad del Cusco con una mayor cantidad de muestras, para elaborar el mapa de la concentración de radón y contrastar los resultados hallados en este estudio.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AIEA (2013), Boletín informativo “Qué es el uranio” [www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-el-uranio](http://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-el-uranio)
- Aicardi-Carrillo, G., Asmat-Inostrosa, M., & Barboza-Rangel, Y. (2015). Radón y sus efectos en la salud en trabajadores de minas de uranio. *Medicina y seguridad del trabajo*, 61(238), 86-98.
- Airthings.(2008). <https://www.airthings.com/en/home-bqm>
- Alcaraz Baños. (2003). *Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico* (2ª ed). Universidad de Murcia.
- Aparicio, C., & Zúñiga, A. (2005). Determinación experimental de los parámetros de la huella grabada en detectores cr-39 para protones. *Revista de investigación de física*, 8(02), 91-95.
- Aramburu, X. O., & Bisbal, J. J. (Eds.). (2009). Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos I (Vol. 1). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Akerblom, G. and Lindgren, J. 1997. Mapping of groundwater radon potential. Uranium Exploration Data and Techniques Applied to the Preparation of Radioelement Maps, IAEATECDOC-980, IAEA, Vienna, 237-255.
- Appleton, J. D. (2012). User guide for the BGS-HPA OneGeology Radon Potential Dataset for the UK.
- Barrios, R., Castañeda, M., Pedraza, C., Vásquez, J. D. H., & Ibañez, I. (2016). Eliminación de outliers: una estrategia para reducir la incertidumbre tipo A en la calibración de balanzas. In *Simposio de metrología*. <https://www.cenam.mx/sm2016/pdf/1758.pdf>
- Barros Dios, J. M. y Pérez Ríos, M. (2015). Radón y cáncer de pulmón. Santiago de Compostela, Spain: Universidade de Santiago de Compostela. [Recuperado de https://elibro.net/es/ereader/unsaac/61556?page=20](https://elibro.net/es/ereader/unsaac/61556?page=20).
- Blume, M (2023). Japón ha empezado a soltar aguas residuales de la central nuclear de Fukushima al Pacífico; ¿deberíamos preocuparnos? *National Geographic*  
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2023/05/vertido-aguas-fukushima-mar-oceano-pacifico-japon-peligros-preocupacion>
- Boulangger Rondoy, E., Chong Kam, L. M. L., & Sipión Baltodano, C. D. (2019). Estudio de recursos de rocas y minerales industriales para la inclusión económica social y desarrollo en la región Cusco: sector meridional-[Boletín B 62].  
<https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2352>

- Burcham, W. E. (2020). Física nuclear. Reverté.
- Calzada, V., & Cerecetto, H. (2019). Una introducción a la Química Nuclear. Manuales didácticos
- Canoba, A. C., & López, O. F. (2006, September). Mediciones de radón  $^{222}$  en el interior de viviendas de la República Argentina. In Proceedings of the Primer Congreso Americano del International Radiation Protection Association (IRPA), Acapulco, Mexico (pp. 4-8)
- Carlotto V.; Cárdenas, J., (2003). *Revisión Y Actualización Del Cuadrángulo De Cusco (28-s) Escala 1:50 000*. INGEMMET Recuperado de:  
[https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2115/1/Memoria\\_descriptivaCusco\\_28-s.pdf](https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2115/1/Memoria_descriptivaCusco_28-s.pdf)
- Clement, C. H., Tirmarche, M., Harrison, J. D., Laurier, D., Paquet, F., Blanchardon, E., & Marsh, J. W. (2010). Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Annals of the ICRP*, 40(1), 1-64.
- Colmenero S, L., Villalba, L., & Montero C, M. E. Correlation of the activity of the  $^{238}\text{U}$  in soil and  $^{222}\text{Rn}$  in domiciles, with the rocks of cities of the Estado de Chihuahua.
- Curie, R. A., Núñez, C. F. Á., & Moscoso, M. E. Á. (2022). Medida de la concentración de radón ambiental en viviendas de material noble y adobe y su impacto sobre la salud humana en la ciudad del Cusco. *Ambiente, Comportamiento y Sociedad*, 5(1), 44-54.
- Cherry Jr, R. N., Upton, A. C., Lodde, G. M., & Porter Jr, S. W. (2012). Radiaciones Ionizantes riesgos Generales. Ch. R. Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo.
- Cohen, I. M., & Furnari, J. C. (2012). Las Tendencias Modernas de la Radioquímica y sus Aplicaciones. *Química Viva*, 11(2), 72-90
- De Seguridad Nuclear, C. (2012). Tema 1: Introducción a las radiaciones ionizantes. Naturaleza y tipos de radiación Interacción de la radiación con la materia. Recuperado de:  
[http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/1838994721\\_1672013134047.pdf](http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1838994721_1672013134047.pdf).
- De Seguridad Nuclear, C. (2010). Dosis de radiación. Consejo de Seguridad Nuclear: Madrid, Spain, 18.
- De Seguridad Nuclear, C. (2009). Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico
- De Seguridad Nuclear, C (2009). Detección Y Dosimetría De La Radiación. CSN, 1-19
- De Seguridad Nuclear, C. (2013). Curso de supervisores de instalaciones radiactivas (IR). Tema 2: interacción de la radiación con la materia (CSN)

- De seguridad Nuclear, C. (2013). Interacción de la radiación con la materia. *de Curso de SUPERVISORES de instalaciones radiactivas (IR) MÓDULO BÁSICO*. (CSN)
- De Protección Radiológica, S. E. (2008). Publicación 103 ICRP: Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. *Madrid: SEPR*.
- Durrani, S. A., & Ilic, R. (Eds.). (1997). Radon measurements by etched track detectors-applications in radiation protection, earth sciences. World Scientific.
- Durrani, S. A., & Bull, R. K. (2013). Solid state nuclear track detection: principles, methods and applications (Vol. 111). Elsevier.
- D.S. No 0097-97-EM, Aprueba el Reglamento de Seguridad Radiología. Diario Oficial el Peruano (1997).
- 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.
- Espinosa, G. (1994). Trazas nucleares en sólidos. Instituto de Física, UNAM.
- Espinosa-García, G. C., & Ángeles-Carranza, A. (2018). Radón Intramuros y Salud Pública. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Espinosa, G., Chavarria, A., & Golzarri, J. I. (2013). A study of indoor radon in greenhouses in Mexico City, Mexico. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 296, 37-41.
- EC-European Commission. (1999). Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. *Radiation Protection*, 112.
- Fleischer, R. L., Price, P. B., & Walker, R. M. (1965). Solid-state track detectors: applications to nuclear science and geophysics. *Annual Review of Nuclear Science*, 15(1), 1-28.
- Frutos Vázquez, B. (2009). *Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones* (Doctoral dissertation, Arquitectura).
- Frutos Vázquez, B. (2019). Afección por gas radón en la edificación. Inmisión y Sistemas de protección. Marco regulador (Directiva y CTE).
- Hernández, H. A. (2016). *El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales* (Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).
- García, B. P., Payá, S. C., Recio, M. A. M., & Barbudo, M. A. S. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo. *Revista Técnica CEMENTO HORMIGÓN*• N<sup>o</sup>, 945, 40.

- García Vindas, J. R. (2003). Influencia de la precipitación en la concentración de radón en el subsuelo y su efecto en la exhalación de este hacia la atmósfera (ejemplos de tres zonas de Costa Rica).
- Gallego Díaz, E. F. (2010). Las radiaciones ionizantes: una realidad cotidiana.
- González Sprinberg, G. A., & Rabin Lema, C. (2011). Para entender las radiaciones: energía nuclear, medicina, industria. *Colección Art. 2*.
- GT Analytic Kodalpha. Kodalpha radón-dosimeters and Ir115 ssntd specifications
- Hernández, H. A. (2016). El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales (Doctoral dissertation, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria).
- Huertas, C., & Hueso, F. (2008). *Análisis de las desintegraciones de una fuente radioactiva: Ra-226. Laboratorio de T.E Física General*, Universidad de Valencia, España.
- INEI. (2018). Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas, Informe Nacional.
- Ishimori, Y., Lange, K., Martin, P., Mayya, Y. S., & Phaneuf, M. (2013). Measurement and calculation of radon releases from NORM residues.
- Ilić, R., & Šutej, T. (1997). Radon monitoring devices based on etched track detectors. In *Radon Measurements By Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment* (pp. 103-128).
- Knoll, G. F. (2010). Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons.
- Lastra, M. F. (2016). Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos.
- Liza Neciosup, R. Á. (2023). Riesgo radiológico debido a la radiactividad natural y exhalación de radón de suelos y materiales de construcción peruanos. (Tesis doctoral)
- L'Annunziata, M. F. (2012). Radiation physics and radionuclide decay. Handbook of radioactivity analysis, 1-162.
- Magill, J., & Magill, J. (2003). The universal nuclide chart. *Nuclides. net: An Integrated Environment for Computations on Radionuclides and their Radiation*, 197-207.
- Meisenberg, O., Mishra, R., Joshi, M., Gierl, S., Rout, R., Guo, L., ... & Tschiersch, J. (2017). Radon and thoron inhalation doses in dwellings with earthen architecture: comparison of measurement methods. *Science of the Total Environment*, 579, 1855-1862.
- Montoya, M., & Mallaupoma, M. (2014). La Ley N° 28028 y su aporte trascendental para mejorar la seguridad radiológica y física en el Perú.

- Moreno Baltà, V., Font Guiteras, L. And Baixeras Divar, C. 2012. El Radó En Activitats Laborals.
- Nazaroff, W. W. (1992). Radon transport from soil to air. *Reviews of geophysics*, 30(2), 137-160.
- Nguyễn-Thuỳ, D., Nguyễn-Vãn, H., Schimmelmänn, J. P., Nguyễn, N. T. Á., Doiron, K., & Schimmelmänn, A. (2019). 220 Rn (Thoron) Geohazard in Room Air of Earthen Dwellings in Vietnam. *Geofluids*, 2019.
- Noverques Medina, A. (2017). Desarrollo de metodologías para la realización de mediciones de exhalación de Radón 222.
- Nuclear, A. R. (1998). Curso de post-grado en protección radiológica y seguridad nuclear. *Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Salud y Acción Social, OIEA*,
- International Atomic Energy Agency, Nuclear Data Services, live chart of nuclides, nuclear structure and decay data
- <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>, accessed: 2023-09-14
- Osores, J. M. (2008). *Contaminación radiactiva ambiental en el neotrópico*. The Biologist (Lima), 6(2). Recuperado de: <https://revistas.unfv.edu.pe/rtb/article/view/537>
- Parisi, M. (2004). *Temas de biofísica*. Mc Graw Hill.
- Pawel, D. J., & Puskin, J. S. editors. EPA Assessment of Risks from Radon in Homes. Washington DC: Environmental Protection Agency; 2003. Jun, Report No. EPA 402-R-03-003.
- Pereyra, P. (1998). *Detección de Rn222 en ambientes interiores utilizando la técnica de Huellas nucleares* (Doctoral dissertation).
- Pereyra Anaya, P. E. Nuevo enfoque para estudiar la respuesta del detector LR-115 al 222Rn, 220Rn y progenie. Aplicación en mediciones de radón en interiores de Lima, Perú.
- Piedecausa-García, B., Chinchón Payá, S., Morales Recio, M. Á., & Sanjuán Barbudo, M. Á. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte I. Radiación externa: índice de riesgo radiactivo.
- Pillaca, C. J. G. (2019). *Medición de radón 222 en Lima Metropolitana utilizando tres tipos de monitores con detectores de trazas nucleares* (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru)).
- Puerta, Ortiz, J. A., & Morales-Aramburo, J. (2020). Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Revista Colombiana de Cardiología*, 27, 61-71.

Recuperado de: <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-colombiana-cardiologia-203-pdf-S0120563320300061>

- Poncela, L. S. Q., Fernández, C. S., López, L. Q., Merino, I. F., & Arteche, J. L. (2010). El gas radón como contaminante atmosférico. *Revista de Salud Ambiental*, 10(1-2), 32-37
- Poncela, L. Q., Fernández, P. L., Arozamena, J. G., Sainz, C., Fernández, J. A., Mahou, E. S., ... & Cascón, M. C. (2004). Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International*, 29(8), 1091-1096.
- Quindós, L. S., Fernández, P. L., Sainz, C., Fuente, I., Nicolás, J., Quindós, L., & Arteche, J. (2008). Indoor radon in a Spanish region with different gamma exposure levels. *Journal of environmental radioactivity*, 99(10), 1544–1547. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.011>
- Quindós Poncela, L. S. (2016). Estudio de diferentes técnicas para la medida de exhalación de radón en suelos.
- Quindós Poncela, L. S., & Arteche García, J. L. (2006). Radón y meteorología.
- Quashie, F. K., Fletcher, J. J., Oppon, O. C., Asumadu-Sakyi, A. B., Wordson, D. A., Adjei, C. A., ... & Amponsah, P. (2011). Preliminary studies on indoor radon measurements in some adobe houses in the Kassena Nankana area of the upper east region of Ghana. *Research journal of environmental and earth sciences*, 3(1), 51-55.
- Rigitano, R. C. (1991). *A formação de traços nucleares em polímeros: subsídios à identificação de primários pesados* (Doctoral dissertation, [sn]).
- Radiation, I. (2001). part 2: some internally deposited radionuclides. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, 78.
- RADIOLÓGICA, S. E. D. P., & Nuclear, A. D. (2007). Publicación 103. las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Comisión Internacional de Protección Radiológica, ICRP. Editorial Senda SA 1ra. Edición en Español. Madrid, España.
- Rodríguez, M. D. C. M. (2016). Crónica de la Organización de las Naciones Unidas (Enero-Diciembre 2014). *Revista electrónica de estudios internacionales (REEI)*, (32), 17.
- Rojas, J., Pereyra, P., Pérez, B., Herrera, M. E. L., Palacios, D., & Sajo-Bohus, L. Enfoque semi-empírico para la calibración de detectores LR-115 en cámaras de difusión para mediciones de radón. *Radiaciones ionizantes y su impacto*, 41.
- Ruano-Ravina, A., Quindós-Poncela, L., Sainz Fernández, C., & Barros-Dios, J. M. (2014). Radón interior y salud pública en España: tiempo para la acción. *Gaceta Sanitaria*, 28, 439-441.
- Sánchez León, J. G. (2005). Uranio, un elemento poco conocido.

- Saint Martín, M. L. G. (1999). *Evaluación de la sensibilidad en detectores de trazas nucleares* (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- Salinas-Ramírez, H. X., Rubio-Arias, H. O., Colmenero-Sujo, L., Luévano-Gurrola, S. D., & Ochoa-Rivero, J. M. (2020). *Niveles de radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) en oficina pública de Aldama, Chihuahua, México y grado de exposición al trabajador*. (Acta universitaria). Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-62662020000100106](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662020000100106)
- Segura, B. D. (2022). Radón en los lugares de trabajo: ¿cómo abordarlo? *Seguridad y salud en el trabajo*, (109), 17-23. Recuperado de: <https://www.cigsaudelaboral.org/files/documentos/INSST.%20Radon%20nos%20lugares%20de%20trabajo.%20Como%20abordalo.pdf>
- Soria, A. F. (2020). *Física nuclear y de partículas (Vol. 62)*. Universitat de València.
- Soria, A. F. (2011). *Física nuclear y de partículas*. Universidad de València
- Steiner, A. (2016). Radiación: efectos y fuentes Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Pnuma, 68. <http://alturl.com/hrms6>
- TASTRAK PADC <https://www.tasl.co.uk/about.php>
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología, Vol 2C*. Reverté.
- Torres Maldonado, J. O. (2018). *Estudio del radón  $^{222}$  y su progenie proveniente del suelo en la estación meteorológica Hipólito Unanue-PUCP*. (Tesis de Maestría) PUCP Recuperado de: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/12437>
- Tsoufanidis, N., Landsberger, S., & Gayou, O. (2012). Measurement and Detection of Radiation. *Medical Physics*, 39(7), 4618.
- Tsoufanidis, N., & Landsberger, S. (2021). *Measurement and detection of radiation*. CRC press.
- Tsoufanidis, N., (1995). *Measurement and detection of radiation*. University of Missouri-Rolla
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2017). Sources, effects and risks of ionizing radiation, united nations scientific committee on the effects of atomic radiation (UNSCEAR) 2016 report: report to the general assembly, with scientific annexes. United Nations.

UDELAS. (s.f). *Guia-011 Estadística de conteo.*

<http://www.pruebasradvirtual.com/Contenidos/guias/guia11.pdf>

W. Bruce, J. Hurley, “*Natural Radioactivity in the Geologic Environment*”

National Nuclear Security Administration Nevada site Office CEMP, Nevada 2009

Recuperado de: [PowerPoint Presentation \(dri.edu\)](#)

Vargas Rojas, R. (2009). Guía para la descripción de suelos (No. FAO 631.44 G943 2009). FAO, Roma (Italia), 26-45.

Villaverde Liñares, P. (2018). Siete preguntas clave sobre el radón (Parte I). Introducción al radón. *Deplano*, (38), 12-16

Young, D. A. (1958). Etching of radiation damage in lithium fluoride. *Nature*, 182.


Zeeb, H., & Shannoun, F. (2015). *Manual de la OMS Sobre el Radón en Interiores: Una perspectiva de salud Pública*. Recuperado de: [9789243547671\\_spa.pdf;sequence=1 \(who.int\)](#)



## ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

"EVALUACION DE LA CONCENTRACION DE RADON EN VIVIENDAS DE CUSCO METROPOLITANO"						
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables de estudio	Metodología	Técnicas e Instrumentos	Unidad de Análisis y Muestra
¿Cuáles son las concentraciones de radón en aire en las viviendas de la ciudad del Cusco?	Medir los niveles de concentración de gas radón en el interior de viviendas y lugares de trabajo.	Sin Hipótesis: El principal objetivo del presente estudio es Medir las concentraciones de gas radón en viviendas de material noble y adobe, porque no se tiene una base datos que nos informe sobre la situación radiológica de la atmósfera al interior de las viviendas.	Densidad de trazas nucleares	<b>Enfoque de la investigación</b> La investigación desarrollada en este estudio ha seguido un enfoque cuantitativo	<b>Técnicas</b> a. Análisis documental b. Entrevistas	En la presente investigación la unidad de análisis está referida a cada una de las viviendas muestreadas que conforma el universo y que a través del muestreo han sido seleccionados para la presente investigación.
<b>Problemas Específicos</b>	<b>Objetivos Específicos</b>		Concentración de radón	<b>Tipo de Investigación</b> tipo básico, porque se orienta conocer las características radiológicas de la atmósfera al interior de las viviendas. El nivel de esta investigación es <b>descriptivo</b> porque se mide la concentración de radón en aire al interior de las viviendas y <b>correlacional</b> , porque este resultado permite determinar si existe o no exposición por inhalación al gas radón.	<b>Instrumentos</b> a. Ficha de análisis documental b. Detectores pasivos de radón CR- 39 y LR- 115 c. Monitor continuo de radón. d. Microscopios e. Balanza de precisión. f. Sistema termorregulado g. vasos de precipitados. h. otros	Se instalo 141 monitores de radón UNSAAC y 141 monitores de radón UNSAAC-PUCP proporcional a la densidad poblacional
- ¿Cuáles son las concentraciones de radón en aire que presentan las viviendas de material noble de la ciudad del Cusco?	1° Conocer los niveles de concentración de gas radón en viviendas de material noble.			<b>Método de Investigación</b> En el presente trabajo, se ha utilizado el método de trazas nucleares en sólidos para DTS para cuantificar las desintegraciones nucleares por unidad de área, provenientes de una fuente radiactiva.		
- ¿Cuáles son las concentraciones de radón en aire que presentan las viviendas de adobe de la ciudad del Cusco?	2° Conocer los niveles de concentración de gas radón en viviendas de adobe					
- ¿Qué medidas de mitigación se pueden emplear para disminuir la contaminación radiactiva de la atmósfera al interior de las viviendas de la ciudad del Cusco?	3° Establecer las medidas de mitigación que se pueden emplear para disminuir la contaminación radiactiva de la atmósfera al interior de las viviendas de la ciudad del Cusco.					

## ANEXO 2: INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE LA INFORMACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO			
	<b>ESCUELA DE POST- GRADO</b>  <b>CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR RADÓN</b> <b>EN VIVIENDAS DE CUSCO METROPOLITANO</b>		
<b>DATOS GENERALES</b>			
DIRECCION			
DISTRITO			
# TELEFONO			
<b>ZONA DE MONITOREO</b>			
	# VENTANAS	MATERIAL	
DORMITORIO			LADRILLO <input type="checkbox"/>
SALA			BLOQUE DE
OFICINA			CEMENTO <input type="checkbox"/>
COMEDOR			ADOBE
SOTANO			OTRO <input type="checkbox"/>
OTRO			
<b>NIVEL</b>			
PRIMER		TERCER	
SEGUNDO			
<b>DATOS DE MUESTRA</b>			
<b>CODIGO DETECTOR</b>			
FECHA			
INSTALACIÓN			
	/ /	/	
	dd / mm / aa	HORA	
FECHA			
RETIRO			
	/ /	/	
	dd / mm / aa	HORA	
<b>ESPECIFIQUE O AGREGUE INFORMACION ADICIONAL</b>			
DATOS DEL COLABORADOR			
TELEFONO			

## ANEXO 3: DATOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

## DETECTOR LR -115

Resumen	
<b>Detectores LR115</b>	
OK	125
Eliminado (X)	8
Por revisar (-)	8
<b>Total</b>	<b>141</b>

## Resultados de detectores de Fondo

## Cuadro de Factor de calibración

N° detector	Código detector	Estado detector	Tiempo Exposición	Campos lectura	Densidad trazas fondo		B. Perez (ARI 2020)	Factor	Incertidumbre
					Tr.cm <sup>-2</sup>	Tr.cm <sup>-2</sup>			
F1	Fondo 1	OK	-	100	27.35	9.43	tr.cm <sup>-2</sup> /kBq.h.m <sup>-3</sup>	0.9908	0.029
F2	Fondo 2	OK	-	99	20.96	9.48	tr.cm <sup>-2</sup> /Bq.d.m <sup>-3</sup>	0.0237792	0.000696
F3	Fondo 3	OK	-	100	9.43	9.43			
F4	Fondo 4	OK	-	100	6.6	9.43			
F5	Fondo 5	OK	-	100	27.35	9.43			
Densidad de trazas de fondo promedio					18.34	9.83			

## Resultados de detectores expuestos

N° detector	Código detector	Estado detector	Tiempo Exposición	Campos lectura	Densidad trazas		Densidad trazas neta		Concentración de radón Bq.m <sup>-3</sup>	Incertidumbre Bq.m <sup>-3</sup>
					Tr.cm <sup>-2</sup>	Tr.cm <sup>-2</sup>	Tr.cm <sup>-2</sup>	Tr.cm <sup>-2</sup>		
1	SJ2-527-2	OK	68	99	79.56	14.94	61.22	17.88	37.86	11.11
3	C3-547	OK	70	100	104.03	14.86	85.69	17.82	51.48	10.81
4	S1-891-1	OK	84	100	78.76	14.86	60.42	17.82	30.25	8.97
5	C7-642-2	OK	67	99	108.08	14.94	89.74	17.88	56.33	11.34
6	S1-619	OK	91	98	81.89	15.01	63.55	17.94	29.37	8.34
7	W1-506-2	OK	65	98	118.28	15.01	99.94	17.94	64.66	11.76
8	S1-528-2	OK	63	99	112.59	14.94	94.25	17.88	62.91	12.08
9	S7-856	OK	91	100	81.74	14.86	63.4	17.82	29.3	8.28
10	C4-579	OK	66	100	156.04	29.72	137.7	31.3	87.74	20.11
11	C3-518	OK	62	96	97.53	15.17	79.19	18.08	53.71	12.36
12	S6-551-2	OK	60	100	114.43	14.86	96.09	17.82	67.35	12.64
13	C2-549-2	OK	66	100	84.71	14.86	66.37	17.82	42.29	11.42
14	S4-560	OK	61	97	137.89	15.09	119.55	18.01	82.42	12.65
16	S3-522	OK	76	95	122.02	15.25	103.68	18.14	57.37	10.18
17	S1-827-2	OK	63	100	96.6	14.86	78.26	17.82	52.24	11.99
18	W4-567-2	OK	62	90	201.45	31.33	183.11	32.84	124.2	22.57
19	S1-585	OK	58	98	157.71	15.01	139.37	17.94	101.05	13.34
20	C4-524	OK	60	98	110.7	15.01	92.36	17.94	64.73	12.72
21	C1-848	OK	65	100	99.57	14.86	81.23	17.82	52.55	11.63
22	C5-503-2	OK	60	96	109.91	15.17	91.57	18.08	64.18	12.81
23	C1-890	OK	65	99	109.58	14.94	91.24	17.88	59.03	11.7
24	C4-554-2	OK	60	100	78.76	14.86	60.42	17.82	42.35	12.55
25	S1-855	OK	60	99	103.58	14.94	85.24	17.88	59.74	12.65
26	C7-616	OK	74	98	89.47	15.01	71.13	17.94	40.42	10.26
28	C4-523	OK	60	99	102.08	14.94	83.74	17.88	58.69	12.65
29	S4-539	OK	60	100	151.58	29.72	133.24	31.3	93.39	22.11
30	SJ1-871-2	OK	68	97	107.25	15.09	88.91	18.01	54.99	11.25
32	C2-870-2	OK	66	99	124.59	14.94	106.25	17.88	67.7	11.56
34	C1-546-2	OK	65	100	87.68	14.86	69.34	17.82	44.86	11.6
35	C7-613	OK	70	96	128.49	15.17	110.15	18.08	66.17	11.03
37	W2-552-2	OK	70	97	122.57	15.09	104.23	18.01	62.62	10.97
38	C3-570-2	OK	64	100	74.31	14.86	55.97	17.82	36.78	11.76
39	S1-794-2	OK	63	99	100.58	14.94	82.24	17.88	54.9	12.04
42	C4-804	OK	66	98	122.83	15.01	104.49	17.94	66.58	11.6
43	C4-512-2	OK	60	97	111.84	15.09	93.5	18.01	65.53	12.77
44	C4-584	OK	67	99	124.59	14.94	106.25	17.88	66.69	11.39
45	S1-639	OK	62	98	95.54	15.01	77.2	17.94	52.36	12.26
46	W4-563	OK	73	98	104.64	15.01	86.3	17.94	49.72	10.44
47	C4-514	OK	66	99	105.08	14.94	86.74	17.88	55.27	11.51
48	C1-577-2	OK	65	100	160.5	29.72	142.16	31.3	91.97	20.43
49	C1-568-2	OK	65	97	108.78	15.09	90.44	18.01	58.51	11.78
50	SJ1-828-2	OK	67	99	97.57	14.94	79.23	17.88	49.73	11.32
51	2S87-825	OK	91	100	69.85	14.86	51.51	17.82	23.8	8.26
52	W1-498	OK	60	100	156.04	29.72	137.7	31.3	96.51	22.12
53	SJ2-537	OK	59	100	126.32	14.86	107.98	17.82	76.97	12.9
54	C3-597	OK	70	99	120.09	14.94	101.75	17.88	61.13	10.89
55	C2-548	OK	66	98	103.12	15.01	84.78	17.94	54.02	11.54
56	Ss7-557	OK	73	99	184.64	29.87	166.3	31.45	95.8	18.33
57	Ss6-823-2	OK	67	100	117.4	14.86	99.06	17.82	62.18	11.33
58	SJ1-580	OK	65	97	157.81	30.18	139.47	31.74	90.23	20.7
59	636	OK	68	99	117.09	14.94	98.75	17.88	61.07	11.2
60	C7-618	OK	70	91	91.45	15.58	73.11	18.42	43.92	11.14
61	C1-867	OK	65	100	114.43	14.86	96.09	17.82	62.17	11.67
62	C4-496	OK	67	98	131.93	15.01	113.59	17.94	71.3	11.45
63	SJ2-849-1	OK	65	99	112.59	14.94	94.25	17.88	60.98	11.71
64	Ss1-594-2	OK	63	96	91.33	15.17	72.99	18.08	48.72	12.15
66	W4-521	OK	73	98	157.71	30.02	139.37	31.59	80.29	18.35
67	W4-845-2	OK	65	99	99.08	14.94	80.74	17.88	52.24	11.67
68	W1-540	OK	62	100	182.79	29.72	164.45	31.3	111.54	21.48
69	C7-634	OK	74	100	90.65	14.86	72.31	17.82	41.09	10.2
70	W4-565	OK	62	96	161	30.34	142.66	31.89	96.76	21.81

71	C7-621	OK	70	100	65.39	14.86	47.05	17.82	28.27	10.74
72	C3-550-2	OK	70	100	52.01	14.86	33.67	17.82	20.23	10.72
73	S1-581	OK	61	97	96.52	15.09	78.18	18.01	53.9	12.52
75	S11-558	OK	71	100	99.57	14.86	81.23	17.82	48.11	10.65
76	Ss8-534-2	OK	70	100	46.07	14.86	27.73	17.82	16.66	10.72
77	C1-868	OK	65	97	113.37	15.09	95.03	18.01	61.48	11.79
78	C3-519	OK	67	99	78.06	14.94	59.72	17.88	37.48	11.27
79	S12-849-2	OK	70	100	78.76	14.86	60.42	17.82	36.3	10.76
80	W4-793-2	OK	62	99	97.57	14.94	79.23	17.88	53.74	12.23
81	W4-590-2	OK	65	99	84.06	14.94	65.72	17.88	42.52	11.63
82	S1-615-2	OK	59	100	66.88	14.86	48.54	17.82	34.6	12.74
83	C4-538	OK	67	99	123.09	14.94	104.75	17.88	65.75	11.39
85	C1-806	OK	65	99	139.61	14.94	121.27	17.88	78.46	11.79
86	C1-614-2	OK	67	98	112.22	15.01	93.88	17.94	58.93	11.39
87	Ss6-544	OK	59	100	95.11	14.86	76.77	17.82	54.72	12.8
88	Ss6-564	OK	68	98	110.7	15.01	92.36	17.94	57.12	11.22
89	W3-526	OK	60	100	84.71	14.86	66.37	17.82	46.52	12.56
90	C1-592-2	OK	66	100	112.95	14.86	94.61	17.82	60.28	11.49
91	W3-513	OK	71	96	128.49	15.17	110.15	18.08	65.24	10.88
92	W1-847-2	OK	62	97	79.67	15.09	61.33	18.01	41.6	12.28
93	C1-576-2	OK	65	100	83.22	14.86	64.88	17.82	41.98	11.6
94	W2-504-2	OK	65	100	75.79	14.86	57.45	17.82	37.17	11.58
95	C4-589-2	OK	62	97	101.12	15.09	82.78	18.01	56.15	12.33
97	W4-508-2	OK	66	100	68.36	14.86	50.02	17.82	31.87	11.39
98	S4-499	OK	58	99	118.59	14.94	100.25	17.88	72.69	13.14
99	C1-569-2	OK	65	100	151.58	14.86	133.24	17.82	86.2	11.8
100	C3-505-2	OK	64	100	86.2	14.86	67.86	17.82	44.59	11.78
101	C1-553-2	OK	65	97	88.86	15.09	70.52	18.01	45.62	11.73
102	C1-803	OK	65	98	115.25	15.01	96.91	17.94	62.7	11.75
103	C5-561	OK	60	98	109.18	15.01	90.84	17.94	63.67	12.71
105	C7-640	OK	74	100	90.65	14.86	72.31	17.82	41.09	10.2
106	C4-575-2	OK	66	100	95.11	14.86	76.77	17.82	48.92	11.45
107	C4-588	OK	66	98	118.28	15.01	99.94	17.94	63.68	11.58
108	Ss8-535	OK	76	100	145.64	14.86	127.3	17.82	70.44	10.07
109	S1-517	OK	58	96	102.17	15.17	83.83	18.08	60.78	13.23
110	C4-507	OK	60	100	96.6	14.86	78.26	17.82	54.85	12.59
111	S1-891-2	OK	84	99	90.07	14.94	71.73	17.88	35.91	9.01
112	W4-511-2	OK	62	100	95.11	14.86	76.77	17.82	52.07	12.18
116	S1-582	OK	60	100	83.22	14.86	64.88	17.82	45.47	12.56
117	S13-520	OK	62	98	110.7	15.01	92.36	17.94	62.65	12.31
118	S4-824-2	OK	62	100	81.74	14.86	63.4	17.82	43	12.15
119	W1-583	OK	60	99	88.57	14.94	70.23	17.88	49.22	12.61
120	S3-522-2	OK	70	100	72.82	14.86	54.48	17.82	32.73	10.75
121	S5-531-2	OK	65	99	103.58	14.94	85.24	17.88	55.15	11.68
122	Ss8-535	OK	70	96	71.21	15.17	52.87	18.08	31.76	10.9
123	S1-536	OK	61	98	127.38	15.01	109.04	17.94	75.17	12.56
124	C1-541	OK	60	99	91.57	14.94	73.23	17.88	51.33	12.62
125	W2-562	OK	60	98	90.99	15.01	72.65	17.94	50.92	12.66
126	W3-850-2	OK	63	99	90.07	14.94	71.73	17.88	47.88	12.02
127	W3-510-2	OK	67	98	74.31	15.01	55.97	17.94	35.13	11.31
128	C5-503-1	OK	58	97	81.2	15.09	62.86	18.01	45.58	13.13
129	C2-612	OK	66	99	99.08	14.94	80.74	17.88	51.45	11.49
130	Ss6-596-2	OK	61	99	91.57	14.94	73.23	17.88	50.48	12.41
131	W3-500	OK	61	100	114.43	14.86	96.09	17.82	66.24	12.44
132	S4-574-2	OK	66	97	67.41	15.09	49.07	18.01	31.27	11.51
133	S4-602-2	OK	65	94	139.13	15.33	120.79	18.21	78.15	12
134	C7-516	OK	58	98	112.22	15.01	93.88	17.94	68.07	13.16
135	S1-572-2	OK	63	97	105.71	15.09	87.37	18.01	58.32	12.14
136	W3-509	OK	60	99	102.08	14.94	83.74	17.88	58.69	12.65

## DATOS Y PROCESAMIENTO DE DATOS: DETECTOR CR-39

Código CR-39	Densidad (Tr/cm <sup>2</sup> )		Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )	
	A	B	A	B
C2-548	504 ± 39.68	800 ± 63.40	90.65 ± 15.50	136.00 ± 23.20
C2-612	242 ± 29.96	242 ± 29.96	43.53 ± 7.50	32.40 ± 5.50
C1-592		87 ± 18.95		15.65 ± 2.80
C1-867	635 ± 53.42	602 ± 44.47	115.97 ± 19.80	109.94 ± 18.80
C1-803	170 ± 20.83		31.05 ± 5.30	
C1-890	393 ± 36.17	298 ± 30.69	71.77 ± 12.30	54.42 ± 9.30
C1-868	216 ± 24.35	228 ± 25.61	39.45 ± 6.70	41.64 ± 7.10
C1-546	931 ± 60.60	1029 ± 55.38	170.00 ± 29.10	188.00 ± 32.10
C1-576		793 ± 55.49		144.82 ± 24.80
C4-524	164 ± 21.80	142 ± 25.01	32.45 ± 5.50	28.09 ± 4.90
C4-507	325 ± 33.97		64.30 ± 11.00	
W1-498	321 ± 38.31	378 ± 41.96	63.51 ± 10.90	69.00 ± 11.80
W1-540	360 ± 40.24	231 ± 24.54	68.93 ± 11.80	39.00 ± 6.70
W1-583	326 ± 37.64	1133 ± 27.01	64.50 ± 11.10	54.57 ± 9.30
W1-847		254 ± 26.00		48.60 ± 8.30
W2-562	365 ± 30.55		72.21 ± 12.30	
W4-565	318 ± 29.76	293 ± 27.53	60.89 ± 10.40	52.70 ± 9.00
W4-566	315 ± 31.73	321 ± 38.31	69.25 ± 11.80	64.00 ± 10.00
W4-521	67 ± 15.77	105 ± 16.55	10.90 ± 2.00	20.00 ± 3.50
W4-563	347 ± 30.26	243 ± 33.33	56.43 ± 9.60	47.00 ± 8.00
W4-793-2	411 ± 32.78		78.69 ± 13.50	
W3-500	111 ± 22.10	159 ± 20.77	21.60 ± 3.80	29.00 ± 5.00
W3-513	411 ± 32.43	125 ± 18.12	68.72 ± 11.70	22.00 ± 3.80
W3-526	226 ± 31.57		44.71 ± 7.70	
W3-591-2	711 ± 44.51		134.00 ± 22.90	
w-851		213 ± 23.36		40.00 ± 6.90
W3-509	117 ± 22.94		23.15 ± 4.10	
S4-620		743 ± 44.50		135.70 ± 23.20
S4-539	374 ± 32.26		73.99 ± 12.60	
S4-620-1	743 ± 44.50	372 ± 30.88	135.7 ± 23.20	130.20 ± 22.00
S1-582	293 ± 27.38	250 ± 29.21	57.97 ± 9.90	47.00 ± 8.10
S4-560	259 ± 25.77		50.40 ± 8.60	
S4-824		466 ± 42.85		89.22 ± 15.30
S2-497	157 ± 20.03		20.71 ± 3.50	
S1-571-2	158 ± 20.52		28.86 ± 4.90	
S1-517	376 ± 41.46		76.96 ± 13.20	
S1-585		744 ± 44.09		152.00 ± 26.00
S3-502	154 ± 20.38	160 ± 20.40	26.12 ± 4.50	27.10 ± 4.60
S3-522-3	301 ± 27.90		51.00 ± 18.57	
S1-581	312 ± 28.71	225 ± 24.37	60.72 ± 10.40	42.00 ± 7.30
S1-536	236 ± 24.94	334 ± 29.67	45.93 ± 7.80	63.00 ± 10.70
S1-794		431 ± 35.01		81.00 ± 13.90
S4-499	257 ± 33.10	131 ± 18.31	52.60 ± 9.00	23.56 ± 4.00
S1-619	170 ± 20.83		22.18 ± 3.80	
S1-639	224 ± 30.39	224 ± 30.39	42.89 ± 7.40	75.50 ± 12.90
S1-891	331 ± 29.12	331 ± 29.12	75.50 ± 12.90	40.60 ± 6.90
SJ1-558	326 ± 28.90	395 ± 31.82	54.51 ± 9.30	68.96 ± 11.80
SJ3-520	447 ± 34.52		85.58 ± 14.60	
SJ2-559	280 ± 35.76	196 ± 30.21	48.17 ± 8.30	34.00 ± 5.90
SJ1-828		79 ± 18.03		14.00 ± 2.50
SJ1-580	403 ± 32.13		73.60 ± 12.60	
SJ1-537	382 ± 33.35		146.10 ± 15.00	
Ss6-564	335 ± 29.60	45 ± 10.90	58.48 ± 10.00	8.90 ± 1.60
Ss7-557	331 ± 29.12	113 ± 17.31	53.83 ± 9.20	23.95 ± 4.10
Ss8-535	149 ± 21.40	124 ± 23.79	25.27 ± 4.30	21.00 ± 3.70
Ss8-535b	129 ± 18.70		21.88 ± 17.50	
Ss6-544	267 ± 26.15	207 ± 23.26	53.72 ± 9.20	36.68 ± 6.30
Ss6-596-2	379 ± 31.61		73.75 ± 12.60	
Ss1-515	400 ± 32.03	210 ± 29.91	77.84 ± 13.30	39.57 ± 6.80
Ss1-543	320 ± 29.69	273 ± 26.68	62.27 ± 10.70	51.00 ± 8.80
Ss7-542	297 ± 28.14	321 ± 32.05	57.80 ± 9.90	41.87 ± 7.20
SJ2-849	252 ± 25.50		42.70 ± 7.3	

Código	Densidad (Tr/cm <sup>2</sup> )				Concentración (Bq/m <sup>3</sup> )			
	A		B		A		B	
LR-115								
C5-635			62.86 ± 18				45.58 ± 13.13	
C1-541	73.23 ± 17.88	93.88 ± 17.9	93.88 ± 17.9	51.33 ± 13	93.88 ± 17.94			
C7-516	93.88 ± 17.94	89.74 ± 17.9	89.74 ± 17.9	68.07 ± 13	56.33 ± 11.34			
C3-519	59.72 ± 17.88	55.97 ± 17.8	55.97 ± 17.8	37.48 ± 11	36.78 ± 11.76			
C4-584	106.25 ± 17.88	67.86 ± 17.8	67.86 ± 17.8	66.69 ± 11	44.59 ± 11.78			
C4-538	104.75 ± 17.88	76.77 ± 17.8	76.77 ± 17.8	65.75 ± 11	48.92 ± 11.45			
C4-496	113.59 ± 17.94	104.5 ± 17.9	104.5 ± 17.9	71.3 ± 11	66.58 ± 11.6			
C3-518	79.19 ± 18.08	33.67 ± 17.8	33.67 ± 17.8	53.71 ± 12	20.23 ± 10.72			
C4-588	99.94 ± 17.94	86.74 ± 17.9	86.74 ± 17.9	63.68 ± 12	55.27 ± 11.51			
C4-579	137.7 ± 31.3	82.78 ± 18	82.78 ± 18	87.74 ± 20	56.15 ± 12.33			
C7-616	71.13 ± 17.94			40.42 ± 10				
C7-634	72.31 ± 17.82	72.31 ± 17.8	72.31 ± 17.8	41.09 ± 10	41.09 ± 10.2			
C7-618	73.11 ± 18.42	110.2 ± 18.1	110.2 ± 18.1	43.92 ± 11	66.17 ± 11.03			
C7-621	47.05 ± 17.82			28.27 ± 11				
C3-597	101.75 ± 17.88	106.3 ± 17.9	106.3 ± 17.9	61.13 ± 11	67.7 ± 11.56			
C2-548	84.78 ± 17.94	85.69 ± 17.8	85.69 ± 17.8	54.02 ± 12	51.48 ± 10.81			
C2-612	80.74 ± 17.88	66.37 ± 17.8	66.37 ± 17.8	51.45 ± 11	42.29 ± 11.42			
C1-592		94.61 ± 17.8	94.61 ± 17.8		60.28 ± 11.49			
C1-867	96.09 ± 17.82	70.52 ± 18	70.52 ± 18	62.17 ± 12	45.62 ± 11.73			
C1-803	96.91 ± 17.94			62.7 ± 12				
C1-890	91.24 ± 17.88	81.23 ± 17.8	81.23 ± 17.8	59.03 ± 12	52.55 ± 11.63			
C1-868	95.03 ± 18.01	121.3 ± 17.9	121.3 ± 17.9	61.48 ± 12	78.46 ± 11.79			
C1-546	69.34 ± 17.82	90.44 ± 18	90.44 ± 18	44.86 ± 12	58.51 ± 11.78			
C1-576	64.88 ± 17.82			41.98 ± 12				
C4-524	92.36 ± 17.94	83.74 ± 17.9	83.74 ± 17.9	64.73 ± 13	58.69 ± 12.65			
C4-507	78.26 ± 17.82			54.85 ± 13				
W1-498	137.7 ± 31.3	99.94 ± 17.9	99.94 ± 17.9	96.51 ± 22	64.66 ± 11.76			
W1-540	164.45 ± 31.3	104.2 ± 18	104.2 ± 18	111.5 ± 21	62.62 ± 10.97			
W1-583	70.23 ± 17.88	61.33 ± 18	61.33 ± 18	49.22 ± 13	41.6 ± 12.28			
W2-562	72.65 ± 17.94	57.45 ± 17.8	57.45 ± 17.8	50.92 ± 13	37.17 ± 11.58			
W4-565	142.66 ± 31.89	50.02 ± 17.8	50.02 ± 17.8	96.76 ± 22	31.87 ± 11.39			
W4-521	139.37 ± 31.59	183.1 ± 32.8	183.1 ± 32.8	80.29 ± 18	124.2 ± 22.57			
W4-563	86.3 ± 17.94	76.77 ± 17.8	76.77 ± 17.8	49.72 ± 10	52.07 ± 12.18			
W4-793-2		79.23 ± 17.9	79.23 ± 17.9		53.74 ± 12.23			
W3-500	96.09 ± 17.82	80.74 ± 17.9	80.74 ± 17.9	66.24 ± 12	52.24 ± 11.67			
W3-513	110.15 ± 18.08	55.97 ± 17.9	55.97 ± 17.9	65.24 ± 11	35.13 ± 11.31			
W3-526	66.37 ± 17.82			46.52 ± 13				
W3-591-2	65.72 ± 17.88	71.73 ± 17.9	71.73 ± 17.9	42.52 ± 12	47.88 ± 12.02			
W3-509	83.74 ± 17.88			58.69 ± 13				
S4-539	133.24 ± 31.3			93.39 ± 22				
S1-582	64.88 ± 17.82			45.47 ± 13				
S4-560	119.55 ± 18.01	63.4 ± 17.8	63.4 ± 17.8	82.42 ± 13	43 ± 12.15			
S4-824-3	63.4 ± 17.82			43 ± 12				
S1-517	83.83 ± 18.08			60.78 ± 13				
S1-585	139.37 ± 17.94			101.1 ± 13				
S5-586		54.48 ± 17.8	54.48 ± 17.8		32.73 ± 10.75			
S3-522-3	103.68 ± 18.14			57.37 ± 10				
S1-581	78.18 ± 18.01	87.37 ± 18	87.37 ± 18	53.9 ± 13	58.32 ± 12.14			
S1-536	109.04 ± 17.94	78.26 ± 17.8	78.26 ± 17.8	75.17 ± 13	52.24 ± 11.99			
S1-794	82.24 ± 17.88			54.9 ± 12				
S4-499	100.25 ± 17.88	49.07 ± 18	49.07 ± 18	72.69 ± 13	31.27 ± 11.51			
S1-619	63.55 ± 17.94			29.37 ± 8.3				
S1-639	77.2 ± 17.94	48.54 ± 17.8	48.54 ± 17.8	52.36 ± 12	34.6 ± 12.74			
S1-891	60.42 ± 17.82	71.73 ± 17.9	71.73 ± 17.9	30.25 ± 9	35.91 ± 9.01			
S1-855	85.24 ± 17.88			59.74 ± 13				
SJ1-558	81.23 ± 17.82	88.91 ± 18	88.91 ± 18	48.11 ± 11	54.99 ± 11.25			
SJ3-520	92.36 ± 17.94			62.65 ± 12				
SJ2-559		61.22 ± 17.9	61.22 ± 17.9		37.86 ± 11.11			
SJ1-828	79.23 ± 17.88			49.73 ± 11				
SJ1-580	139.47 ± 31.74			90.23 ± 21				
SJ1-537	107.98 ± 17.82			76.97 ± 13				
Ss6-564	92.36 ± 17.94	96.09 ± 17.8	96.09 ± 17.8	57.12 ± 11	67.35 ± 12.64			
Ss7-557	166.3 ± 31.45			95.8 ± 18				
Ss8-535	31 ± 17.82	27.73 ± 17.8	27.73 ± 17.8	70.44 ± 10	16.66 ± 10.72			
Ss8-535b	52.87 ± 18.08			31.76 ± 11				
Ss6-544	76.77 ± 17.82	99.06 ± 17.8	99.06 ± 17.8	54.72 ± 13	62.18 ± 11.33			
Ss6-596-2	73.23 ± 17.88			50.48 ± 12				
Ss1-515		72.99 ± 18.1	72.99 ± 18.1		48.72 ± 12.15			
Ss1-543		94.25 ± 17.9	94.25 ± 17.9		62.91 ± 12.08			
Ss7-542		51.51 ± 17.8	51.51 ± 17.8		23.80 ± 8.26			
Ss7-636		63.4 ± 17.8	63.4 ± 17.8		29.3 ± 8.28			

## ANEXO 4: REPORTE DE AIRTHINGS

# Corentium Home Radon Report

Report generated for period 09/19/21 to 10/21/21


**Address**

Av. 10  
Cusco 08006  
Perú

**Building type**

House

**Building year**

1980

**Room type**

Other

**Floor**

1st floor

**Measured value**

4.4 ± 0.7 pCi/L

**Days measured**

32

Radon is a naturally occurring gas that enters buildings through cracks in floors or walls, construction joints, or gaps in foundations around pipes, wires or pumps. If the gas cannot escape from the building, the concentration builds up to dangerous levels. Radon gas exposure is the leading cause of lung cancer among non-smokers.

## Radon level



**4.4** pCi/L

## Comment

The Radon level is above the recommended action level of 2.7 pCi/L. You can make actions yourself or consult a professional to reduce the radon level. After the remedial actions has been set in please we recommend measuring in the same location again to indicate if the actions taken are efficient. For more info on radon and possible actions to take check out <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.

Generated: 10/21/21 9:32 PM  
Measurement by: SOCIO ARTEAGA CIJRE  
Report id: fba742a8-7e13-4a92-a3c6-456d2a62cfc

Sampling method: Passive diffusion chamber  
Measurement method: Continuous alpha spectrometry  
Serial number: 2302137992

Measurement value is stated as the measured radon concentration ± estimated measurement uncertainty (2 Standard Deviations).  
Minimum detectable activity concentration is 0.08 pCi/L with 60 days measurement.

The purpose of this report is to provide insight to help optimize radon mitigation actions. There is an uncertainty with any radon measurement result due to statistical variations in radiation, and other factors such as conditions which change daily and seasonally which can cause variations in indoor radon levels. These conditions can change based on the weather, the use or misuse of appliances, systems, and components of the structure or tampering with the radon test.

The end user, who generated this report or who had this report generated on their behalf, hold full liability for any incorrect or inaccurate measurement results, which could be consequent of, but not limited to, use of the measurement device not in accordance with the guidelines issued by Airthings or any guidelines issued from local authorities, and use of the measurement device that is not fully functional due to misuse or mishandling by the user.

Airthings is not responsible for the usage of this report in connection with any third party agreements or transactions. Airthings does not guarantee that this report will satisfy any regulations required for public use of this report. Airthings, its employees and agents are not responsible for the consequences of any action taken or not taken based upon the results reported or any communicated interpretation of the results.

## ANEXO 5: ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL DETECTOR CR-39

### TASTRAK performance sheet

#### Alpha-particles

##### General description

Main composition: Polyallyl diglycol carbonate (PADC):



- Appearance: Clear, colourless, rigid plastic
- Density: 1.30 g.cm<sup>-3</sup>
- Thicknesses: 0.75, 1.0 and 1.5 mm
- Specialist thicknesses: 100 - 200 µm and 500 µm
- Tested for background and α-particle response

##### Mode of action

When an α-particle enters the TASTRAK plastic track detector, it creates a trail of damage along its path. This damage is invisible but may be revealed by chemical etching. Figure 1 shows the typical evolution of etch track when the detector is immersed in 6.25 M NaOH at 98°. The bulk plastic is etched at a characteristic bulk etching rate,  $V_b$ , but preferential etching takes place along the axis of the particle track at a characteristic track etching rate  $V_t$ . Each horizontal profile represents the vertical section of the post-etch surface across the track at a given etch time.

Figure 2 shows a microscope view of a typical α-particle etch track for two quite different etch times in 6.25 M NaOH at 98°C. The tracks on the right were etched for 1 h and display the characteristic cone-like structure. Continued etching results in larger tracks but track structure is progressively lost. The track on the left was etched for 5 h.

In practice, α-particles enter the detector at a variety of angles and residual range. Figure 3 shows typical resultant tracks for the 1 h etch time in Figure 2. They display a variety of etch geometries. When viewed in projection under the microscope, the distribution of longest versus minor axis track sizes fall into a well-defined acceptance envelope - Figure 4. For these particular etch conditions, the maximum minor axis diameter of etched tracks is approximately 20 µm. Longer etch times produce larger tracks, but structural features of the track geometry will become progressively lost.



Fig 1: Growth of etch track along latent α-particle track.

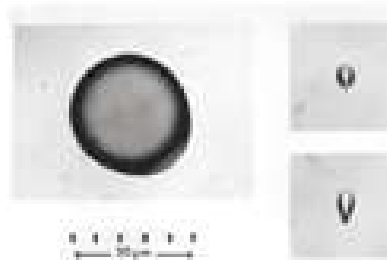


Fig 2: Example α-particle etch tracks for quite different etch times

[www.tasl.co.uk](http://www.tasl.co.uk)

Tel: +44 (0) 117 938 1172

©Track Analysis Systems





Fig 3. photographs of  $\alpha$ -particle tracks in TASTRAK plastic

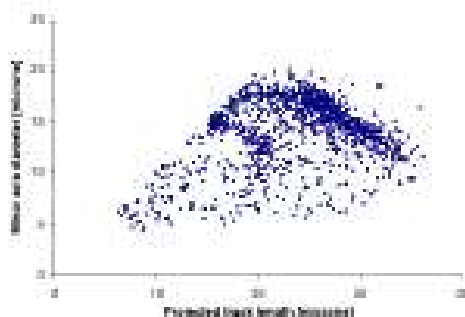


Figure 4. Acceptance envelope of etch track sizes

#### Technical specification

$V_1$  varies as a function  $\alpha$ -particle residual range in the plastic - Figure 5. As etching progresses up to the etch time employed, all etch track geometries result from the variation along the  $\alpha$ -particle track of the ratio  $V_1/V_0$  and any enlargement once track etching has reached the end of the particle range.

The basic requirement for revealing  $\alpha$ -particle tracks is:  $V_0 \sin \delta > V_1$ , where  $\delta$  is the incident dip angle of the track. This means that like all plastic track detectors, TASTRAK possess a cut-off dip angle for track detection. From Figure 5 this depends on  $\alpha$ -particle residual range in the

plastic and the etch conditions employed. The limiting value for  $\alpha$ -particles is  $20^\circ$ .

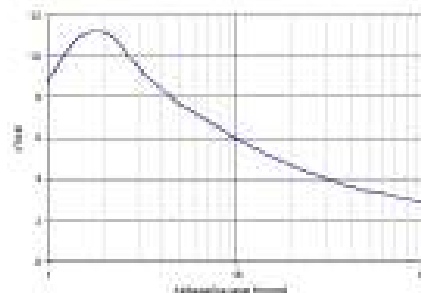


Fig 5 Typical  $V_1$ -residual range curve for  $\alpha$ -particle tracks in TASTRAK plastic

#### Response specification.

- All natural  $\alpha$ -particles are recorded at their full energy in the detector, with a limiting cut-off angle of  $20^\circ$  for our standard recommended etch conditions.
- Response is fully isotropic within the angular cut-off window.
- Typical bulk etch rate,  $V_0$  in 6.25 M NaOH:  $1.8 \mu\text{m. h}^{-1}$  at  $75^\circ\text{C}$ ;  $10 \mu\text{m. h}^{-1}$  at  $98^\circ\text{C}$ .
- Typical track-to-bulk etch rate ratio at  $10 \mu\text{m}$   $\alpha$ -particle residual range,  $V_{100}/V_0$ : 6.0.

#### Recommended etch conditions for radon detectors.

- Etchant: 6.25 M NaOH
- Etch times: 6 hours at  $75^\circ\text{C}$  or 1 hour at  $98^\circ\text{C}$

These recommendations match the standard settings of the TASTRAK radon dosimetry system. For other read-out systems, etch times and etchant concentrations may be chosen according to user preference.

[www.tasl.co.uk](http://www.tasl.co.uk)

Tel: +44 (0) 117 938 1172

©Track Analysis Systems

## ANEXO 6: ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL MONITOR CORENTIUM HOME DE AIRTHINGS

### Tech specs

#### Product features

- **Power supply:**  
3 x AAA alkaline batteries (LR03)  
2 years battery life
- **Dimensions:** 4.7 x 2.7 x 1.0 inches / 120mm x 69mm x 25.5mm
- **Weight:** 5.2 ounces / 130g (with batteries)
- **Operation environment:**  
Temperature: 39°F to 104°F / 4°C to 40°C  
Relative Humidity: < 85%

<https://www.airthings.com/home#tabs-accordion>)