



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

**“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE EXHALACIÓN
MÁSICO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN MÁS
USADOS EN EL CANTÓN RIOBAMBA.”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

BIOFÍSICA

AUTORA: DAMARIS DALILA HIDROVO CALLE

TUTORA: Biof. TALIA TENE FERNANDEZ, Ph. D

Riobamba-Ecuador
2019

@2019, Damaris Dalila Hidrovo Calle

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE BIOFÍSICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: experimental **“Determinación del coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más usados en el cantón Riobamba”**, de responsabilidad de la Señorita Damaris Dalila Hidrovo Calle, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Gabriela Tubón

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Biof. Talia Tene Fernández Ph. D

DIRECTORA DE TESIS

Biof. María Fernanda Heredia

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Yo, DAMARIS DALILA HIDROVO CALLE soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Damaris Dalila Hidrovo Calle

DEDICATORIA

A mis padres William y Neri por ser un ejemplo de perseverancia y constancia y haberme demostrado que con esfuerzo se puede lograr grandes cosas y alcanzar cada meta, por ser el apoyo que más necesite en todo momento de mi carrera, por estar ahí cuando más la necesitaba y ser mi fortaleza para seguir adelante, han sido las personas más influyentes en mi vida y en mi educación tanto académica como de la vida.

A mis hermanitos María y Elías por ser mi inspiración y el motivo para seguir adelante, los amo y les agradezco por todas las alegrías que me han brindado.

A mis tíos y tías que de cierta manera me apoyaron para lograr esta meta, me han brindado su apoyo incondicional y han sido de gran importancia en mi vida estudiantil.

A mis maestros que han sido un ejemplo de superación, Dra. Talia Tene y Dra. Jenny Orbe no solo han sido un ejemplo de superación sino un ejemplo de mujeres fuertes y valientes que han luchado por su familia y sus profesiones, les agradezco por ser un gran apoyo en la elaboración de este trabajo y en toda mi etapa como estudiante.

A mi esposo Edison por ser el pilar de mi vida por brindarme su amor y apoyo incondicional en cada una de mis etapas como estudiante y como persona.

Dali

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por permitirme cumplir una de mis metas, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para seguir adelante y poder llegar hasta este punto en mi vida.

También quiero agradecer de manera significativa a mis padres Neri y William por darme su apoyo y por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado.

Extiendo mi agradecimiento a todos los docentes de FIMA de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ya que sin su paciencia constancia y vocación nosotros como estudiantes no hubiésemos podido llegar hasta este punto de nuestra vida profesional, en especial quiero agradecer a la Dra. Jenny Orbe y Dra. Talia Tene por ser quienes me supieron guiar y aconsejar en cada proceso en que se realizó este trabajo.

Dali

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| RESUMEN | XII |
| ABSTRACT | XIII |
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO I | |
| 1.1. Antecedentes | 2 |
| 1.2. Planteamiento del problema. | 3 |
| 1.3. Justificación | 4 |
| 1.4. Objetivos | 5 |
| 1.4.1. <i>Objetivo General</i> | 5 |
| 1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> | 5 |
| CAPITULO II | |
| 2.1. Generalidades del Radón. | 6 |
| 2.1.1. <i>El Radón.</i> | 6 |
| 2.1.2. <i>Mecanismo de transporte del radón.</i> | 9 |
| 2.2. Modelos biológicos de absorción de elementos radiactivos | 11 |
| 2.2.1. <i>Efectos del Radón en la salud humana.</i> | 11 |
| 2.2.2. <i>Efectos biológicos de la exposición al radón y a sus productos de desintegración.</i> | 13 |
| 2.2.3. <i>Riesgos del ²²²Rn.</i> | 15 |
| 2.2.4. <i>Recomendaciones y leyes sobre el radón en todo el mundo.</i> | 16 |
| 2.3. Magnitudes Radiométricas usadas para medir radón. | 17 |
| 2.3.1. <i>Concentración de Radio, C_{Ra}</i> | 17 |
| 2.3.2. <i>Tasa de emanación, J</i> | 18 |
| 2.3.3. <i>Fracción de emanación de radón, f</i> | 18 |
| 2.3.4. <i>Fracción de exhalación a emanación, g</i> | 18 |
| 2.3.5. <i>Tasa de exhalación, E</i> | 19 |
| 2.3.6. <i>Fracción de exhalación de radón, h</i> | 20 |
| 2.3.7. <i>Difusividad, D</i> | 20 |
| 2.4. Radón en materiales de construcción | 21 |
| 2.4.1. <i>Influencia de la edad del material y de la cantidad de humedad presente.</i> | 21 |
| 2.4.2. <i>Base de datos de reportes de coeficiente másico y superficial de ²²²Rn</i> | 23 |
| 2.4.3. <i>Detectores de ²²²Rn.</i> | 30 |
| 2.5. Método de la cámara cerrada. | 38 |

| | |
|--|----|
| 2.5.1. <i>Concentración de ^{222}Rn dentro de la cámara (muestra dentro de la cámara).</i> | 40 |
| 2.5.2. <i>Determinación de la tasa de fuga de la cámara, λL.</i> | 41 |
| 2.5.3. <i>Determinación de la tasa de exhalación de radón, E.</i> | 42 |
| 2.5.4. <i>Dosis efectiva, D_a.</i> | 44 |
| 2.5.5. <i>Fondo, CBg.</i> | 45 |
| 2.6. Descripción del área de estudio. | 45 |
| CAPITULO III | |
| 3.1. Procedimiento experimental | 51 |
| 3.1.1. <i>Construcción de la Cámara cerrada.</i> | 52 |
| 3.2. Selección de la Muestra. | 53 |
| 3.3. Determinación la Concentración de fondo de laboratorio, CBg. | 55 |
| 3.4. Determinación la Tasa de fuga de la cámara, λRn. | 56 |
| 3.5. Determinación de la Concentración de radón dentro de la cámara, $C(t)$ | 57 |
| 3.6. Determinación de la Tasa de Dosis Anual. | 64 |
| CAPITULO IV | |
| 4.1. Fondo del laboratorio. | 66 |
| 4.2. Tasa De Fuga. | 66 |
| 4.3. Coefficiente de exhalación másico de los materiales de construcción. | 66 |
| 4.4. Dosis efectiva anual. | 69 |
| CONCLUSIONES. | 71 |
| RECOMENDACIONES. | 73 |
| BIBLIOGRAFIA | |
| ANEXOS | |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1-2: Principales propiedades físicas y químicas de Radón..... | 6 |
| Tabla 2-2: Propiedades relevantes de los isótopos, Rn-219, Rn-220 y Rn-222..... | 7 |
| Tabla 3-2: Concentración de actividad natural de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K | 24 |
| Tabla 4-2: Concentración de actividad natural de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K (Bqkg-1) | 25 |
| Tabla 5-2: Tasa de exhalación específica de radón y fracción de emanación | 28 |
| Tabla 6-2: Actividades específicas de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K | 29 |
| Tabla 7-2: Funcionalidad del RAD7..... | 34 |
| Tabla 8-2: Especificaciones técnicas de RAD7..... | 35 |
| Tabla 9-2: Valores de la disipación de energía por par de iones para diferentes gases..... | 36 |
| Tabla 1-3: Parámetros para el cálculo de la tasa de fuga de la cámara..... | 55 |
| Tabla 2-3: Parámetros para el cálculo de la tasa de fuga de la cámara..... | 57 |
| Tabla 3-3: Tasa de fuga de la cámara del laboratorio de técnicas nucleares | 58 |
| Tabla 4-3: Comparación de los dos métodos de cálculo del coeficiente de exhalación másico ... | 63 |
| Tabla 5-3: Parámetros para el cálculo de coeficiente másico de exhalación | 64 |
| Tabla 6-3: Coeficiente másico de exhalación obtenido con el método de la cámara cerrada..... | 65 |
| Tabla 7-3: Coeficiente de exhalación superficial de los materiales | 65 |
| Tabla 8-3: Dosis que aportan los diferentes materiales de construcción analizados al año..... | 66 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1-1: Estimación del valor promedio de la exposición mundial a radiación ionizante... | 4 |
| Figura 1-2: Esquema de decaimiento de Rn-222..... | 8 |
| Figura 2-2: Cadenas de decaimiento radiactivo natural del U-238..... | 8 |
| Figura 3-2: Emanación de radón desde el grano del mineral..... | 10 |
| Figura 4-2: Proceso de transporte de radón hasta ser liberado en la atmosfera..... | 11 |
| Figura 5-2: Transporte de los productos de desintegración de radón..... | 12 |
| Figura 6-2: Desarrollo de las células malignas a partir del daño inicial de partículas α | 14 |
| Figura 7-2: Esquema de como el Radón ingresa a una casa..... | 23 |
| Figura 8-2: Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador..... | 31 |
| Figura 9-2: Estructura de bandas para energías de electrones en aisladores..... | 32 |
| Figura 10-2: Configuración experimental del RAD7 para toma de muestras en aire..... | 33 |
| Figura 11-2: Partes externas del Detector RAD7..... | 34 |
| Figura 12-2: Esquema interno de un E-PERM..... | 38 |
| Figura 13-2: Mapa del cantón Riobamba..... | 46 |
| Figura 14-2: Tejas de arcilla..... | 47 |
| Figura 15-2: Arena de rio..... | 48 |
| Figura 16-2: Proceso de elaboración de bloque en el cantón Riobamba..... | 48 |
| Figura 17-2: Proceso de elaboración de ladrillo..... | 49 |
| Figura 18-2: Horno donde se lleva el proceso de cocción de los adobes..... | 50 |
| Figura 1-3: Procedimiento experimental..... | 51 |
| Figura 2-3: Esquema de la cámara cerrada..... | 52 |
| Figura 3-3: Configuración experimental del método de la cámara cerrada..... | 53 |
| Figura 4-3: Almacenamiento del bloque | 55 |
| Figura 5-3: Configuración experimental para medir el fondo del Laboratorio..... | 55 |

INDICE DE GRAFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfica 1-3: Fondo natural del laboratorio de técnicas nucleares..... | 56 |
| Grafica 2-3: Disminución exponencial de la concentración de ^{222}Rn | 57 |
| Gráfica 3-3: A: Concentración de ^{222}Rn en (B1), B: Concentración de ^{222}Rn en (B2)..... | 58 |
| Gráfica 4-3: C: Concentración de ^{222}Rn en (B3), D: Concentración de ^{222}Rn en (B4)..... | 59 |
| Gráfica 5-3: Concentración de ^{222}Rn en Bloque de concreto (C1)..... | 59 |
| Gráfica 6-3: Concentración de ^{222}Rn en A: (G1), B: (G2) C: (G3)..... | 77 |
| Gráfica 7-3: A: Concentración de ^{222}Rn en (L1), B: Concentración de ^{222}Rn en (L2)..... | 60 |
| Gráfica 8-3: C: Concentración de ^{222}Rn en Ladrillo (L3)..... | 61 |
| Gráfica 9-3: Concentración de ^{222}Rn en Puzolana A: (P1). B: (RB1), C: (SF1)..... | 62 |
| Grafico 1-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción analizados.... | 67 |
| Grafico 2-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales analizados excepto SF1..... | 67 |
| Grafico 3-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción actuales..... | 68 |
| Grafico 4-4: Promedio de coeficiente de exhalación másico | 68 |
| Grafico 5-4: Tasa de dosis anual..... | 69 |
| Grafico 6-4: Promedio de tasa de dosis anual de los materiales de construcción | 70 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------------------|--|
| UNSCEAR | United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation |
| ICRP | International Commission on Radiological Protection |
| OIEA | International Atomic Energy Agency |
| IARC | International Agency for Research of Cancer |
| OMS | Organización Mundial de la Salud |
| Bq/m ³ | Bequerelio por metro cúbico |
| λ_{Rn} | Constante de desintegración del radón |
| λ_{leak} | Tasa de fuga |
| λ_{eff} | Constante de decaimiento efectiva |
| C_{Bg} | Concentración de Background, Fondo radiactivo característico |
| ²³⁵ U | Uranio 235 |
| ²³⁸ U | Uranio 238 |
| ²³² Th | Torio 232 |
| ²²² Rn | Radón |
| ²²⁰ Rn | Torón |
| ²¹⁹ Rn | Actinon |
| ²²⁶ Ra | Radio 226 |
| RDP | Productos de desintegración del radón |

RESUMEN

Se ha determinado el coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más usados en el cantón Riobamba, para lo cual se procedió a realizar una clasificación de dichos materiales, se caracterizó la configuración experimental para realizar este trabajo, además se realizó el cálculo de la tasa de dosis debido a la concentración de material radiactivo en los materiales de construcción. El método utilizado en este estudio es el denominado la cámara cerrada, el cual consiste en introducir una muestra en una cámara de vidrio templado por aproximadamente 3 días, y con la ayuda de un detector de radón Rad7 se logra determinar la concentración de ^{222}Rn dentro de la cámara. Gracias a la información brindada por parte del Ministerio de Vivienda y Urbanización (MIDUVI) y del Instituto Nacional de estadísticas y censos (INEC) acerca de los materiales de construcción más utilizados en una vivienda estándar en la provincia de Chimborazo y el Cantón Riobamba, se logró clasificar los materiales de construcción que se utilizaron en este estudio, también se decidió realizar un análisis a ciertos materiales de construcción tradicionales, uno de una iglesia ubicada en el Cantón Riobamba y de un colegio perteneciente al Cantón Riobamba. Se caracterizó la configuración experimental mediante el cálculo de la tasa de fuga de la cámara la cual es de 0,0051 (horas-1) (24%). Las concentraciones de ^{222}Rn ha sido muy baja en varios materiales de construcción usados en la actualidad sobre todo en los ladrillos, las muestras de concreto y granito, por otro lado los materiales de construcción tradicionales han mostrado valores un poco elevados, la exhalación de la muestra de la roca del Auditorio del Colegio fue mucho mayor a comparación de las otras muestras analizadas, las tasas de dosis de los materiales de construcción que se utilizan en la actualidad no sobrepasan lo recomendado por UNSCEAR de 1,1 mSv/año, pero en el caso de la roca del Colegio es de 1.25 mSv/año, sobrepasando así lo recomendado.

Palabras clave: <BIOFISICA>, <PROTECCION RADIOLOGICA>, <RADIACIÓN NATURAL>, <EXHALACIÓN DE RADÓN>, <TASA DE FUGA>. <DOSIS EFECTIVA DE RADÓN > <MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN >, <RADON>, <RAD7>, <RIOBAMBA (CANTÓN)>.

ABSTRACT

The mass exhalation coefficient of the most used construction materials in the Riobamba canton has been determined, for which a classification of these materials was carried out, the experimental configuration for this work was characterized, and the dose rate was calculated due to the concentration of radioactive material in the construction materials. The method used in this study is called the closed chamber, which consists of introducing a sample in a tempered glass chamber for approximately 3 days, and with the help of a Rad7 radon detector it is possible to determine the concentration of ^{222}Rn inside the chamber. Thanks to the information provided by the Ministry of Housing and Urbanization (MIDUVI) and INEC about the construction materials most used in a standard house in the Chimborazo province and the Riobamba Canton, it was possible to classify the construction materials that were used in this study, it was also decided to make an analysis to certain traditional construction materials, one of a church located in the Riobamba canton and of a high school belonging to the Riobamba canton. The experimental configuration was characterized by calculating the leakage rate of the chamber which is 0.0051 (h1) (24%). Concentrations of ^{222}Rn have been very low in several construction materials used today especially in bricks, concrete and granite samples. On the other hand traditional construction materials have shown a little high values, the exhalation of the rock sample from the high school auditorium was much higher compared to the other samples analyzed, the dose rates of the building materials currently used do not exceed the UNSCEAR recommendation of 1,1 mSv/year, but in the case of the high school rock it is 1.25 mSv/year, thus exceeding the recommendation.

Keywords: BIOPHYSICAL, RADIOLOGICAL PROTECTION, NATURAL RADIATION, RADON EXHALATION, LEAK RATE, EFFECTIVE RADON DOSE, CONSTRUCTION MATERIALS, RADON, RAD7, RIOBAMBA (CANTON).

INTRODUCCION

En nuestro planeta estamos expuestos a radiactividad natural, ya que encontramos varias fuentes emisoras, sin necesidad de intervención de la mano del hombre, entre las más relevantes fuentes de radiación natural, podemos mencionar al radón, el mismo que contribuye en promedio, un 50% a la exposición de radiación ionizante total que reciben los seres humanos. Por varias décadas se ha estudiado los efectos del isótopo ^{222}Rn (de ahora en adelante llamando radón) en las personas, sobre todo en las que se encuentran en constante contacto con el mismo, determinando así que es uno de los principales causantes cáncer de pulmón. Se han desarrollado diferentes métodos bastante precisos para detectar los niveles de radón presentes en diferentes medios.

En nuestro caso utilizaremos el método de la cámara cerrada o también conocida como “closed chamber”, esta cámara ha sido construida con cuatro láminas de vidrio templado y está ubicada en el laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Como instrumento de detección se tiene un espectrómetro alfa denominado RAD7, el cual es un detector de ^{222}Rn Y ^{220}Rn , muy preciso para estudios en los que se necesite discriminar la energía entre partículas alfa, este equipo nos permitirá detectar y almacenar los datos de los principales materiales de construcción del cantón Riobamba.

En el capítulo I, se puede verificar los antecedentes que tenemos para fundamentar esta investigación, además de una descripción del porque es importante realizar este estudio y poder aplicar normativas que nos permitan llevar un control la metodología usada en otros países por parte de investigadores y por las autoridades reguladoras.

En el capítulo II, encontramos un detalle de los conocimientos básicos necesarios para desarrollar este trabajo, entre los temas a tratar están los efectos biológicos que produce el ^{222}Rn , además de características física de los detectores que se pueden utilizar para este tipo de estudios y una base de datos de trabajos realizados con respecto al coeficiente de exhalación másico de ^{222}Rn .

Para poder tener un enfoque más detallado de toda la parte experimental llevada a cabo, en el capítulo III encontramos una descripción del proceso realizado, como el muestreo de los materiales de construcción, la configuración experimental utilizada, una descripción de los métodos de cálculo del coeficiente de exhalación y otros métodos para obtener los datos.

Para finalizar en el capítulo IV se observa el análisis de los datos obtenidos en este trabajo en la parte experimental, las gráficas de resultados y las conclusiones a las que se ha llegado mediante este trabajo, también se expresan varias recomendaciones a tomar en cuenta para estudios posteriores.

CAPITULO I

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Antecedentes

Podemos encontrar escasos registros de estudios realizados en Ecuador con referencia a la radiactividad natural en materiales de construcción, pero a nivel internacional encontramos un sinnúmero de trabajos enfocados en este tema. A continuación, se presenta un compendio de algunos trabajos expuestos relacionados a el mismo.

Ya que en nuestro trabajo se ha establecido una metodología para estimar las tasas de emanación de radón y las tasas de difusión de retroceso de diferentes materiales de construcción en pruebas de cámara pequeña, es importante mencionar que entre los principales incursores en este estudio están Christopher Chao, Thomas Tung, Daniel Chan y John Burnett que en el año de 1996 en Hong Kong, construyeron dos cámaras las cuales les permitieron observar la diferencia en cuanto a eficiencia y tasa de fuga de las cámaras, utilizando un detector Rad7. Llegaron a la conclusión de que el método de la cámara cerrada es preciso y conveniente para medir las características de emanación de radón de materiales con baja radiación.

Anjos y su equipo de investigación hacen una publicación muy completa sobre muestras brasileñas, el estudio de protección radiológica emplea rocas de granito en baldosas y en revestimientos de interiores, debido a reportes de cantidades de concentraciones de torio, uranio y potasio en varias muestras de granito comercial brasileño. Utilizando espectrometría gamma se realizó un análisis en 110 tipos de muestras, para lo cual previamente se molieron a fin de convertirlas en polvo. Concluyeron que los datos para las concentraciones de torio, uranio y potasio en diferentes tipos de granitos comerciales brasileños muestran que estos cálculos tienen una composición mineralógica sistemática, se recalca que estos granitos están compuestos por mezclas de granos minerales multicolores visibles, pero no están compuestos por minerales que podrían producir altos niveles de tasas de dosis cuando se usan como material de cobertura.

En el año 2005 Tuccimei, Moroni y Norcia en Roma, Italia realizaron una determinación simultánea de las tasas de exhalación ^{222}Rn y ^{220}Rn de los materiales de construcción, para realizar este trabajo utilizaron cámaras de acumulación y un detector de partículas alfa que utiliza una cámara de difusión con un semiconductor de silicio. Los autores demostraron que la

caracterización de la configuración experimental utilizada (tasa de dosis y de retroceso) conduce a una corrección de las tasas de exhalación del radón de aproximadamente en un 30%.

Los registros realizados por Piedecausa y su equipo en el año 2001, quienes analizaron materiales de construcción usados en países europeos como, por ejemplo, el hormigón, el cual dependiendo de su procedencia es posible que sobrepase una exposición de 0.3mSv en cualquier lugar donde se utilicen cantidades masivas, y si a más de ser utilizado en cantidades masivas contiene grandes cantidades de residuos como cenizas volantes o arena natural o de roca rica en radionucleidos naturales llega a sobrepasar el 1mSv. La concentración típica y máxima de actividad en los materiales de construcción y subproductos industriales más comúnmente utilizados como materiales de construcción en la Unión Europea son el hormigón, ladrillos de arcilla roja, cenizas volantes provenientes de la combustión del carbón, el fosfoyeso y pierda natural.

En el distrito de Tiruchirappalli en India en el año 2015 se realizó un estudio sobre la tasa de exhalación de ^{222}Rn en rocas utilizadas como materiales de construcción, este estudio se llevó a cabo por Sankaran Pillai, Shahul Hameed y Mazhar Nazeeba, la técnica de caja cerrada que utiliza el detector de trazas nucleares de estado sólido (SSNTD), se empleó para la medición de la emanación de radón. Las concentraciones de actividad del radón en rocas sedimentarias analizadas oscilaron entre $13.2 \pm 0.7 \text{ Bq/m}^3$. Llegando a la conclusión de que la distribución de la concentración de radón en esta región de estudio no es uniforme, los altos niveles de actividad del radón se encuentran en rocas de tipo granítico (ígneas).

La publicación realizada por Koike et. al (2015) en Japón la cual trato sobre el control de la emisión de radón del granito mediante pruebas de compresión, donde pudieron notar que el contenido de radioelementos en granito es un factor principal para el aumento total en la emisión de ^{222}Rn .

1.2. Planteamiento del problema.

No todos los lugares de la tierra tienen el mismo nivel de radiactividad (UNSCEAR, 2006). En algunas zonas de la India, por ejemplo, la radiactividad es 10 veces mayor que la media europea. La razón está en las arenas de la India, que tienen torio, un elemento radiactivo natural que incrementa el nivel medio de radiación mundial. Los Alpes tienen un nivel de radiactividad relativamente elevado, debido a la composición de sus granitos. Determinadas actividades como, por ejemplo, la fabricación de cerámica y otros materiales de construcción, la producción de fertilizantes, o la extracción de gas y de petróleo, pueden aumentar las dosis debidas a estos radionúclidos de origen natural, no sólo para los trabajadores sino también para el resto de

ciudadanos. Además, en lugares cerrados, fabricados con materiales de construcción de origen natural o volcánico (puzolana, granito, adobe, tufo, piedra pómez, toba, etc.), la exposición debida a radiación natural aumenta, debido a la presencia del gas radón.

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), el radón representa aproximadamente la mitad del promedio mundial de exposición del ser humano a fuentes naturales de radiación. El radón está presente de forma natural en diferentes concentraciones sobre toda la corteza terrestre. Es por esto que, según el país en donde se estudie este gas radiactivo, existen valores distintos como consecuencia de su problemática particular, su capacidad de acción y la sensibilidad pública existente, generando recomendaciones constructivas adaptadas a las características propias del lugar y normativas limitadoras del nivel de radón en edificios antiguos y de nueva construcción (Piedecausa García *et al.*, 2011).

1.3. Justificación

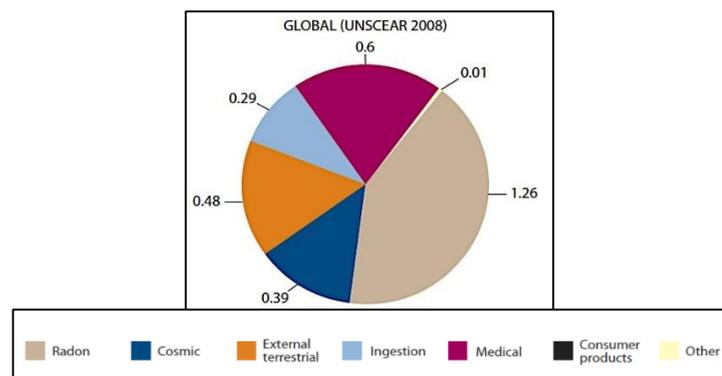


Figura 1-1: Estimación del valor promedio de la exposición mundial a radiación ionizante.

Realizado por: UNSCEAR, 2008

En la ciudad de Riobamba, así como en el resto del mundo las personas se encuentran continuamente expuestas en sus hogares, lugares de trabajo y lugares públicos a la exposición al radón (Ver Figura 1). El radón proviene de varias fuentes, el suelo, el agua subterránea y los materiales de construcción utilizados en la edificación. En la provincia de Chimborazo encontramos varios tipos de suelos los cuales tienen la característica principal de ser de naturaleza volcánica, estos se utilizan para la producción de materiales de construcción como ladrillos y bloques los cuales se encuentran entre los principales materiales de construcción utilizados por los pobladores.

El radón es un emisor de partículas alfa, las cuales son altamente ionizantes, pero poco penetrantes, es por ello que no son peligrosas para los tejidos externos (exposición externa), pero al ser un gas el radón ingresa a las vías respiratorias y decae en el sistema respiratorio, de manera que los productos de vida corta del radón invaden el tracto respiratorio (^{218}Po , ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{214}Po , ^{210}Pb). Estos radioisótopos aparte de ser metales, son emisores alfa, que una vez que han ingresado a cuerpo humano causan daños letales. Según la organización mundial de la salud, si estos metales se acumulan en los pulmones, aumentan la probabilidad de contraer cáncer al pulmón y en el caso de que se acumulen en el sistema digestivo podría ocurrir un envenenamiento por metales.

Estos hechos hacen que la determinación de la concentración de gas radón sea de vital importancia para la salud de la comunidad y que se pueda determinar el incremento de la exposición debida al radón debido a los materiales de construcción en la ciudad de Riobamba.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Determinar el coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción mayormente usados en el cantón Riobamba.

1.4.2. Objetivos específicos

- Clasificación de los materiales de construcción más utilizados en el cantón Riobamba.
- Caracterización (tasa fuga y tasa difusión de retroceso) del setup experimental utilizado para la determinación del coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción.
- Calculo del coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más representativos del cantón Riobamba.
- Estudio del efecto de parámetros ambientales (humedad y temperatura) sobre el coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción.
- Calculo del incremento de tasa de dosis debido al radón que podría estar presente en los materiales analizados.

CAPITULO II

2. MARCO TEORICO.

2.1. Generalidades del Radón.

2.1.1. El Radón.

Se conoce al radón como un gas de origen natural, el cual no tiene olor, color ni sabor, este es un producto radiactivo del radio que se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del uranio, el cual se lo puede encontrar de forma natural en suelos y rocas. El radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite partículas radiactivas.

Tabla 1-2: Principales propiedades físicas y químicas de Radón.

| CARACTERISTICAS | VALOR |
|---|--|
| Punto de ebullición | -62°C |
| Punto de fusión | -71°C |
| Temperatura Critica | +104.5°C |
| Presión Critica | 62.4atm |
| Entalpia de solución | |
| A 0°C | 28.0 kJ/mol |
| A 35°C | 19.7 kJ/mol |
| Densidad de gas a temperatura y presión estándar | 9.73 g/l |
| Densidad de fase liquida | 0.005-0.006 g/l |
| Sección transversal atómica | 0.37 nm |
| Viscosidad a 0°C | 0.021 Pa.s |
| Tensión superficial | 2.9 mN/cm |
| Solubilidad en agua a 0°C | 51.0 cm ³ radón/100 cm ³ de agua |

| | |
|-----------------------------------|--|
| Solubilidad en agua a 25°C | 22.4 cm ³ radón/100 cm ³ de agua |
| Solubilidad en agua a 50°C | 13 cm ³ radón/100 cm ³ de agua |

Fuente: Environmental radon measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program for Ecuador.

Realizado por: Tene, T, 2017

Tabla 2-2: Propiedades relevantes de los isótopos, Rn-219, Rn-220 y Rn-222.

| Parámetros | Símbolo | Rn-222 Radón (Actinon) | Rn-220 Radón (Torón) | Rn-219 Radón |
|---|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Vida media | $T_{1/2}$ | 3.8232 (8) d | 55.8 (3) s | 3.98 (3) s |
| Constante de decaimiento | λ | 2.098 E-6 s ⁻¹ | 1.242E-2 s ⁻¹ | 1.742E-1 s ⁻¹ |
| Energía media de retroceso en la formación. | E_r | 86keV | 103 keV | 104keV |
| Actividad específica | A_m | 5.69E15 Bq/g | 34.00 Bq/g | 478.9E18 Bq/g |
| Coefficiente de difusión en aire | D_a | 1E-5 m ² /s | | |
| Coefficiente de difusión en agua | D_w | 1E-9 m ² /s | | |
| Energía alfa | Q^α | 5590.3 keV | 6404.7 keV | 6946.1 keV |

Fuente: Environmental radon measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program for Ecuador.

Realizado por: Tene, T, 2017

Al aire libre, el radón se diluye rápidamente, tiene concentraciones muy bajas y no suele representar ningún problema. La concentración media de radón al aire libre varía de 5 Bq/m³ a 15 Bq/m³. En cambio, en espacios cerrados, las concentraciones de radón son más elevadas, en especial en lugares como minas, cuevas y plantas de tratamiento de aguas, donde se registran los niveles más altos. En edificios (como viviendas, escuelas y oficinas), las concentraciones de radón varían de <10 Bq/m³ hasta más de 10 000 Bq/m³ (OMS, 2016).

2.1.2. Mecanismo de transporte del radón

Los isotopos de radón se originan en la cadena de desintegración radiactiva de Uranio, siguiendo el torio y el potasio, los mismos que se distribuyen en diversas cantidades en el suelo. Los elementos predecesores al Radón pertenecen al grupo litofilo, los mismos que se caracterizan por encontrarse junto con el magma rico en sílice y permanecen cercanos a la superficie terrestre y así se combinan fácilmente con el oxígeno. El radón se produce mayormente donde se encuentran cantidades abundantes de ^{238}U . No obstante, los estudios sugieren estar alerta con las condiciones climáticas (por ejemplo, medio ambiente húmedo) y geológicas (por ejemplo, acuíferos permeables), donde es posible que ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra y ^{222}Rn se separen entre sí y del principal, ^{238}U . Estos núclidos tienen una vida lo suficientemente larga como para ser separados por un proceso químico o físico. Como resultado de este proceso natural, ^{226}Ra se puede disolver, transportar o redepositar en otro lugar, luego el radón se genera lejos del depósito de uranio original.

Una fracción del radón originada por la descomposición del radio en los granos del suelo se libera para moverse a través de los poros hacia la atmósfera sobre la tierra. Cuando ^{226}Ra decae, se producen un ^{222}Rn y una partícula alfa. Los mecanismos de emanación de radón se ilustran en la figura 2-2, el modelo describe los átomos de radio ubicados en un grano, rodeados por granos adyacentes, llenos de aire y agua, luego el radón producido por la desintegración del radio tiene cuatro destinos:

1. Se mueve a través del grano originario.
2. Se incrusta en un grano adyacente o en otro grano en su trayectoria.
3. Se transporta en una molécula de agua.
4. Se transporta en una molécula de gas.

Las mediciones desarrolladas en todo el mundo, demuestran que la mayor parte del radón producido nunca se escapa del lugar de nacimiento. La pequeña fracción de radón está disponible para ser transportada a una escala mayor que el diámetro del poro que se define como el radón emanado. Además del contenido de radio, la emanación de radón depende de las características del material, como la composición y el tamaño de los granos, la distribución de los granos en la parte interna del material, la porosidad y los parámetros ambientales. Los parámetros ambientales, como la temperatura y la presión, tienen una baja incidencia en la emanación del radón, aunque un aumento elevado de la temperatura puede reducir la adsorción física del radón en los suelos. Mientras tanto, se ha demostrado que el contenido de humedad tiene un gran efecto sobre la emanación del radón de los granos. Muchos estudios demostraron que la emanación es mucho menor cuando el material de origen es seco en lugar de húmedo. La explicación de este fenómeno

puede estar en que el radón se encuentre en un rango inferior en el agua, en comparación con el aire.

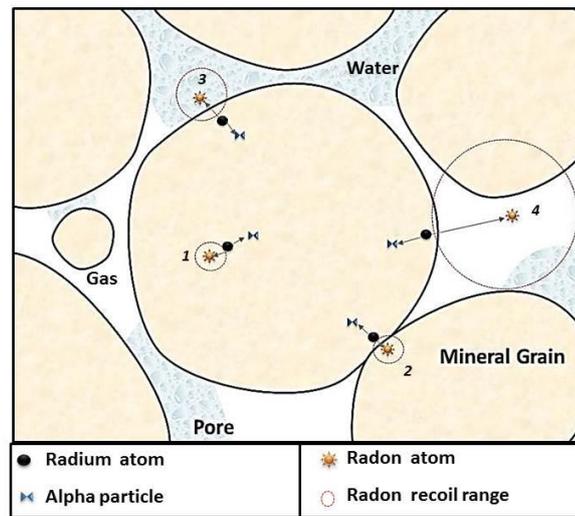


Figura 3-2: Emanación de radón desde el grano del mineral.

Fuente: Tene, 2017.

El radón es químicamente inerte, este hecho tiene importantes implicaciones en el transporte. Los átomos de radón pueden migrar lejos del sitio de origen por dos procesos básicos, división y convección. La convección depende del gradiente de presión, que puede no estar presente. El mecanismo responsable de crear este gradiente de presión es la interacción del viento con el suelo y la calefacción. Sobre la difusión, asumiendo que el radón es un líquido, sigue la ley de Fick. Bajo el supuesto de estado estable, la ley de Fick postula que el flujo [j], va desde regiones de alta concentración a regiones de baja concentración, con una magnitud que es proporcional al gradiente de concentración de radón. El flujo oscilante [u'] en una dirección se compensa con otro u' de la misma magnitud en la dirección opuesta. Entonces, la ecuación de la definición de una dimensión es:

$$j = c_1 u' - c_2 u' = u' \Delta c$$

Donde j se define como la cantidad de radón por unidad de área por unidad de tiempo, c es la concentración de radón

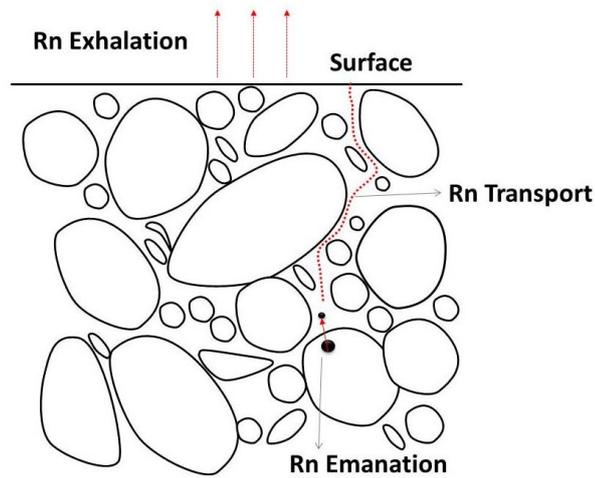


Figura 4-2: Proceso de transporte de radón hasta ser liberado en la atmósfera.

Fuente: Tene, 2017.

Se puede determinar la exhalación de radón en materiales de construcción principalmente por la generación de radón y su transporte a través de los poros, podemos decir que la generación de radón depende también el contenido de ^{226}Ra y del mecanismo que este tome para salir del grano ya sea hacia el aire o mediante el agua. Mientras que al referirnos al transporte mediante los poros estamos apuntando hacia el transporte diferencial en donde dependerá tanto de la porosidad del material la permeabilidad del mismo, la estructura que tenga el grano y el contenido de humedad que este posea (Tene, 2017).

2.2. Modelos biológicos de absorción de elementos radiactivos

2.2.1. Efectos del Radón en la salud humana

El gas radón es considerando peligroso principalmente por su naturaleza, este gas ingresa a el cuerpo humano por inhalación, pero sabemos que la mayoría se exhala por lo que no se llega a acumular en el sistema respiratorio, esto debido a que su tiempo de vida media es relativamente mayor al tiempo de respiración. El radón que llega a ingresar en el sistema respiratorio por medio de la inhalación no se aproximan a las células sensibles, por lo que la dosis de partículas alfa presentes es extremadamente pequeña.

Los elementos que empiezan a causar daños en el sistema son los primeros cuatro descendientes de este gas como lo son el ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi y ^{214}Po , los cuales se consideran radioactivos y se los denomina como Productos de Desintegración de Radón (RDP). Son metales que tienen una vida media muy corta que van desde una fracción de segundo hasta 27 minutos, la principal característica de estos RDP es que se pueden densificar en superficies solidas o liquidas, además

pueden unirse a productos en aerosol o fijarse en las partículas del aire y permanecer como átomos libres, al ser inhalados por las personas se transportan por el sistema respiratorio, dependiendo de factores como el tamaño de la partícula y modelo de respiración con los que logra incorporarse el RDP. Las RDP empiezan a alojarse en el tejido pulmonar al respirar (ver figura 3), estas partículas liberan energía en partículas alfa afectando los bronquios, considerados de gran sensibilidad. Al momento de que esto ocurre las células de los pulmones afectadas, tienen el potencial de causar cáncer. Las partículas alfa producidas tienen la capacidad de transferir cantidades considerables de energía(Tene, 2017, p. 15).

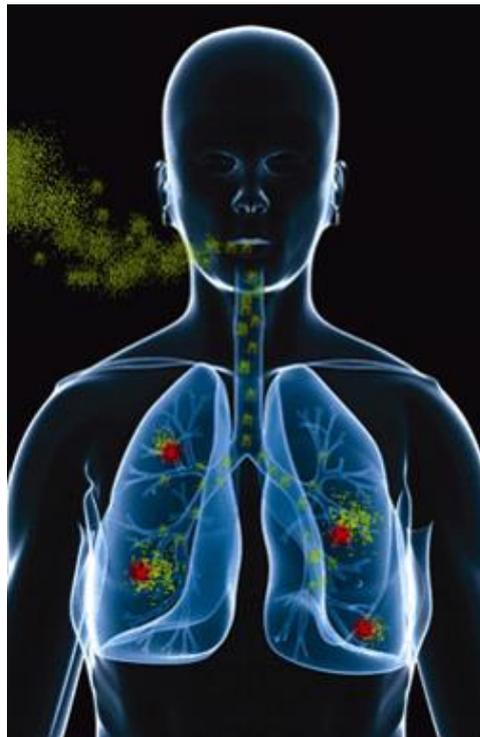


Figura 5-2: Transporte de los productos de desintegración de radón en el sistema respiratorio (verde).

Fuente: MarkcKinnon, et al., 2018.

Las concentraciones de Radón 222 al aire libre son relativamente bajas, sin embargo, pueden llegar a acumularse en el interior de los hogares especialmente, en el cual existe una mayor exposición del público. En las minas de Uranio se considera como un lugar en donde los trabajadores se encuentran a mayor exposición debido a que se encuentran bajo tierra y existen concentraciones altas de este gas, la mayoría de estudios en relación con los mineros expuestos han encontrado gran relación entre el cáncer de pulmón y el radón, Sarah Darby y su equipo consideran que la extrapolación de estos estudios sugiere que en muchos países el radón residencial, que implica una menor exposición en un número mucho mayor de personas, podría

causar una minoría sustancial de todos los cánceres de pulmón. Este punto es muy importante ya que se puede llegar a minimizar la concentración de radón en edificios ya sea incrementando la ventilación en las áreas de mayor concurrencia asegurando así el bienestar de las personas que se encuentren en estas áreas. En varios países europeos se han llevado a cabo estudios para estimar directamente el riesgo de cáncer de pulmón asociado con la exposición al radón residencial durante varias décadas. Individualmente, estos estudios no han sido lo suficientemente grandes como para evaluar los riesgos moderados de manera confiable (Darby *et al.*, 2005, pp. 1–2).

2.2.2. Efectos biológicos de la exposición al radón y a sus productos de desintegración.

La exposición de las células a la radiación densamente ionizante, como las partículas de radón alfa, puede iniciar una serie de eventos moleculares y celulares que culminan en el desarrollo de cánceres de pulmón y de otro tipo. La ionización conduce a daño celular, rotura del ADN, reparación precisa o inexacta, apoptosis, mutaciones genéticas, cambio cromosómico e inestabilidad genética. Los cambios moleculares inducidos por la radiación dan como resultado la ganancia y la pérdida de funciones en genes reguladores críticos, que permiten que las células escapen de los controles normales y se conviertan en tumores invasivos no regulados.

El proceso de transformación maligna implica una serie de cambios que se pueden observar en la figura 2-7. Los cambios moleculares asociados con la carcinogénesis por radiación se han investigado principalmente después de dosis y tasas de dosis más altas que las experimentadas a partir de los niveles de exposición al radón. Por lo tanto, estos cambios se describen cualitativamente y el grado en que cualquiera o todos ocurren en tejidos en los que una pequeña proporción de células ha experimentado una sola pista de partículas alfa aún no se ha determinado (National Research Council, 1999, pp. 105–106).

Células en riesgo

La inhalación de radón da como resultado la exposición de las células pulmonares a la irradiación alfa de la progenie del radón, que se depositan en la capa de moco y pueden provocar la exposición de células epiteliales de fuentes unilaterales en la superficie. La ingestión de radón a base de agua podría, en la primera impresión, exponer de manera similar las células del revestimiento del estómago. Sin embargo, después de la ingestión, el radón viaja como moléculas de gas con alta movilidad a través de las membranas celulares, y las células pueden recibir una exposición más uniforme. Las células madre y otras células proliferantes del estómago se encuentran en bandas en la base de los cuellos de invaginaciones estrechas de la pared del estómago que constituyen las glándulas secretoras de la pared del estómago.

Las células madre y otras células proliferativas del estómago son objetivos principales de las partículas de radón alfa, pero las células del intestino delgado también son objetivos potenciales. Después de la ingestión de agua, el radón pasa al intestino delgado con un tiempo medio de unos 15-20 minutos. Por lo tanto, el radón puede ser absorbido por el torrente sanguíneo tanto desde la pared del estómago como desde el intestino delgado. La exposición resultante a la mayoría de las células del cuerpo será a través del radón transmitido por la sangre.

Desde ese punto de vista, el estómago podría estar en mayor riesgo de exposición por radón acuoso ingerido. La transferencia del radón disuelto del agua al aire y su posterior inhalación constituyen otra ruta por la cual los pulmones pueden estar en riesgo. El daño de las partículas alfa al material genético se fija como alteraciones permanentes de la estructura y expresión génicas como resultado de procesos que implican la reparación, replicación y división celular del ADN. Las partículas alfa crean una ionización densa que deja huellas de grupos de pares de iones en las células y los tejidos.

Las células que sufren una vía de partículas alfa a través del núcleo están gravemente heridas. Sin embargo, en las condiciones de baja exposición bajo consideración del radón en el agua y en el aire en el hogar, menos del 1% de las células en el epitelio bronquial experimentarían una vía de partículas alfa por persona. (National Research Council, 1999, pp. 106–107).

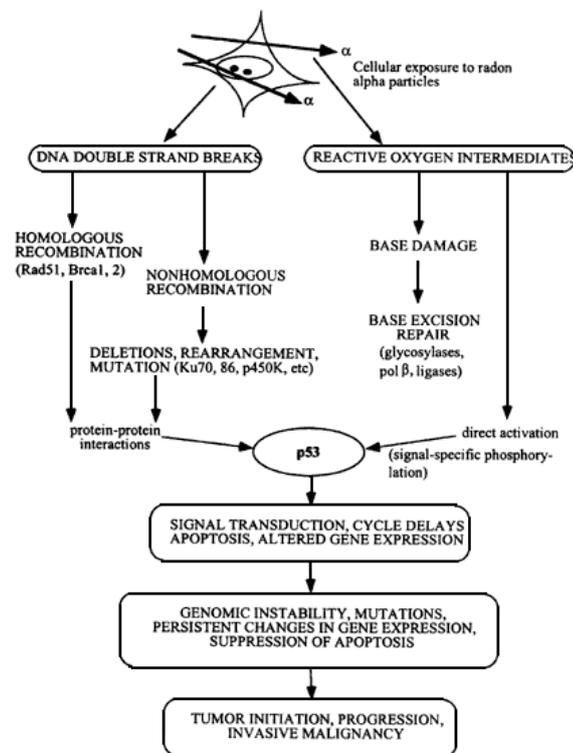


Figura 6-2: Desarrollo de las células malignas a partir del daño inicial de partículas α a las células.

Fuente: National Research Council, 1999.

2.2.3. Riesgos del ²²²Rn.

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de la radiación atómica (UNSCEAR), el radón representa aproximadamente la mitad del promedio mundial de exposición del ser humano a fuentes naturales de radiación, siempre considerando que existe una gran variabilidad debido a su irregular distribución geográfica. Los daños producidos por este tipo de radiaciones en el ser humano dependen de muchos factores como son la naturaleza y la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición, la energía cedida, la superficie irradiada o la dosis de radiación; siendo más perjudicial el efecto si se recibe la misma radiación en un periodo de tiempo corto que en un tiempo mayor.

Según datos del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), la dosis que una persona recibe como promedio en España proveniente de fuentes naturales es de 2,41 mSv/año; cantidad que en condiciones normales y como promedio se estima que se distribuye en:

- Un 50% de la dosis procedente del radón.
- Un 20% de la dosis procedente de la radiación terrestre (materiales).
- Un 15% de la dosis procedente de la radiación cósmica.
- Un 15% de la dosis procedente del propio organismo.

El radón es la segunda causa más importante de cáncer de pulmón después del tabaco. Se estima que la proporción de los casos de cáncer de pulmón a nivel nacional atribuibles al radón con respecto al total varía de un 3% a un 14%, en función de la concentración media nacional de radón y de la prevalencia de consumo de tabaco del país.

La primera vez que se detectó un aumento en la tasa de cáncer de pulmón fue entre trabajadores de minas de uranio expuestos a altas concentraciones de gas radón. Además, hay estudios realizados en Europa, América del Norte y China que confirman que incluso en concentraciones bajas, como las que se encuentran en las viviendas, el radón también entraña riesgos para la salud y contribuye considerablemente a la aparición de cáncer de pulmón en todo el mundo.

El riesgo de cáncer de pulmón aumenta en un 16% con cada incremento de 100 Bq/m³ en la concentración media de radón a largo plazo. La relación dosis-respuesta es lineal: por ejemplo, el riesgo de cáncer de pulmón aumenta de manera proporcional al aumento de la exposición al radón.

La probabilidad de que el radón provoque cáncer de pulmón es mayor en personas que fuman. De hecho, se estima que el riesgo asociado al radón que corre un fumador es 25 veces superior que

en el caso de los no fumadores. Hasta la fecha, no se ha determinado que haya riesgo de otro tipo de cáncer (OMS, 2016).

2.2.4. Recomendaciones y leyes sobre el radón en todo el mundo.

A pesar de que la presencia del radón es bastante relevante en muchos territorios, suponiendo cierto riesgo para la salud de un buen número de ciudadanos, lo cierto es que la regulación sobre este gas es muy reciente o incluso inexistente en determinados países.

Al respecto de las organizaciones intergubernamentales, la “International Commission on Radiological Protection” (ICRP) recomienda, a nivel general, tanto unas bases científicas como unos principios generales de protección radiológica que junto con los estudios sobre los efectos de esas radiaciones llevados a cabo por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) da lugar a una serie de normas globales convenidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), creado por las Naciones Unidas. Por otra parte, existen también varios organismos internacionales que formulan recomendaciones sobre protección radiológica como son la Comunidad Europea de Energía Atómica (Euratom/UE), la Agencia de Protección Ambiental en Estados Unidos (EPA) o la Organización Mundial de la Salud (OMS); entidades que generan documentos con principios prácticos globales, facilitando el desarrollo de regulaciones nacionales siendo los propios países los que definan en última instancia sus regulaciones y normas para una mejor aplicación práctica acorde con las condiciones y características propias de sus territorios (Piedecausa García *et al.*, 2011).

International Commission on Radiological Protection (ICRP)

ICRP 39. “Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation”. 1984. Señala como fuente predominante de exposición en interiores al ^{222}Rn y genera una serie de recomendaciones a tener en cuenta respecto a esa fuente tanto en situaciones de exposición existente como futura.

- Exposición espacios existentes. Nivel de acción: 400 Bq/m³.
- Exposición espacios futuros. Nivel de referencia: 200 Bq/m³

ICRP 65 “Protection against ^{222}Rn at home and at work”. 1993. - Considera otros lugares además de las minas donde pueden existir concentraciones elevadas de radón, como es el caso de cuevas, túneles y balnearios. Recomienda controlar la exposición tanto en viviendas (mediante la

intervención) como en lugares de trabajo (mediante la intervención y un control más regular).
Recomienda unos niveles de acción a partir de los que inician intervención

- Viviendas -----→ entre 200 y 600 Bq/m³.
- Lugares de trabajo -----→ entre 500 y 1500 Bq/m³.

En viviendas nuevas recomienda que sean diseñadas y construidas de forma que las concentraciones de radón sean tan bajas como sea posible, considerando la fácil incorporación de técnicas de reducción de concentraciones si se diese el caso de que la construcción inicial fallase. Establece valores de dosis según los denominados “conversion conventions factors” basados en un factor de ocupación anual de 7.000 h y un factor de equilibrio entre el radón y sus descendientes de 0,4:

- Antes de la ICRP 65: 600 Bq/m³ -----→ 10 mSv/año.
- Con la ICRP 65: 200 Bq/m³ -----→ 3 mSv/año.

Introduce el concepto de “Radon prone areas”, es decir, zonas propensas a la acumulación de radón en las que más de un 1% de las viviendas tienen concentraciones de radón diez veces superiores al valor medio nacional. Considera que las acciones emprendidas para disminuir dichas concentraciones en un país sean dirigidas prioritariamente hacia dichas áreas (Piedecausa García *et al.*, 2011).

2.3. Magnitudes Radiométricas usadas para medir radón en materiales de construcción.

2.3.1. Concentración de Radio, C_{Ra}

El Radio 226 es transformado en Radón mediante decaimiento radiactivo. Por lo tanto, el radón es producido en todos los materiales que contengan Radio 226. La concentración de radio A_{Ra} en unidades de Bq radio226 por kg, entonces da directamente la tasa de producción del radón a una velocidad de 23 átomos por segundo. El radio contenido en los materiales de construcción depende únicamente de las materias primas seleccionadas.

2.3.2. Tasa de emanación, J

En materiales porosos, el radio está situado en granos sólidos. No todo el radón producido en los granos en realidad escapa a los poros entre los granos. De hecho, la tasa de emanación del radón J es el número de átomos de radón por segundo por kg de material seco ($\text{átomos s}^{-1} \text{kg}^{-1}$) que escapan de las partes sólidas del material y están disponibles para el transporte a una escala mayor que el diámetro de poro característico del material. Básicamente, la tasa de emanación es la velocidad a la que suministra el radón a los poros del material.

2.3.3. Fracción de emanación de radón, f

La fracción de emanación, f, es definido como el radio entre la tasa de emanación, E, y la tasa de radón producido dentro de la muestra:

$$f = \frac{J}{A_{Ra}} \quad (1)$$

La fracción de emanación depende de la distribución del radio-226 en los granos, la distribución del tamaño del grano y la presencia de humedad entre los granos. Teóricamente, f puede tomar valores de 0 a 100%. Por ejemplo, se puede esperar una gran fracción de emanación si existe radio como recubrimiento superficial en los granos, si los granos tienen una gran porosidad interna, o si los granos son muy pequeños. La presencia de agua entre los granos también puede moderar el proceso de emanación. Para los suelos, el valor máximo típico de la fracción de emanación es de aproximadamente 20%. Para un material dado (con distribución de tamaño de grano fijo, etc.), la fracción de emanación es esencialmente solo una función de la humedad en la muestra. Se supone que f es independiente, por ejemplo, de la concentración de radón en los poros.

2.3.4. Fracción de exhalación a emanación, g

El radón puede moverse a través de la muestra por difusión y advección. Debido a la vida media finita del radón, solo una fracción del radón del espacio poroso escapa de la muestra antes de la descomposición. Presentamos la fracción de emanación a exhalación, g, como:

$$g = \frac{E_M}{J} \quad (2)$$

donde J es la tasa de exhalación de masa específica y E es la tasa de emanación. g toma valores desde 0 a 100%. Si la muestra es muy larga, solo una fracción pequeña del radón generado dentro de la muestra alcanzara la superficie. En este caso, g será cercano a cero. Si la muestra es muy

pequeña, todo el radón generado en la muestra probablemente alcanzara el ambiente y g es su unidad. Las diferencias de presión en la muestra pueden inducir flujos de aire que a su vez transportan radón advectivamente. La principal fuente de movimiento de aire a través de muestras intactas son probablemente cambios en la presión atmosférica absoluta.

2.3.5. Tasa de exhalación, E

Considere una determinada muestra de material de construcción colocado en algún entorno ambiental adecuado, temperatura, presión, tensión, concentración de radón, etc. Bajo las condiciones dadas, definimos la tasa de exhalación específica de la muestra E a ser la cantidad neta de radón que escapa de la muestra por unidad de tiempo. La cantidad de radón que escapa del gránulo por unidad de tiempo se expresa como la cantidad de átomos de radón que escapa por segundo (átomos s^{-1}), o como la cantidad de actividad de radón medida en Bq que escapa por hora (Bq h^{-1}). De la ley básica de la desintegración radiactiva, tenemos que:

$$E [Bq/h] = \lambda \frac{3600s}{1h} J [\text{átomos}/s] \quad (3)$$

Donde, $\lambda = 2.09838 * 10^{-6} s^{-1}$ es la constante de decaimiento de radón, por lo tanto, una muestra que tiene una tasa de exhalación de 1.0 átomos s^{-1} es equivalente a la afirmación de que la muestra tiene una tasa de exhalación de $7.6 * 10^{-3} Bq h^{-1}$.

Si A es la superficie geométrica de la muestra y M es la masa de la muestra, entonces calcularemos el área específica (E_A) y la masa específica (E_M) y la tasa de exhalación de radón como:

$$E_A = \frac{E}{A} \quad (4)$$

$$E_M = \frac{E}{M} \quad (5)$$

Donde E_A esta expresada en unidades de átomos $\text{átomos } s^{-1} m^{-2}$ o $Bq h^{-1} m^{-2}$. Igualmente E_M es expresada en unidades de átomos $s^{-1} kg^{-1}$ o $Bq h^{-1} kg^{-1}$.

Como ya se indicó, la velocidad de exhalación de una muestra dada depende del entorno en el que se coloca la muestra. La situación cuando el medio ambiente tiene una concentración de radón cero es de especial interés. Nos referimos a esta situación como "libre", y agregamos la letra 'f' como subíndice a las cantidades de la tasa de exhalación obtenidas bajo esta condición ($E_{M,f}$ y $E_{A,f}$).

2.3.6. Fracción de exhalación de radón, h

Definimos la fracción de exhalación, h, como la relación entre la tasa de exhalación de radón de la muestra y la tasa de producción de radón dentro de la muestra:

$$h = \frac{E_M}{A_{Ra}} \quad (6)$$

h toma valores desde 0 a 100%. Como ya describimos, el proceso de exhalación puede ser dividido entre dos partes como describe mediante f y g, y tenemos:

$$h = \frac{E_M}{J} * \frac{E}{A_{Ra}} = f * g \quad (7)$$

2.3.7. Difusividad, D

La exhalación de radón a partir de materiales de construcción como el hormigón resulta principalmente de difusión molecular. La Difusividad masiva, D, de los materiales de construcción es, por lo tanto, un parámetro importante. El flujo difusivo es proporcional al gradiente del campo de concentración de radón. Para aclarar lo que esto significa, consideramos el siguiente ejemplo:

Imaginemos un A=120 m² de una casa posicionada en el suelo. La casa tiene una losa intacta de L=0.1m en espesor, la losa tiene una Difusividad a granel $D_g = 10^{-6}m^2s^{-1}$ la difusión del radón a través de una concentración por debajo de la losa se establece en $c_A = 50000Bqm^{-3}$. El ambiente interior tiene una concentración de radón cercana a cero c_B . Ignorando la desintegración radioactiva, la entrada difusiva D del radón a la casa es:

$$D = A D_g \frac{c_A - c_B}{L} \quad (8)$$

$$D = 120m^2 * 10^{-6}m^2s^{-1} * \frac{50000Bqm^{-3}}{0.1m} \quad (9)$$

$$D = 21600Bqh^{-1} \quad (10)$$

Si la casa tiene un tipo de cambio de aire de $\lambda_v = 0.5h^{-1}$ y un volumen de $V = 300m^3$, entonces la tasa de entrada difusiva puede aumentar la concentración de radón en interiores en la medida en tanto como $173Bqm^{-3}$, si la difusividad a granel de la losa es $10^{-10}m^2s^{-1}$, la entrada difusiva a través de la losa ni siquiera puede aumentar la concentración de radón en interiores por $1Bqm^{-3}$.

2.4. Radón en materiales de construcción

2.4.1. Influencia de la edad del material y de la cantidad de humedad presente.

El efecto de los parámetros de emanación de radón de los materiales de construcción en la concentración de radón en interiores ha sido ampliamente estudiado durante las últimas dos décadas. Los primeros estudios sugirieron que los materiales de construcción eran la fuente más importante de radón para interiores. Estudios más recientes muestran que las concentraciones más altas registradas de radón en interiores fueron causadas por el transporte de radón desde el suelo o roca adyacente al edificio.

Entre los factores más importantes para determinar la tasa de emanación de Radón en materiales de construcción es el contenido de humedad del material en el momento de la medición. Para material muy húmedo o saturado, la tasa de emanación es muy baja, porque la longitud de difusión del radón en los poros llenos de agua es mucho menor que en los poros llenos de aire. Una gran fracción del radón se descompone en el material y no se escapa. Los materiales muy secos también se caracterizan por una pequeña tasa de emanación.

El coeficiente de emanación de tales materiales es bajo porque el rango de retroceso de un átomo de radón en los poros llenos de aire es alto, y por lo tanto la probabilidad de que el átomo termine su retroceso en el volumen de poros es baja. El coeficiente de emanación suele ser más alto en los materiales en los que el contenido de humedad es del orden de algunos porcentajes. Por ejemplo, para minerales de uranio, se ha encontrado que el coeficiente de emanación del material con hasta 6% de humedad es 3.0-4.6 veces más alto que para material seco (Strong y Levins, 1982).

Este ejemplo ilustra que el contenido de humedad es un parámetro importante. Para lograr resultados reproducibles en la determinación de laboratorio de la tasa de emanación, la práctica común es secar la muestra a una masa constante antes de la medición. Esta práctica, sin embargo, da como resultado una subestimación significativa de la tasa de emanación real, ya que, en condiciones ambientales normales, suele haber una película delgada de agua en los poros internos del material. El secado a masa constante fue utilizado por (Paredes *et al.*, 1987) en la determinación de los coeficientes de emanación de varias muestras concretas. Los valores encontrados, $1,7 \times 10^{-2}$, son aproximadamente un orden de magnitud más bajo que otros valores informados (Ingersoll, 1983).

El enfoque más razonable es mantener la muestra en condiciones de humedad similares a las esperadas en el futuro edificio. En cualquier caso, debe informarse el contenido de humedad de la muestra (Morawska y Phillips, 1991).

La velocidad de emanación de la superficie calculada describe la emanación en ausencia de cualquier factor de modificación. Los factores que modifican la emanación se pueden dividir en dos grupos.

Factores que causan cambios rápidos y de corto plazo en la tasa de emanación (cambios de presión o cambios de presión inducidos por el viento). Estos factores pueden causar cambios significativos en la tasa de emanación de radón, pero, a largo plazo, tienden a cancelarse entre sí.

Factores que causan cambios a largo plazo o permanentes en la tasa de emanación. Estos factores son la presencia de selladores y el gradiente de temperatura entre las regiones exteriores e interiores. Como resultado: (a) la tasa de emanación real puede ser mucho menor que la tasa de emanación calculada, o (b) la tasa de emanación real puede ser tanto como el doble de la calculada.

La mayor exposición al radón suele producirse en el hogar. La concentración de radón en una vivienda depende de:

- la cantidad de uranio que contienen las rocas y el terreno del subsuelo;
- las vías que el radón encuentra para filtrarse en las viviendas; y
- la tasa de intercambio de aire entre el interior y el exterior, que depende del tipo de construcción, los hábitos de ventilación de sus habitantes y la estanqueidad del edificio.

El radón se filtra en las casas a través de grietas en los suelos o en la unión del piso con las paredes, espacios alrededor de las tuberías o cables, pequeños poros que parecen construidas con bloques de hormigón huecos, o por los sumideros y desagües. Por lo general, el radón suele alcanzar concentraciones más elevadas en los sótanos, bodegas y espacios habitables que están en contacto directo con el terreno (OMS, 2016).

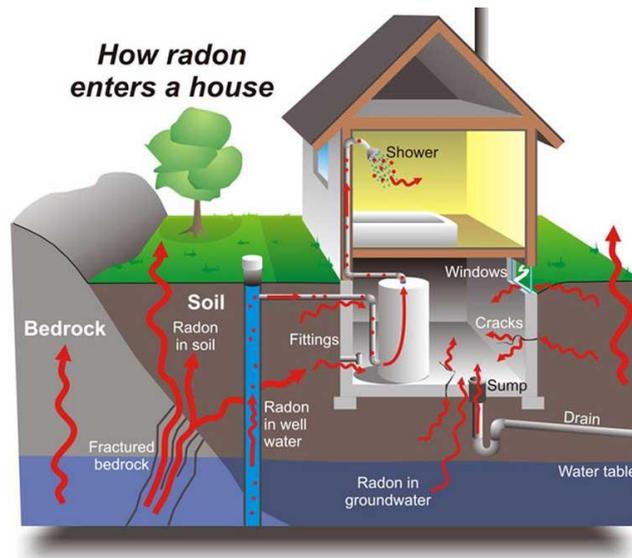


Figura 7-2: Esquema de como el Radón ingresa a una casa.
Fuente: Bucklow, 2016.

Tomando en cuenta que las exhalaciones de radón de los materiales de construcción contribuyen de manera relevante para la acumulación de radón en interiores, por lo tanto, se aumenta la exposición de las personas que viven o trabajan dentro de estos lugares sobre todo si son cerrados y el tiempo de permanencia en este lugar es largo.

2.4.2. Base de datos de reportes de coeficiente másico y superficial de ^{222}Rn

El conocimiento de los niveles de radiación ionizante en edificios es claramente de importancia fundamental en la evaluación de la exposición de la población, ya que la mayoría de las personas pasan la mayor parte del tiempo en interiores. Normalmente, las dos rutas principales de exposición en interiores son la irradiación de rayos gamma terrestres y la inhalación de isótopos de radón. En casas masivas de ladrillo, hormigón o piedra, los materiales de construcción actúan como atenuadores de los rayos gamma emitidos al aire libre, por lo que la tasa de dosis absorbida en interiores depende principalmente de la concentración de sustancias radiactivas que se producen en los materiales de construcción. Se ha demostrado en varios que, si los materiales de construcción empleados tienen concentraciones de radioactividad natural alta, las tasas de dosis en interiores se elevarán en consecuencia.

Las concentraciones de actividad de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en materiales de construcción usados en volumen y en cantidades restringidas se muestran en la tabla 1 y 2. Las tobas volcánicas son rocas magmáticas efusivas típicas de las regiones centrales de Italia, caracterizadas por concentraciones de actividad natural considerablemente más altas que otros materiales de construcción naturales. Además, las rocas magmáticas intrusivas (como los granitos) se

caracterizan generalmente por una radiactividad natural relativamente más alta que otros materiales de construcción naturales (UNSCEAR, 2006b).

Tabla 3-2: Concentración de actividad natural de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , e índices gamma y alfa en muestras de materiales de construcción usados en volumen y en cantidades restringida.

| Código | Muestras(tipo de material de construcción) | ^{226}Ra ($M.V. \pm \sigma$) | ^{232}Th ($M.V. \pm \sigma$) | ^{40}K ($M.V. \pm \sigma$) | I_γ | I_α |
|--------|--|--|--|--|------------|------------|
| 1 | Ladrillo | 110 ± 9 | 97 ± 8 | 380 ± 30 | 0.98 | 0.55 |
| 2 | Ladrillo | 96 ± 8 | 90 ± 7 | 160 ± 10 | 0.82 | 0.48 |
| 3 | Ladrillo | 20 ± 2 | 25 ± 2 | 410 ± 30 | 0.33 | 0.10 |
| 4 | Ladrillo | 35 ± 3 | 36 ± 3 | 560 ± 50 | 0.48 | 0.18 |
| 5 | Ladrillo | 34 ± 3 | 40 ± 4 | 680 ± 60 | 0.54 | 0.17 |
| 6 | Ladrillo | 76 ± 6 | 33 ± 3 | 590 ± 50 | 0.61 | 0.38 |
| 7 | Ladrillo | 32 ± 3 | 39 ± 3 | 530 ± 50 | 0.48 | 0.16 |
| 8 | Concreto | 18 ± 2 | 12.3 ± 1.5 | 230 ± 20 | 0.20 | 0.09 |
| 9 | Concreto | 12.9 ± 1.2 | 20 ± 2 | 390 ± 30 | 0.27 | 0.06 |
| 10 | Cemento | 22 ± 2 | 25 ± 2 | 490 ± 40 | 0.36 | 0.11 |
| 11 | Cemento | 7.0 ± 0.6 | 7.7 ± 0.7 | 130 ± 10 | 0.10 | 0.03 |
| 12 | Cemento | 13.4 ± 1.2 | 15.0 ± 1.6 | 400 ± 40 | 0.25 | 0.07 |
| 13 | Mezcla de cal | 16.4 ± 1.5 | 21 ± 2 | 400 ± 30 | 0.30 | 0.08 |
| | | | | | | |

$M.V. \pm \sigma$ = valor medio \pm desviación estandar

Fuente: Assessment of the natural radioactivity using two techniques for the measurement of radionuclide concentration in building materials used in Japan

Realizado por: (Hassan *et al.*, 2010)

Tabla 4-2: Concentración de actividad natural de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K (Bqkg^{-1}), e índices gamma y alfa en muestras de materiales de construcción usados en volumen y en cantidades restringida.

| Código | Muestras(tipo de material de construcción) | ^{226}Ra ($M.V. \pm \sigma$) | ^{232}Th ($M.V. \pm \sigma$) | ^{40}K ($M.V. \pm \sigma$) | I_γ | I_α |
|---------------|---|--|--|--|------------------------------|------------------------------|
| 14 | Teja de arcilla | 23 ± 2 | 30 ± 3 | 540 ± 50 | 0.41 | 0.12 |
| 15 | Teja de arcilla | 24 ± 2 | 36 ± 3 | 590 ± 50 | 0.45 | 0.12 |
| 16 | Enlucido de yeso | 22 ± 2 | 23 ± 2 | 470 ± 40 | 0.35 | 0.11 |
| 17 | Enlucido de yeso | 34 ± 3 | 1.7 ± 0.2 | 25 ± 3 | 0.13 | 0.17 |
| 18 | Losas de terracota | 12.0 ± 1.1 | 9.1 ± 1.2 | 150 ± 13 | 0.14 | 0.06 |
| 19 | Baldosa de cerámica | 48 ± 4 | 42 ± 4 | 460 ± 40 | 0.52 | 0.24 |
| 20 | Baldosa de cerámica | 56 ± 5 | 43 ± 4 | 440 ± 40 | 0.55 | 0.28 |
| 21 | Loza de porcelana | 230 ± 20 | 76 ± 6 | 650 ± 60 | 1.36 | 1.15 |
| 22 | Loza de porcelana | 150 ± 15 | 56 ± 5 | 410 ± 40 | 0.92 | 0.75 |
| 23 | Granito verde | 57 ± 5 | 49 ± 4 | 560 ± 50 | 0.62 | 0.32 |
| 24 | Granito rojo | 153 ± 13 | 360 ± 30 | 1600 ± 100 | 2.84 | 0.77 |
| 25 | Granito rosa | 147 ± 13 | 200 ± 18 | 1200 ± 100 | 1.89 | 0.74 |
| 26 | Granito rosa | 33 ± 3 | 44 ± 4 | 1000 ± 90 | 0.66 | 0.16 |
| 27 | Granito rosa | 61 ± 5 | 79 ± 7 | 1200 ± 100 | 1.00 | 0.31 |
| 28 | Granito blanco | 37 ± 3 | 42 ± 4 | 830 ± 70 | 0.61 | 0.19 |
| 29 | Piedra negra | 11.7 ± 1.0 | 19 ± 2 | 240 ± 20 | 0.22 | 0.06 |
| 30 | Basalto | 41 ± 4 | 26 ± 2 | 340 ± 30 | 0.38 | 0.21 |
| 31 | Traquita | 41 ± 3 | 41 ± 3 | 1100 ± 100 | 0.71 | 0.21 |
| 32 | Pórfido | 40 ± 3 | 48 ± 4 | 950 ± 80 | 0.69 | 0.20 |
| 33 | Pórfido | 41 ± 4 | 57 ± 5 | 1050 ± 90 | 0.77 | 0.21 |

| | | | | | | |
|----|-----------------|-------------|-------------|------------|------|-------|
| 34 | Tufo volcánico | 92 ± 8 | 138 ± 11 | 1200 ± 100 | 1.4 | 0.46 |
| 35 | Tufo volcánico | 190 ± 20 | 210 ± 20 | 1900 ± 200 | 2.32 | 0.95 |
| 36 | Tufo volcánico | 280 ± 20 | 270 ± 20 | 1900 ± 200 | 2.92 | 1.40 |
| 37 | Piedra de arena | 33 ± 3 | 32 ± 3 | 530 ± 40 | 0.45 | 0.17 |
| 38 | Piedra de arena | 13.6 ± 1.2 | 12.8 ± 1.2 | 230 ± 20 | 0.19 | 0.07 |
| 39 | Caliza | 65 ± 5 | 6.1 ± 0.5 | 46 ± 4 | 0.26 | 0.33 |
| 40 | Caliza | 76 ± 6 | 8.0 ± 0.7 | 47 ± 4 | 0.31 | 0.38 |
| 41 | Travertinos | 0.75 ± 0.07 | 0.25 ± 0.04 | 5.4 ± 0.7 | 0.01 | 0.004 |
| 42 | Mármol rojo | 0.53 ± 0.08 | 3.9 ± 0.7 | 20 ± 3 | 0.03 | 0.003 |

Fuente: Assessment of the natural radioactivity using two techniques for the measurement of radionuclide concentration in building materials used in Japan

Realizado por: (Hassan *et al.*, 2010)

La tasa máxima de exhalación de radón se observó en la muestra de granito rojo. Por el contrario, las muestras de tejas, mármoles y cerámicas no mostraron una exhalación detectable de radón. Esta evidencia confirma la hipótesis mencionada anteriormente sobre la dificultad del radón para escapar de las matrices sólidas condensadas.

En general, se encontró que las piedras de origen magmático (como granitos, pórfidos y tobas volcánicas) son las fuentes más importantes de emanación de radón. Sin embargo, los niveles de la tasa de exhalación de radón de las muestras de roca magmática mostraron una amplia dispersión (Righi y Bruzzi, 2006, pp. 158–170).

Según (Righi y Bruzzi, 2006) apoyan la teoría de que las tasas de exhalación de radón no son predecibles solo por el contenido de radio, podemos evidenciar los datos reportados en las tablas 2-3 y 2-4 donde encontramos la tasa de exhalación específica de ^{222}Rn ($\text{BqKg}^{-1}\text{h}^{-1}$) y la fracción de emanación (%) en materiales de construcción utilizados en grandes cantidades, así como en pequeñas cantidades, respectivamente. El índice de exhalación de ^{222}Rn osciló entre valores menores del límite de detección el cual es $0.25 \text{ BqKg}^{-1}\text{h}^{-1}$.

Tabla 5-2: Tasa de exhalación específica de radón ($BqKg^{-1}h^{-1}$) y fracción de emanación (%) en muestras de materiales utilizados en grandes cantidades

| Codigo | Muestras(tipo de material de construcción) | Tasa de exhalación específica ($M.V. \pm \sigma$) | Fracción de emanación ($M.V. \pm \sigma$) |
|---------------|---|---|---|
| 1 | Ladrillo | 0.0137 ± 0.0003 | 1.65 ± 0.04 |
| 2 | Ladrillo | 0.0164 ± 0.0011 | 2.3 ± 0.2 |
| 3 | Ladrillo | 0.0276 ± 0.0013 | 18.3 ± 0.8 |
| 4 | Ladrillo | 0.007 ± 0.002 | 3.5 ± 0.3 |
| 5 | Ladrillo | 0.008 ± 0.002 | 1.8 ± 0.2 |
| 6 | Ladrillo | 0.009 ± 0.004 | 2.5 ± 0.2 |
| 7 | Ladrillo | 0.0071 ± 0.0012 | 1.60 ± 0.12 |
| 8 | Concreto | 0.0089 ± 0.0007 | 6.6 ± 0.5 |
| 9 | Concreto | 0.016 ± 0.003 | 16 ± 3 |
| 10 | Cemento | 0.015 ± 0.002 | 9.1 ± 1.5 |
| 11 | Cemento | 0.0123 ± 0.0009 | 23 ± 2 |
| 12 | Cemento | 0.0128 ± 0.0002 | 12.6 ± 0.2 |
| 13 | Mezcla de cal | 0.0040 ± 0.0005 | 2.9 ± 0.2 |
| 14 | Teja de arcilla | $< LLD$ | $N.Q.$ |
| 15 | Teja de arcilla | $< LLD$ | $N.Q.$ |
| 16 | Enlucido de yeso | 0.0171 ± 0.0002 | 10.26 ± 0.12 |
| 17 | Enlucido de yeso | 0.0031 ± 0.0006 | 1.2 ± 0.2 |
| 18 | Losas de terracota | 0.0065 ± 0.0008 | 7.1 ± 0.9 |
| 19 | Baldosa de cerámica | $< LLD$ | $N.Q.$ |
| 20 | Baldosa de cerámica | $< LLD$ | $N.Q.$ |

| | | | |
|----|-------------------|-----------------|--------------|
| 21 | Loza de porcelana | < <i>LLD</i> | <i>N. Q.</i> |
| 22 | Loza de porcelana | < <i>LLD</i> | <i>N. Q.</i> |
| 23 | Granito verde | 0.082 ± 0.005 | 19.1 ± 1.2 |
| 24 | Granito rojo | 0.25 ± 0.03 | 21 ± 2 |
| 25 | Granito rosa | 0.129 ± 0.004 | 11.6 ± 0.4 |
| 26 | Granito rosa | 0.0122 ± 0.0004 | 4.89 ± 0.15 |
| 27 | Granito rosa | 0.069 ± 0.007 | 15.0 ± 1.5 |
| 28 | Granito blanco | 0.0043 ± 0.0005 | 1.5 ± 0.2 |
| 29 | Piedra negra | 0.007 ± 0.001 | 7.4 ± 1.2 |
| 30 | Basalto | < <i>LLD</i> | <i>N. Q.</i> |
| 31 | Traquita | 0.032 ± 0.002 | 10.4 ± 0.7 |
| 32 | Pórfido | 0.0068 ± 0.0006 | 2.2 ± 0.2 |
| 33 | Pórfido | 0.038 ± 0.002 | 12.4 ± 0.7 |
| 34 | Tufo volcánico | 0.041 ± 0.004 | 5.8 ± 0.7 |
| 35 | Tufo volcánico | 0.103 ± 0.002 | 7.2 ± 0.9 |
| 36 | Tufo volcánico | 0.17 ± 0.02 | 7.9 ± 1.1 |
| 37 | Piedra de arena | 0.014 ± 0.002 | 5.7 ± 0.8 |
| 38 | Piedra de arena | 0.0099 ± 0.0010 | 9.3 ± 1.0 |
| 39 | Caliza | 0.036 ± 0.003 | 7.4 ± 0.5 |
| 40 | Caliza | 0.034 ± 0.003 | 5.8 ± 0.9 |
| 41 | Travertinos | < <i>LLD</i> | <i>N. Q.</i> |
| 42 | Mármol rojo | < <i>LLD</i> | <i>N. Q.</i> |

Fuente: Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings.

Realizado por: (Righi y Bruzzi, 2006)

Además gracias a los aportes de (Hassan *et al.*, 2010) se puede conocer a detalle tasas de concentración de varios materiales de construcción, como el granito, el mármol y diferentes rocas originadas en Japón, China, Taiwán, India, Italia y Sudáfrica. En la tabla 2-6 podemos visualizar a detalle las actividades de los diferentes tipos de granito y rocas volcánicas analizadas en este estudio.

Tabla 6-2: Actividades específicas de ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en materiales de construcción ($\text{Bqkg}^{-1} \pm 1\sigma$).

| Tipo de muestra | País | Actividad específica Bqkg^{-1} | | |
|-----------------|--------------|---|-------------------|------------------|
| | | ^{226}Ra | ^{232}Th | ^{40}K |
| Granito | Japan | 33.7 ± 0.5 | 46.3 ± 1.0 | 943.6 ± 6.2 |
| Granito | Japan | 3.6 ± 0.5 | 45.0 ± 0.9 | 855.6 ± 5.8 |
| Granito | Japan | 10.2 ± 0.4 | 29.2 ± 0.8 | 911.3 ± 6.0 |
| Granito | Japan | 11.8 ± 0.4 | 37.0 ± 0.8 | 742.4 ± 5.5 |
| Granito | China | 18.2 ± 0.5 | 63.8 ± 1.0 | 990.4 ± 6.1 |
| Granito | India | 322.3 ± 1.5 | 201.0 ± 2.0 | 10990 ± 7.0 |
| Granito | Italy | 33.4 ± 0.3 | ND | ND |
| Aplita | China | 34.7 ± 0.6 | 113.4 ± 0.9 | 1242.6 ± 6.9 |
| Piroxeno | Japan | 6.9 ± 0.3 | 6.1 ± 0.3 | 211.8 ± 2.5 |
| Roca volcánica | Taiwan | 13.6 ± 0.6 | 12.8 ± 0.7 | 306.0 ± 4.4 |
| Roca ígnea | China | 11.6 ± 0.5 | 17.7 ± 0.7 | 399.5 ± 4.7 |
| Roca ígnea | India | 10.4 ± 0.5 | 9.9 ± 0.4 | 165.0 ± 3.1 |
| Roca ígnea | Sweden | 10.0 ± 0.5 | 8.0 ± 0.5 | 367.7 ± 4.2 |
| Roca ígnea | South Africa | ND | ND | 39.5 ± 19 |

Fuente: Natural radioactivity and radon exhalation in building materials used in Italian dwellings.

Realizado por: (Righi y Bruzzi, 2006)

2.4.3. Detectores de ^{222}Rn .

2.4.3.1. Detectores Activos.

El detector conocido comúnmente como activo permite una rápida recolección de radón y / o sus RDP's al forzar la entrada del gas en el detector. Generalmente se utilizan para medir a corto tiempo en monitoreo continuo.

Celdas de centelleo

La detección de radiación ionizante por la luz de centelleo producida en ciertos materiales es una de las técnicas más antiguas registradas. El proceso de centelleo sigue siendo uno de los métodos más útiles disponibles para la detección y espectroscopía de una amplia variedad de radiaciones.

Entre los procesos más relevantes para los detectores de centelleo tenemos los siguientes:

1. El proceso de fluorescencia es la rápida emisión de radiación visible desde una sustancia que sigue su excitación de alguna manera. Es convencional distinguir varios otros procesos que también pueden conducir a la emisión de luz visible.
2. La fosforescencia corresponde a la emisión de luz de longitud de onda más larga que la fluorescencia, y con un tiempo característico que generalmente es mucho más lento.

El proceso de fluorescencia en materia orgánica surge de las transiciones en la estructura del nivel de energía de una sola molécula y, por lo tanto, se puede observar desde una especie molecular dada, independientemente de su estado físico. Por ejemplo, se observa que el antraceno presenta fluorescencia como un material policristalino sólido, como un vapor, o como parte de una solución multicomponente. Este comportamiento está en marcado contraste con los centelladores inorgánicos cristalinos, como el yoduro de sodio, que requieren una red cristalina regular como base para el proceso de centelleo.

Las partículas alfa emitidas por la descomposición del radón pueden detectarse cuando interactúan con el material de centelleo que produce luminiscencia. Henry F. Lucas utilizó esta técnica de centelleo para construir una cubierta de acero recubierta internamente con sulfuro de zinc activado con plata ZnS (Ag) , para detectar partículas alfa. Este detector se conoce como Lucas o célula de centelleo. El material de centelleo de alta eficiencia para partículas alfa, el sulfuro de zinc activado con plata, es un polvo policristalino inorgánico transparente a su propia luz de centelleo.

La luz emitida se extiende isotrópicamente y solo una fracción de la luz es captada por un fotomultiplicador interconectado con el detector. Cuando la celda de Lucas se interconecta con

un fotomultiplicador, los fotones de centelleo se convierten en señal eléctrica y luego se convierten en cuentas.

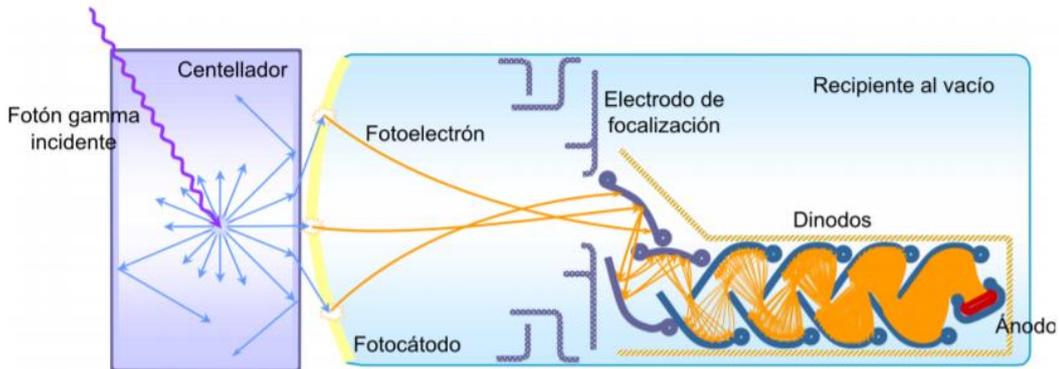


Figura 8-2: Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador.

Realizado por: Coppola, Máximo; Santaya, Mariano, 2014.

Semiconductores

En muchas aplicaciones de detección de radiación, el uso de un medio de detección sólido es una gran ventaja. Los dispositivos que emplean semiconductores como medio de detección básico estuvieron prácticamente disponibles a principios de los años sesenta. Las primeras versiones se llamaban contadores de cristal, pero los detectores modernos se denominan detectores de diodos semiconductores o simplemente detectores de estado sólido.

Aunque este último término es algo ambiguo en el sentido de que técnicamente los contadores de centelleo también pueden considerarse detectores de estado sólido, se ha generalizado para caracterizar solo aquellos dispositivos que se basan en la recolección de pares de orificios de electrones de medios semiconductores. Además de una resolución de energía superior, los detectores de estado sólido también pueden tener una serie de otras características deseables. Entre estos se encuentran el tamaño compacto, las características de temporización relativamente rápidas y un grosor efectivo que puede variar para adaptarse a los requisitos de la aplicación.

La interacción entre una partícula de carga y los electrones de valencia del detector de semiconductores origina un proceso físico llamado par de orificios de electrones. Estos pares de agujeros de electrones son los portadores de información creados a lo largo del camino que toma la partícula cargada a través del detector. Incluso en ausencia de radiación ionizante, todos los detectores de semiconductores mostrarán cierta conductividad y, por lo tanto, se puede observar un estado estable de "corriente de fuga". Para evitar esta importante fuente de ruido, un método

alternativo de "dopaje" en la superficie del semiconductor es exponer la superficie a un haz de iones. Este método es conocido como implantación de iones. Un método particular de fabricación de detectores de sílice combina la técnica de la implantación de iones y la fotolitografía para producir detectores conocidos en el mercado como detectores de silicio planar de iones pasivos, que tienen corrientes de fuga muy bajas y excelentes características operativas para obtener una resolución de energía superior.

La red periódica de materiales cristalinos establece bandas de energía permitidas para los electrones que existen dentro de ese sólido. La energía de cualquier electrón dentro del material puro debe estar confinada a una de estas bandas de energía, que puede estar separada por huecos o rangos de energías proyectadas. En la figura 11.1 se muestra una representación simplificada de las bandas de interés en aisladores o semiconductores. La banda inferior, llamada banda de valencia, corresponde a los electrones de la capa externa que están unidos a sitios específicos de la red dentro del cristal.

En el caso del silicio o el germanio, son partes del enlace covalente que constituyen las fuerzas interatómicas dentro del cristal. La siguiente banda más alta se llama banda de conducción y representa electrones que son libres de migrar a través del cristal. Los electrones en esta banda contribuyen a la conductividad eléctrica del material. Las dos bandas están separadas por el intervalo de banda, cuyo tamaño determina si el material se clasifica como semiconductor o aislante.

El número de electrones dentro del cristal es suficiente para llenar completamente todos los sitios disponibles dentro de la banda de valencia. En ausencia de excitación térmica, tanto los aisladores como los semiconductores tendrían una configuración en la que la banda de valencia está completamente llena y la banda de conducción completamente vacía. Bajo estas circunstancias, ninguno de los dos mostraría teóricamente ninguna conductividad eléctrica.

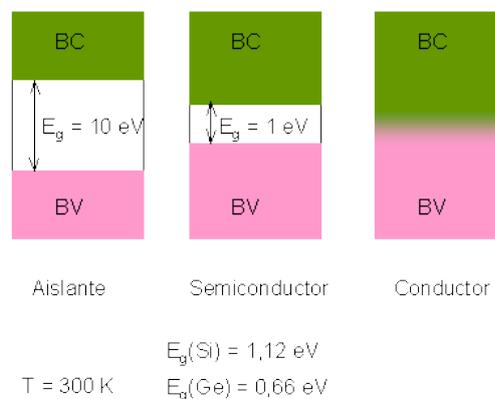


Figura 9-2: Estructura de bandas para energías de electrones en aisladores y semiconductores.
Realizado por: Carpio, Luis, 2014.

En un metal, la banda de energía ocupada más alta no está completamente llena. Por lo tanto, los electrones pueden migrar fácilmente a través del material porque necesitan alcanzar solo una pequeña energía incremental para estar por encima de los estados ocupados. Por lo tanto, los metales siempre se caracterizan por una conductividad eléctrica muy alta. Por otro lado, en aisladores o semiconductores, el electrón primero debe cruzar el intervalo de banda para alcanzar la banda de conducción y la conductividad es, por lo tanto, muchos órdenes de magnitud más baja. Para los aisladores, el intervalo de banda suele ser de 5 eV o más, mientras que, para los semiconductores, el intervalo de banda es considerablemente menor (Knoll y Wiley, 2000, p. 354).

El detector de gas radón RAD7 producido por DURRIDGE Company (Figura 2-8)(DURRIDGE, 2014, pp. 3–4) es un equipo iónico planar semiconductor de silicio, combinado con una colección electrostática de radón y sus hijos emisores alfa. El sistema permite medir el radón y el torón utilizando un análisis de energía espectral, discriminando la energía de las partículas alfa. El detector RAD7 usa solo la señal de polonio-218 para determinar la concentración de radón, y la señal de polonio-216 para determinar la concentración de torón. El límite de detección del aparato es igual a $0.01 \text{ Bq} / \text{h}$ para el radón y $6 \text{ Bq} / \text{h}$ para el torón. Este detector permite recopilar información sobre la temperatura y la humedad relativa durante la medición del radón (Tuccimei, Moroni y Norcia, 2006, pp. 1–2).

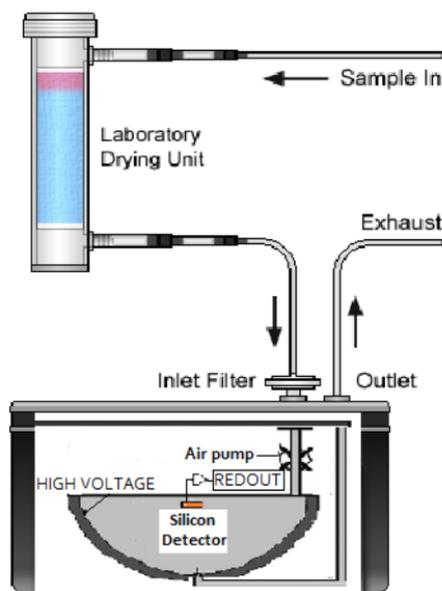


Figura 10-2: Configuración experimental del RAD7 para toma de muestras en aire.
Realizado por: DURRIDGE Company, 2014.

Debido a la sensibilidad a la humedad, RAD7 debe funcionar con una humedad relativa inferior al 10% (8 si es posible). La alta humedad mejora la neutralización de ^{2218}Pb de las moléculas de

agua, reduciendo la eficiencia del detector. Un software dedicado, producido por DurrIDGE, correcto para este efecto.



Figura 11-2: Partes externas del Detector RAD7.
Realizado por: DURRIDGE Company, 2014.

Especificaciones del RAD7

Tabla 7-2: Funcionalidad del RAD7

| | |
|--------------------------------|---|
| Modos de operación | <ul style="list-style-type: none"> • SNIFF Respuesta rápida y medición de radón de recuperación rápida • Medida de radón de alta sensibilidad NORMAL • AUTO Cambio automático de SNIFF a NORMAL después de tres horas de funcionamiento • THORON Radón y torón medidos simultánea e independientemente. • Análisis de GRAB del aire "agarrado" de una muestra discreta • WAT Análisis automático de muestras de agua con accesorio opcional RAD H₂O |
| Mediciones | <ul style="list-style-type: none"> • Radón en el aire con protocolo Sniff para una lectura rápida y precisa • Thoron en el aire para buscar puntos de entrada de radón • Protocolo de radón en el aire de 1 día, 2 días o semanas para mediciones a largo plazo • Muestras de lotes de radón en agua con accesorios opcionales RAD H₂O y Big Bottle System • Radón continuo en agua con accesorios opcionales de RAD AQUA y Radon-in-Water Probe • Radón en gas de suelo con sonda de gas de suelo y accesorios DRYSTIK opcionales • Emisión de radón desde el suelo y superficies duras con accesorio opcional de cámara de emisión de superficie • Emisión de radón a granel de materiales y objetos a granel con accesorio opcional de cámara de emisión a granel |
| Almacenamiento de datos | 1.000 registros, cada uno con 23 campos de datos Registro de salida de impresora también almacenado |

| | |
|--------------------------------------|---|
| Bombeo de muestra | La bomba incorporada extrae una muestra del punto de muestreo elegido Velocidad de flujo típicamente 800 ml / min |
| Salida de impresión | Sh ORT, Medio o datos de formato largo impresas después de cada ciclo Resumen Ejecutar impresa al final de la carrera, incluyendo los promedios y Spectru m |
| Conectividad de PC | Puerto serie RS232, control remoto completo implementado en el software CAPTURE. Adaptador serie a Bluetooth opcional para conectividad inalámbrica de PC. |
| Salida de audio | <ul style="list-style-type: none"> • Tono GEIGER emite un pitido para los recuentos de radón y torón • CHIME Chime solo al final de cada ciclo, de lo contrario silencioso • OFF No hay sonido |
| Resistencia a la manipulación | El comando TEST LOCK bloquea el teclado para asegurar contra la manipulación indebida |

Fuente: Detector de radón RAD7 manual en español.

Realizado por: (DURRIDGE, 2014)

Tabla 8-2: Especificaciones técnicas de RAD7.

| | |
|--|---|
| Principio de funcionamiento | Recopilación electrostática de emisores alfa con análisis espectral Detector de silicio planar implantado con iones pasivos El modo SNIFF cuenta con decaimientos de polonio-218 El modo NORMAL cuenta con los decaimientos tanto de polonio 218 como de polonio 214 |
| Bomba de aire incorporada | Conectores Luer nominales de 1 litro / minuto de flujo de entrada y salida |
| Conectividad | El puerto RS-232 de hasta 19,200 baudios. El adaptador USB se incluye con cada RAD7. |
| Precisión de la medición | +/- 5% de precisión absoluta, 0% - 100% RH |
| Sensibilidad nominal | Modo SNIFF, 0.25 cpm / (pCi / L), 0.0067 cpm / (Bq / m ³) Modo NORMAL, 0.5 cpm / (pCi / L), 0.013 cpm / (Bq / m ³) |
| Rango de concentración de radón | 0,1 - 20,000 pCi / L (4 - 750,000 Bq / m ³) |
| Fondo intrínseco | 0,005 pCi / L (0,2 Bq / m ³) o menos, durante la vida útil del instrumento |
| Tiempo de recuperación | La actividad residual en el modo Olfato se reduce en un factor de 1,000 en 30 minutos |
| Rangos de operación | Temperatura: 32 ° - 113 ° F (0 ° - 45 ° C) Humedad: 0% - 100%, sin condensación |
| Rango de ciclo | Número de ciclos controlables por el usuario, de 1 a 99 a ilimitado, por ciclo de tiempo controlable por el usuario, de 2 minutos a 24 horas |
| Software CAPTURE | <ul style="list-style-type: none"> • Compatible con Microsoft Windows 7 a 10, y macOS • Conexión automática RAD7 y descarga de datos. • Gráficos de radón, torón, temperatura y humedad en el tiempo. • Corrección automática de la humedad. • Herramientas de análisis estadístico rastrean los promedios de concentración y las incertidumbres. • Controle las operaciones del RAD7 desde la computadora a través de conexión directa o remota • Cálculo automático y visualización del radón en el agua con los accesorios RAD H₂O, RAD AQUA y Water Probe opcionales. |

Fuente: Detector de radón RAD7 manual en español.

Realizado por: (DURRIDGE, 2014)

Es importante tener en cuenta el certificado de calibración del equipo el cual es emitido por la empresa encargada de su fabricación, así sabremos que las medidas tomadas en este trabajo son verídicas y confiables (ANEXO A).

Cámaras de ionización.

Todos los tipos de detectores de radiación más antiguos y más utilizados se basan en los efectos producidos cuando una partícula cargada pasa a través de un gas. Los modos primarios de interacción involucran la ionización y la excitación de las moléculas de gas a lo largo de la pista de partículas. Aunque las moléculas excitadas a veces se pueden usar para derivar una señal apropiada, la mayoría de los detectores llenos de gas se basan en la detección de la ionización directa creada por el paso de la radiación.

En principio, las cámaras de iones son los más simples de todos los detectores llenos de gas. Su funcionamiento normal se basa en la recopilación de todas las cargas creadas por la ionización directa dentro del gas mediante la aplicación de un campo eléctrico. Al igual que con otros detectores, las cámaras de iones se pueden operar en modo de corriente o de pulso. A medida que una partícula de carga rápida pasa a través de un gas, los tipos de interacción crean tanto moléculas excitadas como moléculas ionizadas a lo largo de su trayectoria.

Después de que se ioniza una molécula neutra, el ion positivo resultante y el electrón libre se denominan un par de iones y sirve como el componente básico de la señal eléctrica desarrollada por la cámara de iones. Los iones pueden formarse mediante una interacción directa con la partícula incidente o mediante un proceso secundario en el que parte de la energía de la partícula se transfiere primero a un electrón energético o "rayo delta". Independientemente de los mecanismos detallados involucrados, la cantidad práctica de interés es el número total de pares de iones creados a lo largo de la trayectoria de la radiación.

Tabla 9-2: Valores de la disipación de energía por par de iones (el valor W) para diferentes gases

| Gas | Primer potencial de ionización | W- Valor (eV/par ion) | |
|-----|--------------------------------|-----------------------|-----------------|
| | | Electrones | Partículas alfa |
| Ar | 15.7 | 26.4 | 26.3 |
| He | 24.5 | 41.3 | 42.7 |
| H2 | 15.6 | 36.5 | 36.4 |

| | | | |
|------|------|------|------|
| N2 | 15.5 | 34.8 | 36.4 |
| Aire | | 33.8 | 35.1 |
| O2 | 12.5 | 30.8 | 32.2 |
| CH4 | 14.5 | 27.3 | 29.1 |

Fuente: Values for W from ICRU Report 31, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair," International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC, 1979

Como mínimo, la partícula debe transferir una cantidad de energía igual a la energía de ionización de la molécula de gas para permitir que ocurra el proceso de ionización. En la mayoría de los gases de interés para los detectores de radiación, la energía de ionización para las envolturas de electrones menos estrechamente unidas es de entre 10 y 25 eV. Sin embargo, hay otros mecanismos por los cuales el participio incidente puede perder energía dentro del gas que no crea iones.

Algunos ejemplos son los procesos de excitación en los que un electrón puede elevarse a un estado de enlace superior en la molécula sin ser eliminado completamente. Por lo tanto, la energía promedio perdida por la partícula incidente por par de iones formado (definido como el valor W) es siempre sustancialmente mayor que la energía de ionización.

2.4.3.2. Detectores pasivos

En los detectores pasivos, el radón entra por el mecanismo de difusión [9]. Son útiles para mediciones integradas durante largos periodos de tiempo. Lucas Cell se puede usar como detector pasivo. El detector pasivo de radón pasivo (CPRD, por sus siglas en inglés) es una celda de centelleo particular proporcionada por la compañía de desarrollo electrónico PYLON que se usa con el monitor AB-5. La cámara ionizante AlphaGUARD, funciona en una dirección optimizada y se considera una detección pasiva. Además de ellos, la cámara de iones de electrones es considerada definitivamente como un detector pasivo.

CPRD

El CPRD es una célula de centelleo particular proporcionada por PYLON Electronic development Company. Esta celda de centelleo pasivo es un cilindro de metal con cuatro orificios en un lado y se abre en el otro. Los cuatro orificios pequeños tienen una barrera de espuma de polietano a prueba de luz y el extremo abierto encaja contra el fotomultiplicador contenido en el pilón AB-5. El aire se usa a través de la barrera y se deposita dentro del cilindro, luego las partículas alfa, provenientes de la descomposición del radón, siguen el mismo proceso de centelleo (Tene, 2017).

Cámara de iones - electretes

Un cámara de iones configurada con un electrete, es un tipo particular de cámara de ionización, que consiste en una pequeña taza o bote con un campo electrostático permanente provisto de un electrete en la parte inferior, una entrada de filtro está presente en la parte superior. El ^{222}Rn ingresa fácilmente a través del filtro, cuando se descompone dentro de la cámara emitiendo una partícula alfa que puede generar ionización, los iones son recolectados por el electrete cargado positivo. La reducción de la carga (o potencial de superficie) en el electrete es proporcional al número de iones recogidos.

Se pueden usar para mediciones preliminares a corto plazo (pocos días) o mediciones a largo plazo (meses) con un límite de detección por día de $10 \text{ KBq} / \text{m}^3$ respectivamente.

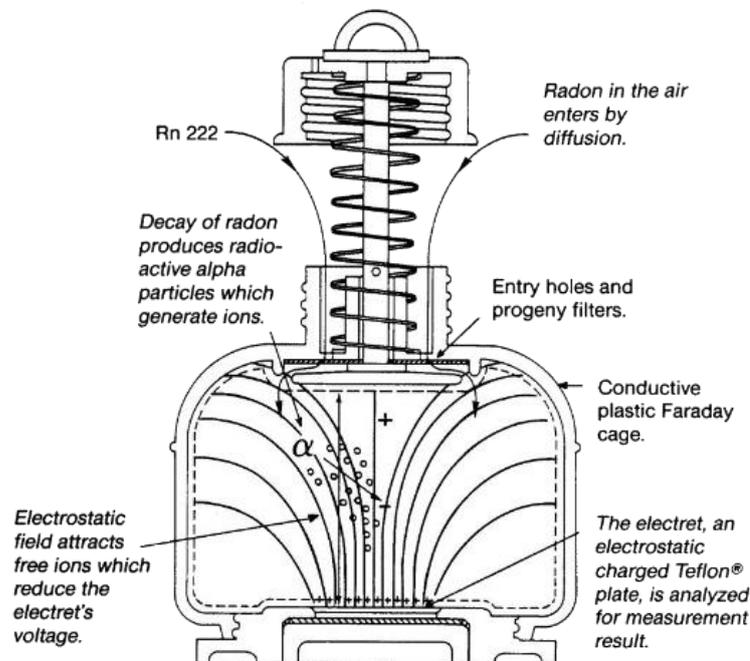


Figura 12-2: Esquema interno de un E-PERM.

Fuente: Rad Elec Inc, 2014.

2.5. Método de la cámara cerrada.

Las concentraciones de radón en interiores, depende mucho de la exhalación de radón del material de construcción el cual contribuye de manera relevante, aumentando la exposición de las personas que viven o trabajan en estos lugares. La exhalación de radón (^{222}Rn) de los materiales de construcción está determinada por la generación de radón y su transporte diferencial, mientras que el transporte diferencial depende de la porosidad, permeabilidad, estructura del grano y contenido de humedad del material. (Tene, 2017, p. 45)

El método de la cámara cerrada se ha empleado en numerosos estudios en cuanto a exhalación de radón en materiales de construcción, ya que nos permite obtener medidas precisas a más de esto también tomaremos en cuenta tasa de difusión de retroceso como la tasa de fuga de la cámara, es muy importante notar ciertos parámetros físicos que deben cumplir las muestras como por ejemplo, la porosidad, el tamaño del grano por el que se encuentran formada cada muestra, entre otros parámetros que se pueden diferenciar a simple vista.

Para que se dé el proceso de exhalación de radón por parte del material de construcción, es necesario que se dé el proceso de difusión, proceso mediante el cual el gas radón se mueve de un sistema a otro, ya sea que se movilice o escape del agua hacia el aire o de un sólido (material de construcción) hacia el aire, esto se debe a los movimientos moleculares aleatorios, así en gases el proceso es mucho más rápido (10cm/min), en líquidos es menos rápido (0.05cm/min) y en sólidos es mucho más lento (0.00001cm/min), es importante notar que la difusión dependerá de varios factores como la temperatura, presión y tamaño del grano (Masaro y Zhu, 1999, p. 733).

Dentro de la cámara estamos imitando como sería el escape de el gas radon al aire a través de los diferentes materiales de construcción utilizados en construcción, este proceso de liberación de radon se da mediante los espacios de los granulos de dichos materiales, y debido al proceso de retroceso y difusión. El procedimiento de retroceso se da cuando un átomo de radio decae en radon, la energía que genera es lo suficientemente fuerte como para enviar el átomo de radon a una distancia alrededor de 40nm, el coeficiente de difusión de gas radon en los granos del sólido típicamente varían en el rango de $10^{-25} - 10^{-27} \text{ m}^2/\text{s}$, es muy bajo, entonces se asume que la exhalación de radon se debe principalmente al el proceso de retroceso o también conocido como el “back diffusion”.

El radón en el espacio intersticial puede ser transportado a la superficie por difusión y flujo advectivo antes de que el radón alcance finalmente la atmósfera abierta. En difusión, el gas radón se mueve con respecto al fluido que llena los poros (aire y agua) del medio; mientras que en el flujo advectivo, el fluido mismo se mueve a través del medio poroso y lleva radón con él. (Sahu, Panigrahi y Mishra, 2016, pp. 3-4)

El método de la cámara cerrada consiste principalmente en encerrar el material de construcción dentro de la cámara hermética, el radon se exhala al volumen libre de la cámara y se acumula al pasar el tiempo. El radon alcanzara un estado de equilibrio después de unas pocas horas o varios días dependiendo de la concentración de gas radon del material de construcción, este estado de equilibrio se da entre el nucleido exhalado y descompuesto, el estado de equilibrio se va a modificar por la radiación de retorno de la muestra o la pérdida de gas dentro de la cámara por la fuga de la misma, pero el retroceso se puede considerar despreciable ya que el volumen del aire libre dentro de la cámara es significativamente mayor que el volumen de la muestra a analizarse.

Ya que nuestra cámara es lo suficientemente grande a comparar con el volumen de las muestras, entonces podemos decir que se evita el efecto de retroceso en un porcentaje bastante alto.

2.5.1. Concentración de ^{222}Rn dentro de la cámara (muestra dentro de la cámara).

Sabemos que al momento en que encerramos un material de construcción dentro de la cámara vamos a tener una exhalación continua de dicho material, por lo tanto, el ^{222}Rn se ira acumulando simultáneamente y así dentro de la cámara la concentración de radón crecerá mientras pasa el tiempo hasta llegar a un estado de equilibrio, para esto es necesario realizar un análisis de balance de masas, así podemos observar que la ecuación 11 nos permite describir este proceso.

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{E_0 m}{V} + \lambda_L C_{Bg} - \lambda_{eff} C \quad (11)$$

Donde,

$$\lambda_{eff} = \lambda_{Rn} + \lambda_L + \lambda_{Bd} \quad (12)$$

Asumimos que λ_{Bd} es despreciable, esto debido a que el volumen de la cámara es mucho mayor que el volumen de la muestra.

El primer término de la ecuación 11 nos permite observar la dependencia de la contribución de la tasa de exhalación de ^{222}Rn en masa (m) y V representa el volumen neto de la cámara. El segundo término representa el intercambio de radón entre el laboratorio y nuestra cámara, y el tercer término nos indica el decaimiento que se representa por una tasa de caída efectiva en donde se encuentra la constante de decaimiento de radón (Tene, 2017, p. 52).

E_0 , representa la velocidad de emanación de radón cuando $C = 0$. La tasa de emanación de radón sigue una relación lineal con la concentración de radón dentro de la cámara y puede expresarse mediante la ecuación 13.

$$E = E_0 - \frac{DV}{m} C \quad 13$$

El segundo término de la ecuación 13 se lo define como el coeficiente de difusión de retroceso específico, o también se lo conoce como “back diffusion”.

La solución a la ecuación 11 tomando en cuenta las condiciones iniciales como $C(t)=C_i$ y $t=0$, donde C_i es la concentración inicial, es:

$$C = C_i e^{-\lambda_{eff} t} + \frac{E_0 m}{V \lambda_{eff}} (1 - e^{-\lambda_{eff} t}) + \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_{eff}} (1 - e^{-\lambda_{eff} t}) \quad 14$$

$$C = C_i e^{-\lambda_{eff} t} + (1 - e^{-\lambda_{eff} t}) \left(\frac{E_0 m + \lambda_L C_{Bg} V}{V \lambda_{eff}} \right) \quad 15$$

La concentración inicial C_i , puede variar, dependiendo del método de limpieza empleado, para así retirar cualquier residuo de dentro de la cámara.

2.5.2. Determinación de la tasa de fuga de la cámara, λ_L .

Un método para determinar la tasa de fuga de la cámara consiste en, acumular una cantidad de radón dentro de la cámara usando una fuente de radio o una muestra de material que exhale una gran cantidad de radón. Una vez que ha acumulado una cierta cantidad de radón retirar la fuente o muestra, de tal manera que solo el radón acumulado quede dentro de la cámara. Una vez que se ha logrado almacenar esta cierta cantidad de radón dentro de la cámara registrar la curva de decaimiento y realizar una comparación entre la curva experimental de decaimiento (ver ec. 17) y la curva teórica (ver ec. 19). La diferencia entre la pendientes iniciales: pendiente teórica M_f menos pendiente experimental M_L , permite encontrar la tasa de fuga de la cámara.

Para encontrar la curva experimental del decaimiento del radón dentro de la cámara, se plantea el siguiente balance de concentración de radón:

$$\frac{dC_{Rn}}{dt} = -\lambda_{Rn} C_i + \lambda_L C_{Bg} - \lambda_L C_{Rn} \quad (16)$$

Resolviendo la ecuación 16, tenemos que la concentración de radón en la cámara es:

$$C_{Rn} = \left(C_i - \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_{Rn} + \lambda_L} \right) e^{-\lambda_{eff} t} + \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_{Rn} + \lambda_L} \quad (17)$$

En el límite, cuando $t \rightarrow 0$, $C_{Rn}(0) \rightarrow C_i$ donde C_i , es la concentración inicial de radón dentro de la cámara, resulta que:

$$\frac{dC_{Rn}}{dt_{(t \rightarrow 0)}} = M_L = - \left(C_i - \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_{Rn} + \lambda_L} \right) (\lambda_{Rn} + \lambda_L)$$

$$M_L = -\lambda_L C_i - \lambda_{Rn} C_i + \lambda_L C_{Bg} \quad (18)$$

Donde M_L , es la pendiente inicial experimental de la curva de decaimiento incluyendo la tasa de fuga λ_L del sistema real.

Si se diera el caso donde la cámara tiene una tasa de fuga cero, sería considerado el caso ideal, entonces tendríamos que la concentración de radón tiene la siguiente forma,

$$C_{Rn}(t) = C_i e^{-\lambda_{Rn} t} \quad (19)$$

$$\frac{dC_{Rn}(t)}{dt_{(t \rightarrow 0)}} = M_f = -\lambda_{Rn} C_i \quad (20)$$

Donde M_f es la pendiente inicial teórica de la curva de decaimiento ideal.

Para encontrar la tasa de fuga comparamos la ecuación (18) y la ecuación (20):

$$M_f - M_L = (C_i - C_{Bg}) \lambda_L \quad (21)$$

$$\lambda_L = \frac{M_f - M_L}{(C_i - C_{Bg})} \quad (22)$$

Por lo tanto, para calcula la tasa de fuga, debemos obtener la pendiente inicial teórica, la pendiente inicial experimental, la Concentración inicial de radón dentro de la cámara y la Concentración de fondo del Laboratorio.

2.5.3. Determinación de la tasa de exhalación de radón, E.

Para llevar a cabo el cálculo de la tasa de exhalación, se debe colocar la muestra de material de construcción dentro de la cámara durante un periodo de tiempo considerable y registrar los datos. Después de este intervalo de tiempo el radón contenido dentro de la muestra, será exhalado al ambiente de la cámara y se acumulará. Si la concentración de radón aumenta, luego de un determinado tiempo característico para cada muestra, llegará a saturar. Esta saturación se produce ya que la cantidad de radón exhalada es igual a la cantidad de radón que decae.

Existen dos métodos de cálculo de la tasa de exhalación del radón, ***Método de Saturación y Método de la Pendiente Inicial.***

Método de la Pendiente Inicial

Si realizamos el diferencial de la ecuación 15, cuando el tiempo tiende a cero, podemos obtener la pendiente inicial de la curva, M_e , la cual es independiente de la difusión de retroceso.

$$\frac{dC}{dt_{(t \rightarrow 0)}} = M_e = \frac{Em}{V} + \lambda_L C_{Bg} - \lambda_{eff} C_i \quad 23$$

De esta manera al despejar la Exhalación tenemos:

$$E = (M_e - \lambda_L C_{Bg} + \lambda_{eff} C_i) \frac{V}{m} \quad 24$$

La tasa de exhalación de la muestra se puede determinar después de conocer la tasa de fuga de la cámara, λ_L , y la concentración de radón ambiental dentro del laboratorio, C_{Bg} , la pendiente inicial experimental, M_e , la concentración inicial, C_i , el coeficiente efectivo, λ_{eff} , el volumen de la cámara, V , y la masa de cada muestra analizada, m .

La pendiente inicial puede obtenerse mediante inspección visual o ajustando los datos de las primeras horas mediante la técnica de regresión lineal.

Método de Saturación

Cuando la muestra satura entonces se puede decir que la muestra ha llegado un equilibrio entre el radón producido y el radón que decae, así derivando la ecuación 15, cuando $t \rightarrow \infty$, resulta la siguiente ecuación:

$$C(\infty) \cong \frac{E m}{V \lambda_{eff}} + \frac{\lambda_L C_{Bg}}{\lambda_{eff}} \quad 25$$

Y a partir de la ecuación 25 podemos obtener el coeficiente de exhalación másico.

$$E = (C_\infty \lambda_{eff} - \lambda_L C_{Bg}) \frac{V}{m} \quad 26$$

Mediante la ecuación 15 podemos realizar un ajuste global, en donde se puede extraer los valores de $C(\infty)$.

2.5.4. Dosis efectiva, D_a .

La dosis efectiva es considerada una magnitud como la sumatoria ponderada de las dosis equivalentes cuando se ha depositado radiación en diferentes tejidos y órganos pertinentes "con el fin de indicar la combinación de diferentes dosis en diferentes tejidos de manera que sea posible la correlación con el total de los efectos estocásticos ". Esto es, por tanto, aplicable, aunque la distribución de la dosis absorbida por el cuerpo humano no sea homogénea. La unidad es el julio por kilogramo ($J\ kg^{-1}$) y se le da el nombre especial de sievert (Sv). La UNSCEAR reporta en el año 2006 que la dosis efectiva al año por inhalación debe ser de 1.1 mSv/año (UNSCEAR, 1988, p. 79) Así tenemos la siguiente expresión,

Concentración de radón, C .

En condiciones naturales la tasa de radón $J(Bq/h)$ suministrada en una casa es igual a la cantidad de radón que se elimina.

$$J = \lambda_v VC \quad 27$$

Donde λ_v es la tasa de intercambio de aire (se asume normalmente como $0.5h^{-1}$), V es el volumen de una habitación estándar, y C es la concentración interna de radón (Bq/m^3). Así, C puede ser calculado de la siguiente forma:

$$C = \frac{J}{\lambda_v V} \quad 28$$

En los cálculos, asumimos que el aire de la casa se mezcla, es decir, tiene un intercambio de aire de $0.5h^{-1}$ y que se puede tratar como una sola zona.

Dosis efectiva anual por inhalación.

El radón inhalado, al ser un gas noble, está constantemente presente en el volumen de aire de los pulmones a la concentración en el aire y se disuelve parcialmente en los tejidos blandos.

La dosis efectiva evaluada por año debido a la inhalación de radón (UNSCEAR, 1988) es:

$$D_a = FC * C * \tau \quad 29$$

Donde:

D_a : Dosis anual efectiva anual

FC : Parámetro de conversión

C : Concentración de radón.

τ : Tiempo medio que la persona que inhala el ^{222}Rn en un año.

2.5.5. Fondo, C_{Bg} .

Un parámetro muy importante para obtener el índice de exhalación de los materiales de construcción y el λ_L , es la concentración de fondo C_{Bg} , varias investigaciones registran que ha sido necesario tomar en cuenta este parámetro así tenemos a (Chao *et al.*, 1997) que usaron la concentración medida en el laboratorio en cual se encuentra instalada la cámara y en donde se tomaron las medidas de las muestras, este procedimiento no toma en cuenta la variación de las estaciones, y la diferencia que haya entre el día y la noche en la concentración medida.

Es importante también tomar en cuenta que, dependiendo de la temperatura, la concentración en el laboratorio puede variar entre un 20 a un 30%. En la gráfica 3-3 se muestra el fondo natural del laboratorio de Técnicas Nucleares de la Facultad de Ciencias.

2.6. Descripción del área de estudio.

Cantón Riobamba

La Provincia de Chimborazo presenta suelos que se caracterizan por ser de naturaleza volcánica formados a partir de materiales piroclásticos producto de erupciones pasadas, además existen suelos pantanosos propios de los páramos, en la parte occidental se pueden encontrar suelos francos que son propicios para la agricultura ya nivel de los andes suelos rocosos.

A más de esto se puede decir que las actividades volcánicas del Tungurahua contribuyen también a la composición singular del suelo, ya que entre las áreas afectadas se encuentra el cantón

Riobamba, el factor que domina este tipo de fenómeno es principalmente la dirección de vientos altos, los que podrían provocar cierta variación de las zonas amenazadas.

El cantón Riobamba es la capital de la Provincia de Chimborazo, se encuentra en el centro geográfico de la República del Ecuador en la cordillera de los Andes a 2.750 msnm, se ubica entre las coordenadas: -1.66667 latitud y -78.6333 longitud, limita al norte con los cantones Guano y Penipe, al sur con los cantones Colta y Guamote, al este el cantón Chambo, y al oeste la Provincia de Bolívar (ver Figura 2-14).



Figura 13-2: Mapa del cantón Riobamba
Fuente: OTCh, 2015.

El cantón Riobamba tiene una superficie de 6.569 km, su altitud promedio es de 2.750 msnm y su población aproximada es 156.723 habitantes, el terreno lo constituye una facie volcánica del Chimborazo como resultado del arrastre de material piroclástico desde las faldas del volcán, por las corrientes de los deshielos, formado básicamente por arcillas tobas y ceniza volcánica. Los suelos que presentan el cantón y la provincia son suelos arenosos derivados de materiales piroclástico, poco meteorizados con baja retención de humedad.

Según el Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de Chimborazo realizado en el año 2017 y documentos obtenidos del Ministerio de Urbanización y Vivienda de Chimborazo (ANEXO B), ubicado en la ciudad de Riobamba los materiales de construcción más utilizados son el bloque, ladrillo y hormigón armado, además se ha determinado analizar el material más llamativo para los acabados como lo es el granito. Según censos de INEC y encuestas de edificaciones del 2016 y 2017 el bloque y el hormigón armado son los materiales más utilizados en todo el territorio ecuatoriano (ANEXO C).

Para cada una de las muestras es necesario darles un tratamiento previo el cual nos permitirá obtener mejores resultados, el pretratamiento consiste básicamente en dejarlas por 48h en un lugar donde puedan secarse y así reducir su cantidad de agua, esto debido a que las muestras en el lugar donde las almacenamos no están cubiertas de la lluvia y las encontramos a la intemperie.

Como se había mencionado anteriormente las muestras que se analizaran se han enlistado a continuación con una pequeña descripción del proceso para obtenerlas.

Arcilla

La arcilla está constituida por aluminosilicatos cristalinos o amorfos definidos como minerales propios de arcilla, son partículas minerales pequeñas de tamaños microscópicos, cuyo tamaño es menor o igual a dos micras, está abundantemente distribuida en la naturaleza y es constituyente importante de la corteza terrestre, originadas principalmente por rocas sedimentadas, geológicamente se clasifican como primarias que permanecieron en su lugar de origen y secundarias que fueron acarreadas de su lugar de origen. Las arcillas son consideradas como un material que, en la industria de la construcción, se utiliza tanto en la fabricación de cemento y es un ingrediente importante en materiales como ladrillos, tejas, pisos, baldosas, vidrio etc. (Besoain, 1985).



Figura 14-2: Tejas de arcilla.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

Arena macadán y de río

La arena es un tipo de árido compuesto por sílice o dióxido de silicio, cuyo tamaño varía entre los 4.75 y 0.075 mm dependiendo del uso para el que sea destinada, generalmente la arena tiene un origen natural: es extraída de canteras aluviales, ríos, lagos o depósitos volcánicos, pero también se puede obtener en forma artificial mediante la trituración de rocas por medios mecánicos. La arena fina se utiliza para la mampostería, mientras que la arena gruesa se utiliza en la industria de la construcción para fabricar pisos o como parte de la cimentación, ya que tiene la cualidad de reducir las fisuras que aparecen en la mezcla al endurecerse (Materiales de construcción, 2011).



Figura 15-2: Arena de río.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

Bloque

Conocemos que el bloque es un material utilizado específicamente en mampostería, su elaboración inicia partir de los materiales primos que se obtiene de minas en la ciudad de Latacunga, la materia prima utilizada es el chasqui o piedra pómez pulverizada, arena filtrada a la cual los artesanos la denominan como “polvo”, cemento y agua, su elaboración consiste en realizar una mezcla de estos materiales en una maquinaria a la cual se la conoce como “mezcladora” esto se realiza hasta lograr obtener una mezcla homogénea y compacta para lograr un material resistente y regirse a las normas de construcción. Para finalizar el proceso se lo coloca en moldes individuales y se los pasa por una máquina que los comprime fuertemente hasta que el bloque tenga la consistencia que lo caracteriza (ver figura 3-5), el secado se lo hace al sol y se agregan pequeñas cantidades de agua cada cierto tiempo para así evitar que este se agriete y se parta.



Figura 16-2: Proceso de elaboración de bloque en el cantón Riobamba.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

Ladrillo

El ladrillo es una pieza de arcilla cocida que tiene una forma de prisma rectangular utilizado principalmente en la construcción de muros y paredes. En el Cantón Riobamba y sus alrededores se realiza la elaboración de ladrillo de manera artesanal, los artesanos que realizan esta labor han tomado este oficio por tradición cultural en su mayoría y una costumbre ya que familias completas se han dedicado a esta labor.

Entre los materiales primos utilizados en este proceso tenemos tierra negra la cual es extraída de minas ubicadas a unos kilómetros de Chambo, aserrín el cual ayuda a darle mayor consistencia al ladrillo, además facilita la cocción, ceniza de la cocción de ladrillos anteriormente elaborados y agua para facilitar la mezcla de todos estos materiales, se puedan moldear y sean más maleables. Este proceso se inicia desde muy temprano, es decir a horas de la madrugada, lo primero que se hace es mezclar todos estos componentes, para tenerlos listos en cuanto sale el sol y colocarlos en los moldes, los cuales son de madera y permiten dar forma a varios ladrillos o como en este punto se los conoce como “adobes” debido que aún no han sido cocidos.



Figura 17-2: Proceso de elaboración de ladrillo.

Realizado por: Hidrovo, Damaris ,2018.

Para continuar con el proceso, se requiere de 20 metros cúbicos de leña, preferible eucalipto, para que el horno pueda arder alrededor de 3 días aproximadamente, luego de estos 3 días se calcina a una temperatura baja y se lo deja por 8 días, en cada horno (véase figura 3-7) se colocan cerca de 20 mil adobes para la cocción.



Figura 18-2: Horno donde se lleva el proceso de cocción de los adobes.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

Hormigón armado

El hormigón armado (Figura 3-8) es una mezcla de varios tipos de materiales que permiten establecer cimientos fuertes y proteger la armadura interna de una casa o edificio, una estructura de hormigón armado está formada por principalmente por cemento, arena de río, piedra triturada y una armadura metálica, para este estudio hemos decidido hacer un pequeño bloque con estos materiales para analizarlo en nuestra cámara.

Granito

Es una roca compacta compuesta de minerales como cuarzo, feldespato, y mica, y por la proporción de estos componentes adquiere diferentes tonalidades. La formación de estos granitos se da por el enfriamiento y la solidificación del magma, por este motivo se le conoce como roca ígnea, también se lo conoce como roca intrusiva o plutónica. Hay diferentes tipos de tonalidades de este material, pero la composición es la misma, este material se importa de diferentes países como Brasil e Italia.

CAPITULO III

3. DISEÑO Y EXPERIMENTACION

3.1. Procedimiento experimental



Figura 1-3: Procedimiento experimental.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

3.1.1. Construcción de la Cámara cerrada.

La configuración experimental, la podemos observar en la fig. 3-2. La cámara, disponible en el Laboratorio Nuclear de Técnica de nuestra Facultad, está hecha con seis láminas de vidrio incoloro. Las hojas tienen un área libre de 50 x 50 cm² y tienen un grosor de 1,5 cm. Para unirlos se empleó silicona a prueba de agua, adicionalmente se fijaron con ángulos de aluminio en cada borde para asegurar la estanqueidad de la caja. La firmeza ha sido probada llenando la cámara con agua; después de varios días no se observó agua o humedad alrededor de la cámara y a lo largo de las uniones. El volumen de la cámara es de 125 l. La hoja superior es movable para insertar la muestra y la instrumentación.

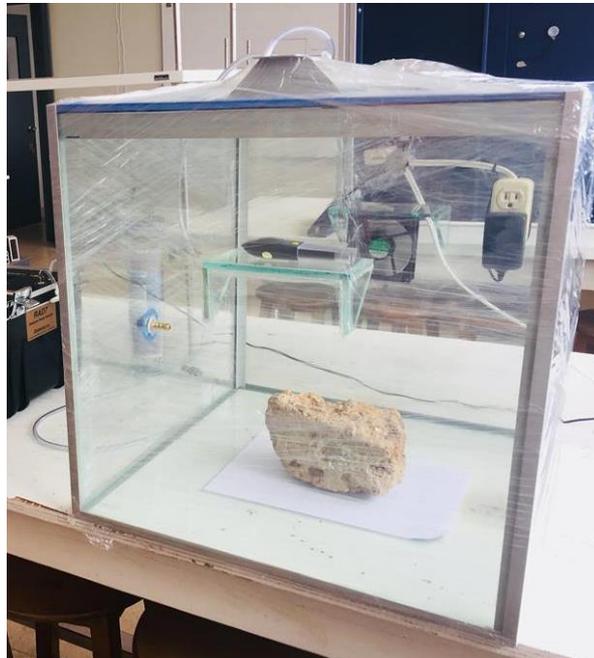


Figura 2-3: Esquema de la cámara cerrada.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

La cámara incluye las siguientes herramientas: una fuente de alimentación para el detector interno; un ventilador de 12V utilizado para mezclar el aire dentro de la cámara; un estante para instrumentos de soporte (por ejemplo, estación meteorológica, etc.).

Las mediciones se realizarán por un detector alfa de estado sólido RAD7, de Durrige Company, Estados Unidos una característica muy importante de este equipo es que tiene gran sensibilidad a la humedad y ofrece resultados en términos de concentración de actividad del radón correlacionada con información sobre temperatura y humedad.

El detector RAD7 ofrece la oportunidad de una medición contemporánea de la temperatura y la humedad durante la acumulación y presenta resultados ya en términos de concentración de la actividad, la gran susceptibilidad a la humedad del aire requiere una corrección importante. Durrige Company ofrece un software, pero no está claro cuáles son los límites de la aplicabilidad de la corrección y la contribución en términos de incertidumbres.



Figura 3-3: Configuración experimental del método de la cámara cerrada.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

3.2. Selección de la muestra.

Para la selección de la muestra nos basamos en la base de datos del Ministerio de Desarrollo, Urbanización y Vivienda (MIDUVI) (ver anexo B), en los datos reportados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) (ver anexos C y D), en donde reportan que el bloque en paredes se utiliza en un 61.6% y en cubierta 46.7%, el ladrillo en paredes se utiliza en un 35.1%, para los cimientos se utiliza principalmente hormigón armado o también conocido como concreto armado el mismo que se utiliza en un 81.4% y en un 91.8%, se utiliza el material ya mencionado para estructura.

En acabados muchas personas tienden a utilizar diferentes diseños de granitos para mesones de cocina y otras estructuras del hogar, es importante analizar este material ya que se han encontrado registros de estudios a nivel mundial acerca de concentraciones de ^{222}Rn que podrían afectar la salud.

Debido a que en el Cantón Riobamba se encuentran varias estructuras como iglesias y colegios construidas con material de construcción antiguos o tradicionales, se ha decidido analizar el material de la iglesia Balbanera y del colegio San Felipe ya que están construidas con rocas ancestrales.

Se tomaron 4 muestras de bloque producidos en bloqueras ubicadas en el Barrio San Juan, vía a Cebadas, 3 muestras de ladrillo producidas en Chambo esto debido a que esta parroquia se caracteriza por producir este material, se tomaron 3 muestras de granito, para las muestras de granito lo tomamos de una distribuidora de materiales de construcción, la variación que mostraron las muestras de granito es su color, ya que se analizó una muestra beige (G1), roja (G2), y negra(G3), además se tomó una cantidad de muestras de puzolana (P1), roca de una iglesia de la ciudad de Riobamba (RB1) y 1 roca del Auditorio de un Colegio ubicado en la ciudad de Riobamba (SF1), para reconocer las muestras se ha codificado según la tabla 3-1.

Tabla 1-3: Codificación de las muestras analizadas.

| Muestra | Codificación |
|---------------|--------------|
| Bloque | B1 |
| Bloque | B2 |
| Bloque | B3 |
| Bloque | B4 |
| Ladrillo | L1 |
| Ladrillo | L2 |
| Ladrillo | L3 |
| Concreto | C1 |
| Granito beige | G1 |
| Granito rojo | G2 |
| Granito negro | G3 |
| Puzolana | P1 |
| Roca Iglesia | RB1 |
| Roca Colegio | SF1 |

Realizado por: Damaris Hidrovo, 2018

Antes de analizar las muestras es importante realizar un pretratamiento el cual consiste en dejar las muestras en un lugar ventilado donde se puedan secar libremente, ya que si las muestras están húmedas los datos que se obtengan no serían los adecuados (ver figura 3-4). Sobre todo, en el caso del bloque y los ladrillos ya que la condición de almacenamiento de los mismos es en lugares abiertos a la intemperie en donde se ven afectados por lluvias.



Figura 4-3: Almacenamiento del bloque.

Realizado por: Hidrovo, Damaris, 2018.

3.3. Determinación la concentración de fondo de laboratorio, C_{Bg} .

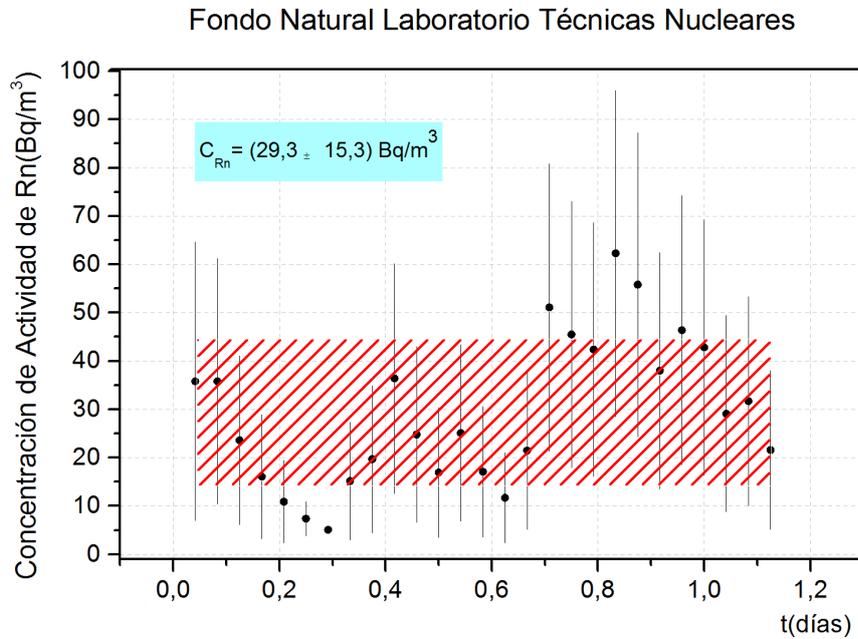
El fondo de laboratorio es considerado un factor muy importante para realizar los análisis respectivos, ya que de él dependen parámetros como la tasa de fuga λ_L y el coeficiente de exhalación másico E .



Figura 5-3: Configuración experimental para medir el fondo del Laboratorio de Técnicas Nucleares.

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018.

Se colocó el detector Rad7 en medio del laboratorio de técnicas nucleares y se tomaron medidas por 2 días, la configuración experimental se puede observar en la figura 3-5. Obteniendo así una concentración de fondo de $29.3 \pm 15.3 \frac{Bq}{m^3}$.



Gráfica 1-3: Fondo natural del laboratorio de técnicas nucleares.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

3.4. Determinación la tasa de fuga de la cámara, λ_{Rn} .

Para el cálculo de la tasa de fuga de la cámara tomamos un mineral radiactivo que introducimos en la cámara por una semana hasta que sature la muestra dentro de la cámara, luego de manera minuciosa se lo retira de dentro de la cámara y se procede a sellarla para que así el radón dentro de la cámara tienda a descomponerse de forma natural con respecto a su concentración inicial así mediante la ecuación 32, y tomando en cuenta los parámetros necesarios procedemos a realizar el cálculo (ver tabla 3-2).

Tabla 2-3: Parámetros para el cálculo de la tasa de fuga de la cámara.

| Muestra | C_{Bg} [Bq/m3] | C_i [Bq/m3] | λ_{Rn} [h- 1] | M_f | M_L |
|---------------------------|---------------------|------------------|--------------------------|---------|-------|
| Mineral Radiactivo | 29,3 | 3428 | 0,00755 | 25,8814 | 43,51 |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

En la figura 3-2 observamos la curva de descomposición natural que sufre el radón dentro de la cámara, de esta gráfica y con la ayuda del programa OriginPro realizamos un ajuste lineal de las 24 primeras medidas para obtener la pendiente experimental, la cual es un parámetro importante para el cálculo de la tasa de fuga tabla 3-2.

Tabla 3-3: Tasa de fuga de la cámara del laboratorio de técnicas nucleares.

| λ_L [h ⁻¹] | σ_{λ_L} | $\varepsilon\%_{\lambda_L}$ |
|--------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 0,0051 | 0,0013 | 24% |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

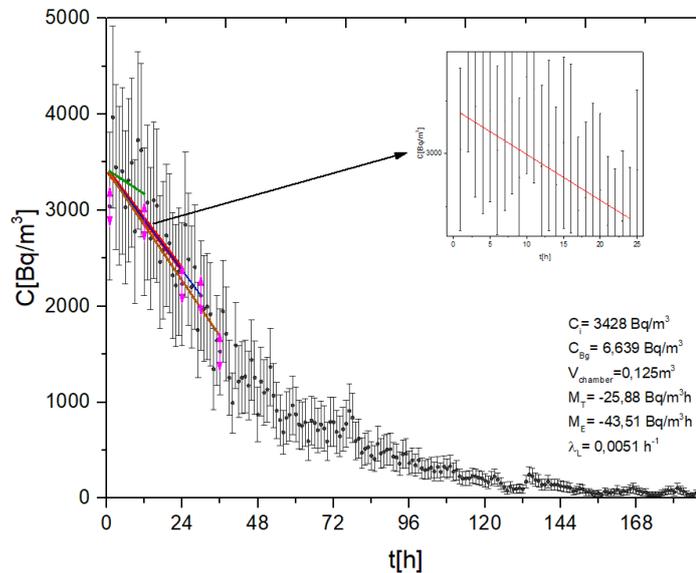


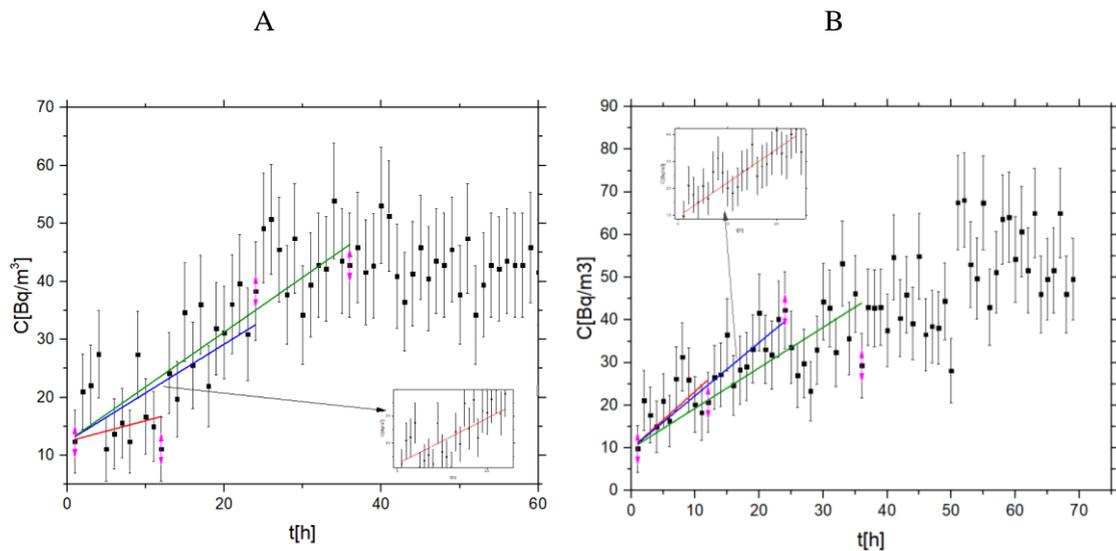
Grafico 2-3: Disminución exponencial de la concentración de 222Rn en el mineral radiactivo.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

3.5. Determinación de la concentración de radón de las muestras dentro de la cámara, $C_{(t)}$.

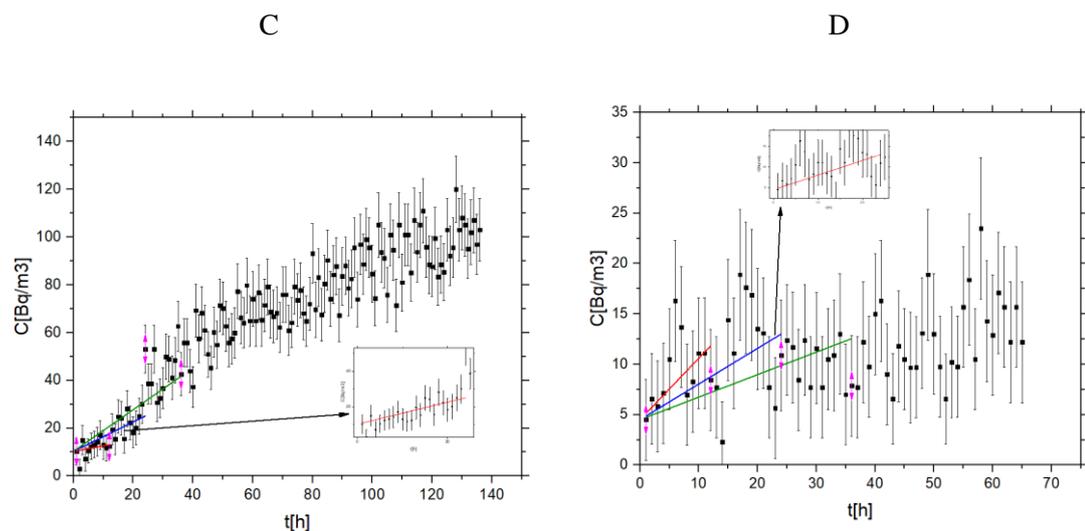
La variación de la concentración de 222Rn en los materiales de construcción es muy evidente, dependiendo del material de construcción, en algunos de los casos estas concentraciones son casi similares a las del fondo de laboratorio de Técnicas Nucleares. Gracias a la fórmula 22 en donde se expresa el balance de masas que ocurre dentro de la cámara podemos observar la acumulación de radón dentro de la cámara de los materiales de construcción seleccionados para este trabajo.

La diferencia entre las concentraciones de ^{222}Rn en los distintos tipos de bloque analizados, es notoria, ya que los bloques B1, B2 y B3 presentan una curva característica de crecimiento de ^{222}Rn dentro de la cámara, en tanto que el bloque B4 muestra medidas dispersas, al inicio da la apariencia de que tomara forma de la curva característica de concentración pero con el pasar del tiempo se puede notar que los datos son muy dispersos y no presentan variación, sino que permanecen en un mismo sentido.



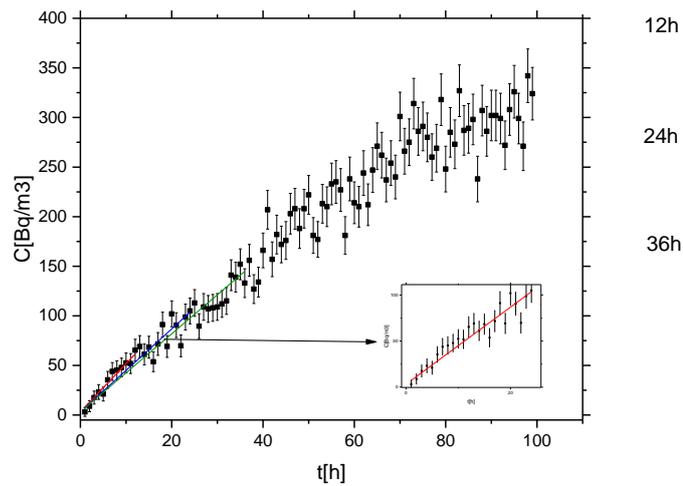
Gráfica 3-3: A: Concentración de ^{222}Rn en Bloque(B1), B: Concentración de ^{222}Rn en Bloque(B2).

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018



Gráfica 4-3: C: Concentración de ^{222}Rn en Bloque(B3), D: Concentración de ^{222}Rn en Bloque(B4).

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

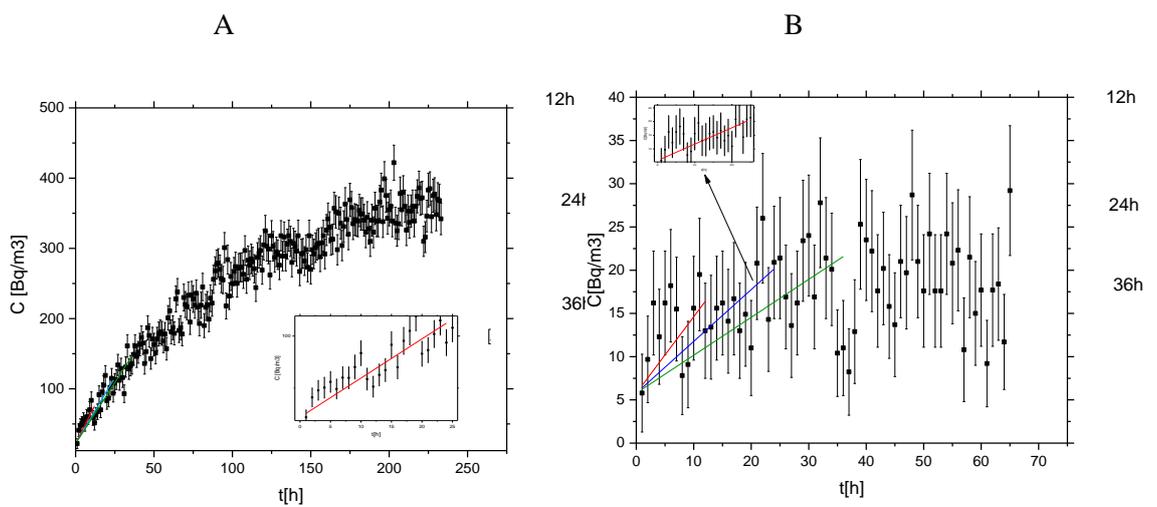


Gráfica 5-3: Concentración de ^{222}Rn en Bloque de concreto (C1).

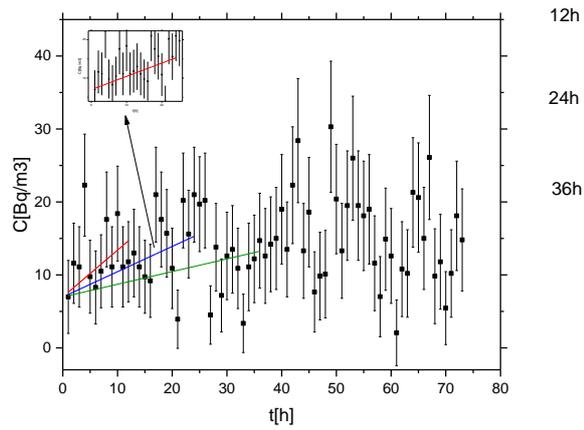
Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

El bloque de concreto (ver fig. 3-5) presenta una concentración muy alta de contenido de ^{222}Rn , presentando así la curva de acumulación con valores que sobrepasan los 300Bq/m^3 .

En los diferentes tipos de granito analizados se notaron varias diferencias, por ejemplo, en G1 (ver fig. 3-6) la concentración presenta la curva característica de acumulación dentro de la cámara cerrada, en tanto que en las muestras G2 y G3 los datos se encuentran muy dispersos y presentan un patrón muy similar al fondo de laboratorio.



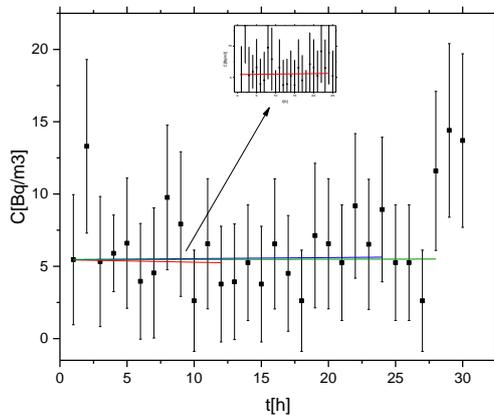
C



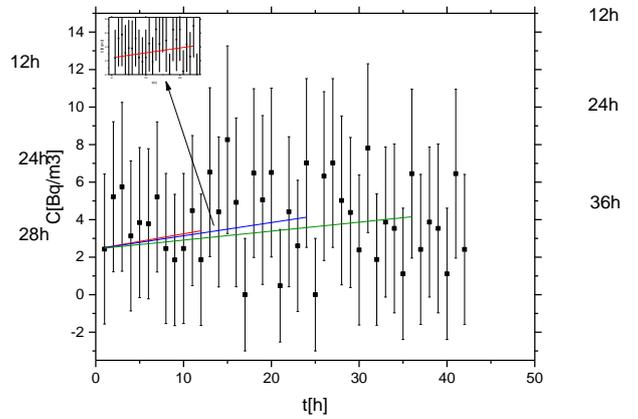
Gráfica 6-3: A: Concentración de ^{222}Rn en Granito(G1), B: Concentración de ^{222}Rn en Granito(G2) C: Concentración de ^{222}Rn en Granito(G3).

Realizado por Hidrovo, Damaris; 2018

A



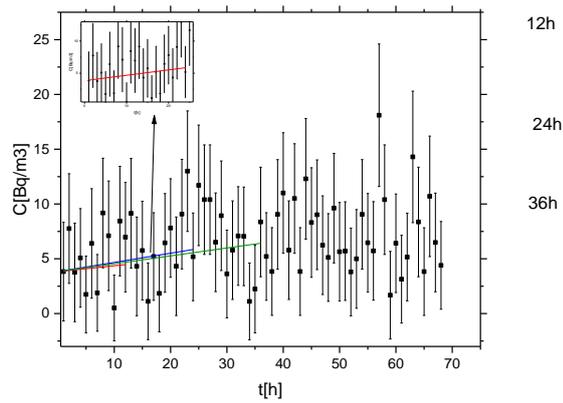
B



Gráfica 7-3: A: Concentración de ^{222}Rn en Ladrillo (L1), B: Concentración de ^{222}Rn en Ladrillo (L2).

Realizado por Hidrovo, Damaris; 2018

C



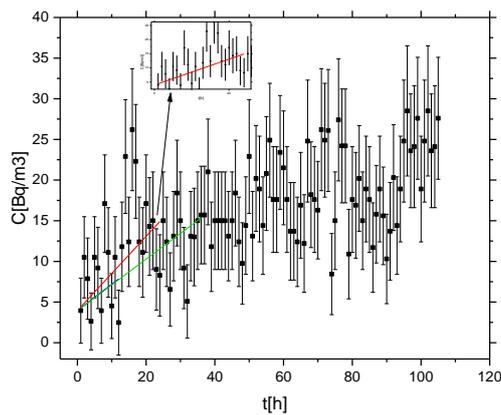
Gráfica 8-3: C: Concentración de ^{222}Rn en Ladrillo (L3).

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

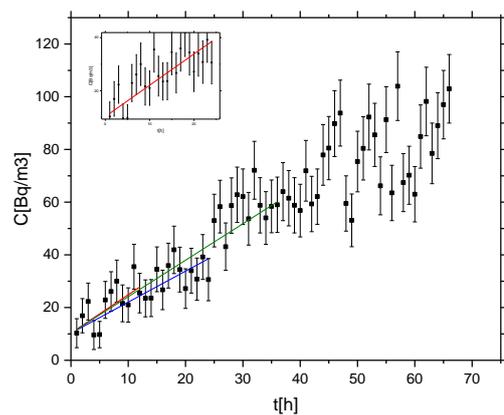
En las muestras de ladrillo analizadas podemos observar que las concentraciones son muy bajas, se podría decir que prácticamente no existe presencia de ^{222}Rn , ya que los valores observados en las gráficas 3-7 y 3-8 son similares a las del fondo de laboratorio.

A más de los materiales de construcción analizados, como un adicional se analizaron muestras de material utilizadas en construcciones antiguas y tradicionales, como la Puzolana, la roca de una iglesia ubicada en el Riobamba y la roca del auditorio de un colegio del cantón.

A



B



C

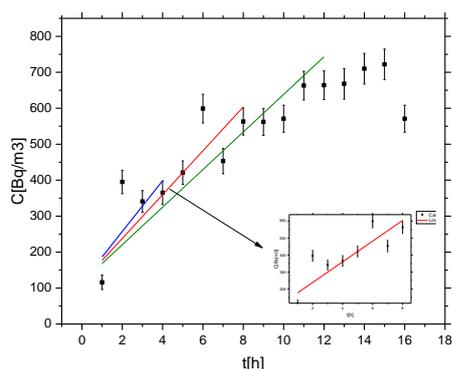


Gráfico 9-3: A: Concentración de ^{222}Rn en Puzolana (P1). B: Concentración de ^{222}Rn en Roca de la Iglesia (RB1), C: Concentración de ^{222}Rn en Roca del auditorio del Colegio (SF1).

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

Como podemos observar en la gráfica 3-9 las concentraciones de las muestras analizadas son un tanto características, en especial RB1 y SF1, son las que muestran concentraciones un tanto altas, y presentan la curva característica de acumulación, todo lo contrario que ocurre con la muestra P1 que prácticamente su concentración es muy baja.

3.6. Determinación del coeficiente de exhalación másico de las muestras, *E*.

Para obtener la tasa de emanación de ^{222}Rn , tenemos 2 métodos para aplicar, el primero es el método de la pendiente inicial el que tomaremos las primeras 24h y con la ayuda del programa Origin Pro obtendremos la pendiente inicial experimental para realizar el cálculo, el segundo método denominado método de saturación para el cual se realiza un ajuste global de los datos obtenidos con la ayuda de ROOT.

Realizamos una comparación entre los coeficientes de exhalación másicos por el método de la pendiente inicial a partir del ajuste global (fórmula 23) el cual nos da un resultado de $0,115 \pm 0,014$ [Bq/kg] (12%) y con el método de saturación (formula 25) el cual nos da un valor de $0,093 \pm 0,009$ [Bq/kg] (10%) obtenidos del análisis de la muestra de G1.

Tabla 4-3: Comparación de los dos métodos de cálculo del coeficiente de exhalación másico.

| C_{∞} [Bq/m ³] | C_i [Bq/m ³] | λ_{Rn} [h ⁻¹] | λ_L [h ⁻¹] | V [m ³] | m [kg] | λ_{eff} [h ⁻¹] | E [Bq/m ² h] |
|--------------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|------------------------|-----------|---|----------------------------|
| 415 | 31,03 | 0,0076 | 0,0041 | 0,1250 | 4,7333 | 0,0117 | 0,115 |
| 415 | 31,03 | 0,0076 | 0,0041 | 0,1250 | 4,7333 | 0,00880 | 0,093 |

Realizado por: Damaris Hidrovo, 2018.

Para el cálculo del coeficiente de exhalación (ver ecuación 26) es necesario tomar en cuenta varios parámetros, como el ajuste lineal de la pendiente inicial experimental, el cual se hace tomando los datos obtenidos en las primeras 24 h y mediante OriginPro se realiza este ajuste, es necesario tomar en cuenta datos como $\lambda_{Rn} [h^{-1}] = 0,00755$; $C_{Bg} [Bq/m^3] = 29,3 \pm 15,3$; $\lambda_L [h^{-1}] = 0,0051 \pm 0,0012$; $V = 0,125 \pm 0,0038$ y los datos presentados en la tabla 3-3.

Tabla 5-3: Parámetros a tomar en cuenta para el cálculo de coeficiente másico de exhalación obtenido con el método de la cámara cerrada.

| Muestra | $C_i [Bq/m^3]$ | $M_e [Bq/m^3h]$ | m [kg] |
|---------|----------------|-----------------|--------|
| B1 | 11.1±4 | 0,84±0.0012 | 5,10 |
| B2 | 9.8±4.4 | 1,24±0.076 | 3,03 |
| B3 | 10.3±4 | 0,61±0.094 | 3,43 |
| B4 | 13.6±4 | 0,35±0.064 | 5,10 |
| L1 | 5.46±2 | 0,007±0.032 | 4,63 |
| L2 | 9.75±3.5 | 0,07±0.031 | 2,87 |
| L3 | 12±5 | 0,084±0.043 | 3,13 |
| C1 | 3.19±1.4 | 4,18±0.1 | 5,73 |
| G1 | 50.7±10 | 3,76±0.2 | 4,73 |
| G2 | 27.4±7.5 | 0,60±0.066 | 5,93 |
| G3 | 11.6±4 | 0,35±0.073 | 1,63 |
| P1 | 3.94±2 | 0,46±0.08 | 0,20 |
| RB1 | 22.3±7 | 1,18±0.091 | 6,46 |
| SF1 | 116±20 | 52,25±3,7 | 1,50 |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

En la tabla 3-6 utilizando la ecuación 36 obtenemos los resultados presentados para el coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción analizados.

Tabla 6-3: Coeficiente másico de exhalación obtenido con el método de la cámara cerrada.

| Muestra | Coeficiente de exhalación másico [Bq/kg·h] | Error de coeficiente de exhalación másico [Bq/kg·h] |
|---------|--|---|
| B1 | 0,020 | 0,005 |
| B2 | 0,050 | 0,012 |
| B3 | 0,021 | 0,010 |
| B4 | 0,009 | 0,006 |
| L1 | 0,002 | 0,004 |
| L2 | 0,002 | 0,008 |
| L3 | 0,003 | 0,009 |
| C1 | 0,089 | 0,009 |
| G1 | 0,112 | 0,016 |
| G2 | 0,017 | 0,006 |
| G3 | 0,026 | 0,020 |
| P1 | 0,036 | 0,024 |
| RB1 | 0,025 | 0,006 |
| SF1 | 4,465 | 0,489 |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

3.6. Determinar Tasa De Dosis Anual.

Los riesgos para la salud de la exposición al radón se deben principalmente a la inhalación de los productos de desintegración de corta duración y la irradiación de partículas alfa de las vías respiratorias bronquiales.

Mediante la fórmula 28 descrita en el capítulo 2 y los parámetros descritos en la tabla 3-6, podemos realizar el cálculo de la concentración de radón en una habitación con una superficie de exhalación de $24m^2$.

Tabla 7-3: Coeficiente de exhalación superficial de los materiales de construcción analizados.

| Muestra | Coeficiente de exhalación superficial [Bq/m ² h] |
|---------|---|
| B1 | 0,651 |
| B2 | 0,954 |
| B3 | 0,452 |
| B4 | 0,315 |

| | |
|-----|--------|
| L1 | 0,113 |
| L2 | 0,061 |
| L3 | 0,157 |
| C1 | 5,241 |
| G1 | 4,564 |
| G2 | 0,914 |
| G3 | 0,990 |
| P1 | 0,660 |
| RB1 | 0,519 |
| SF1 | 11,959 |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

Así en la tabla 3-8, con la ayuda de la fórmula 37 desglosada en el capítulo 2, la concentración de cada material de construcción representada en la tabla 3-6, tomando en cuenta el parámetro de conversión $DFC = 9 \times 10^{-9} \frac{Sv}{Bq/m^3h}$ y el tiempo promedio que una persona está en el interior de su vivienda que es $4.38 \times 10^3 \frac{h}{año}$, podemos observar las dosis efectivas para cada una de las muestras analizadas.

Tabla 8-3: Dosis que aportan los diferentes materiales de construcción analizados al año.

| Muestra | Concentración de Radón [Bq/m ³] | Error de la Concentración | Dosis efectiva por inhalación (mSv/año) | Error de la dosis efectiva por inhalación (mSv/año) |
|---------------------|---|---------------------------|---|---|
| B1 | 1,735 | 0,604 | 0,068 | 0,024 |
| B2 | 2,544 | 0,885 | 0,100 | 0,035 |
| B3 | 1,206 | 0,717 | 0,048 | 0,028 |
| B4 | 0,840 | 0,648 | 0,033 | 0,026 |
| L1 | 0,303 | 0,701 | 0,012 | 0,028 |
| L2 | 0,164 | 0,770 | 0,006 | 0,030 |
| L3 | 0,418 | 1,175 | 0,016 | 0,046 |
| C1 | 13,975 | 3,035 | 0,551 | 0,120 |
| G1 | 12,172 | 3,198 | 0,480 | 0,126 |
| G2 | 2,436 | 1,254 | 0,096 | 0,049 |
| G3 | 2,639 | 2,334 | 0,104 | 0,092 |
| P1 | 1,761 | 1,376 | 0,069 | 0,054 |
| RB1 | 1,383 | 0,499 | 0,055 | 0,020 |
| SF1 | 31,890 | 6,255 | 1,257 | 0,247 |
| UNSCEAR 2006 | | | 1,1 | 0,002 |

Realizado por: Hidrovo Damaris, 2018

CAPITULO IV

4. ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS.

4.6. Fondo del laboratorio.

Es importante conocer la concentración de fondo del laboratorio, para esto se realizó un monitoreo al iniciar el experimento, en la figura 3-5 se puede observar la configuración experimental que se llevó a cabo, en la gráfica 3-1 se observa la concentración de fondo en el laboratorio el cual mediante OriginPro se realizó la gráfica que representa la concentración presente, así el valor medio de la concentración de fondo del laboratorio es de $29,3 \pm 15,3 \text{ Bq/m}^3$.

4.7. Tasa De Fuga.

Se procedió a realizar una prueba de la tasa de fuga de la cámara, la misma que fue mostrada en la gráfica 3-2 en donde se representa claramente el decaimiento exponencial de la concentración de radón con respecto al tiempo en el interior de la cámara, como podemos observar la concentración inicial que se acumula es de 3428 Bq/m^3 , en la gráfica 3-2 podemos observar evidentemente el decaimiento radiactivo de radón, el decaimiento dentro de la cámara ocurre mucho más rápido de lo que se puede encontrar en registros, esto es debido a que podemos considerar que la cámara tiene fugas. Al aplicar un ajuste lineal sobre los 24 primeros datos registrados la tasa de fuga que se obtiene es de $\lambda_{leak} = 0,0051 \text{ (h}^{-1}\text{)}(24\%)$.

4.8. Coeficiente De Exhalación Másico De Los Materiales De Construcción.

Los materiales de construcción analizados en el presente trabajo muestran concentraciones bajas, para el cálculo del Coeficiente de exhalación másico calculado mediante la ecuación 36 descrita en el capítulo 2, es importante tomar en cuenta las concentraciones de Radón que muestra cada material descrito en el capítulo 3, las concentraciones iniciales de cada material son relativamente bajas. En la gráfica 4-1 podemos observar que, en todos los materiales analizados, el que muestra mayor exhalación es SF1, esta muestra no está entre los materiales más utilizados en la actualidad, pero debido a reportes en trabajos anteriores se realizó el análisis mediante el método presentado. En la gráfica 4-2, se realizó una selección de materiales de construcción, excluyendo SF1, debido a que esta muestra un valor de exhalación elevado a comparación de las otras muestras. En esta

grafica podemos observar que los materiales de construcción que muestran mayor coeficiente de exhalación son los bloques (B), el concreto (C), el granito (G) y la puzolana (P).

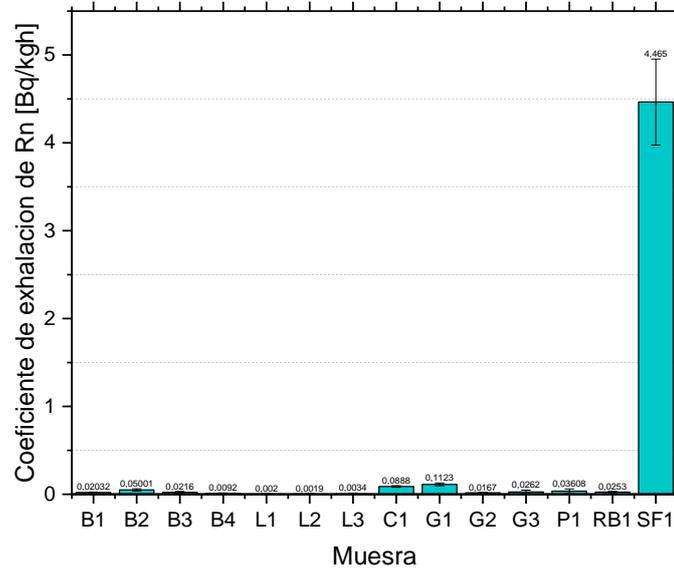


Grafico 1-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción analizados.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

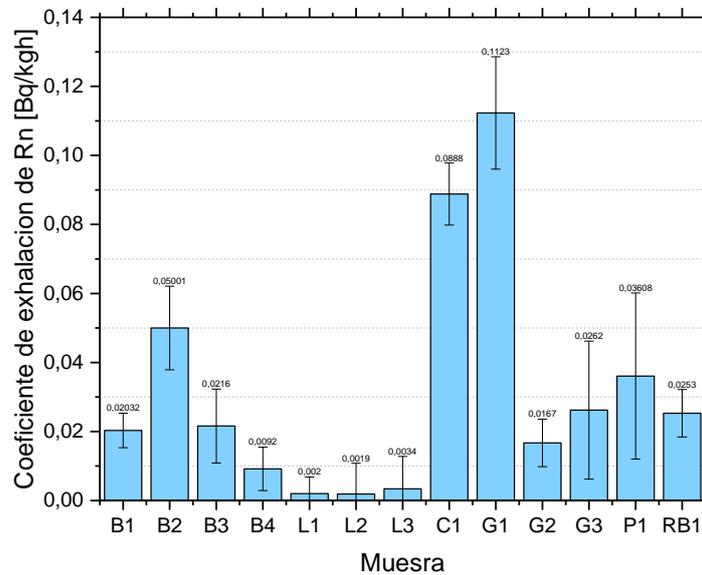


Grafico 2-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción analizados excepto SF1.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

En la figura 4-3 se realizó la selección solo de los materiales de construcción que más se utilizan en la actualidad, los coeficientes de exhalación que sobresalen son del bloque del concreto y del granito, el ladrillo presenta niveles muy bajos de exhalación de radón, incluso sus concentraciones fueron bajas.

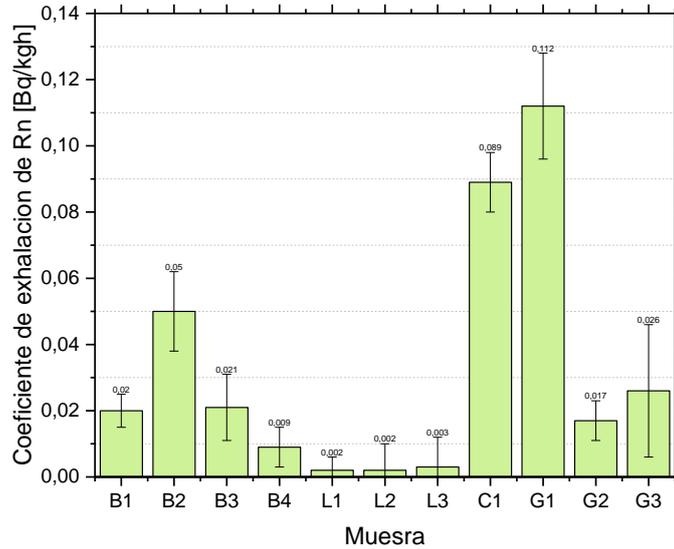


Grafico 3-4: Coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más utilizados en la actualidad.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

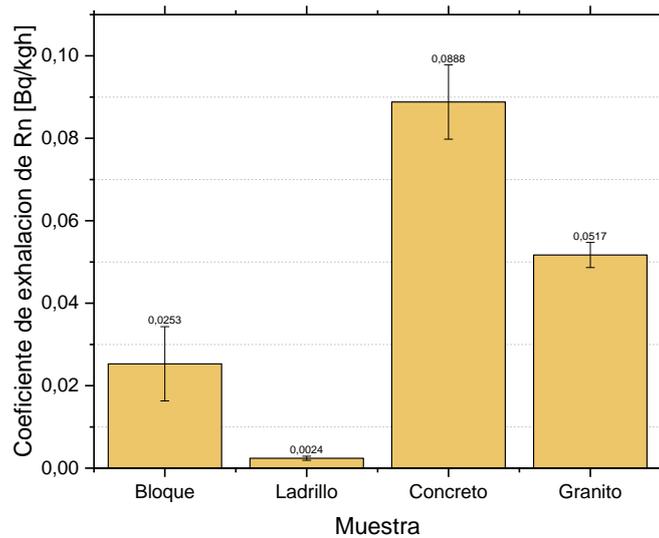


Grafico 4-4: Promedio de coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más utilizados en la actualidad.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

En la gráfica 4-4 podemos observar el valor promedio del coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción más utilizados en el Cantón Riobamba, el coeficiente de exhalación del bloque y ladrillo es muy bajo a comparación de granito y de Concreto que presentan Coeficientes de exhalación altos, sin embargo, los coeficientes de exhalación son mínimos en estos materiales.

4.9. Dosis efectiva anual.

Las dosis calculadas a partir de la ecuación 37, se muestran en la gráfica 4-5, los materiales analizados presentan tasas de dosis bajas, exceptuando SF1, el mismo que presento una tasa de dosis elevada a comparación de los otros materiales analizados, SF1 presenta una tasa de dosis anual de 1.25 mSv/año.

Siendo así los materiales que le siguen el concreto y el granito, los valores son menores en un 50% a comparación de lo recomendado por la UNSCEAR.

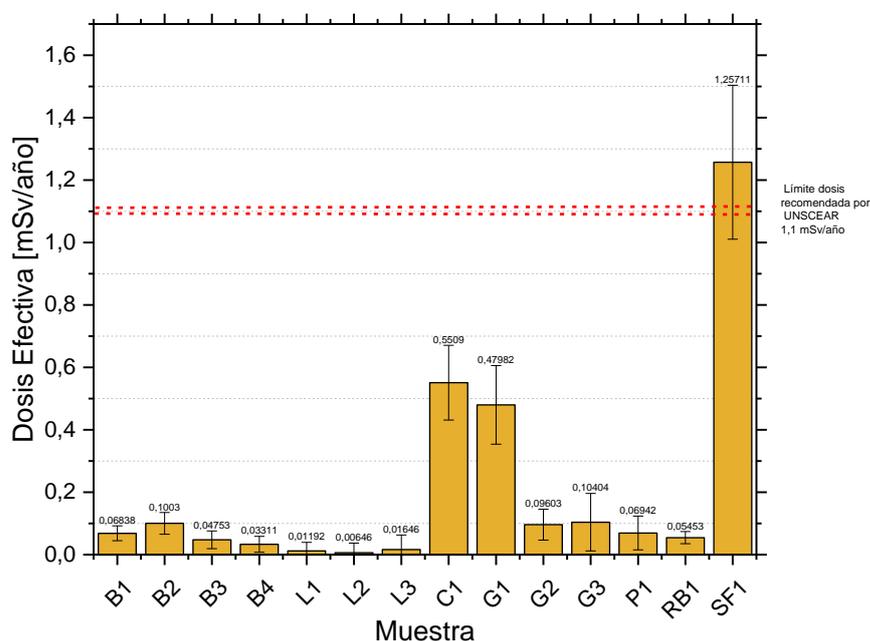


Gráfico 5-4: Tasa de dosis anual.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

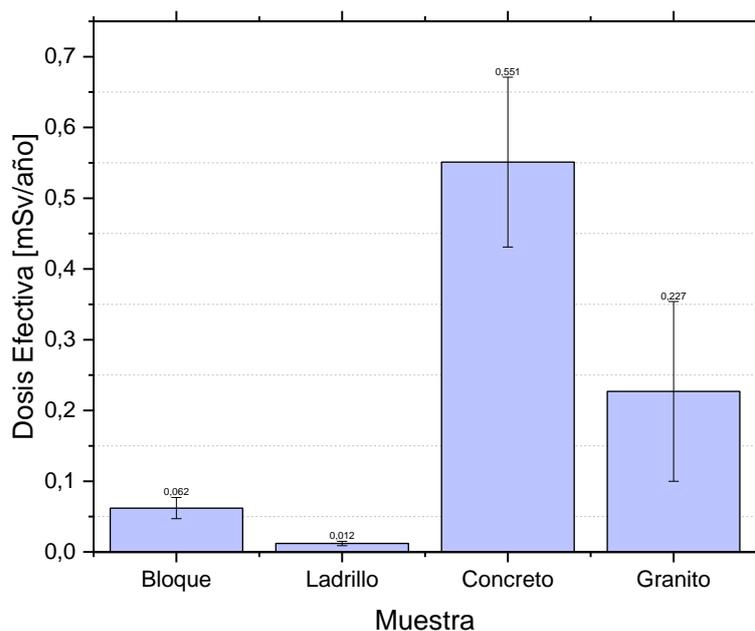


Grafico 6-4: Promedio de tasa de dosis anual de los materiales de construcción más utilizados en el Cantón Riobamba.

Realizado por: Hidrovo, Damaris; 2018

La tasa de dosis que aportan los materiales de construcción más utilizados en la actualidad para la construcción de viviendas que se han analizados se encuentran por debajo de los límites de dosis recomendados por la UNSCEAR.

CONCLUSIONES

1. Se clasificaron los materiales de construcción que se utilizan en mayor cantidad en el cantón Riobamba, según informes de MIDUVI e INEC se logró determinar que los materiales más utilizados son bloque en paredes en un 61.6% y en cubierta 46.7%, ladrillo en paredes se utiliza en un 35.1%, para los cimientos se utiliza principalmente hormigón armado o también conocido como concreto armado el mismo que se utiliza en un 81.4% y en un 91.8% se utiliza el material ya mencionado para estructura. Es importante también notar que para los acabados se utiliza granito y debido a referencias de que dicho material proviene de rocas ígneas y por lo tanto tiene cantidades considerables de ^{222}Rn , las piedras tradicionales también se tomaron en cuenta para el análisis debido a la gran cantidad de rocas ancestrales como la de una Iglesia que se encuentra en el Cantón Riobamba y la roca del auditorio del Colegio ubicado en el Cantón Riobamba.
2. Se realizó la caracterización de la configuración experimental del método de la cámara cerrada, que fue construida con 6 láminas de vidrio templado de 50cm de ancho y largo de 3 líneas, para evitar que la tasa de fuga sea considerable se procedió a sellar con silicona industrial, además al momento de ingresar la muestra y tomar las medidas se selló la parte removible con plastilina, podemos concluir que la tasa de difusión de retroceso se considera 0 debido a que el volumen de la cámara es considerablemente mayor con respecto al tamaño de la muestra en un 10% y la tasa de fuga de la cámara es de un $0,0051 (h^{-1})(24\%)$.
3. Se calculó el coeficiente de exhalación másico de los materiales de construcción dando como resultado que el ladrillo presenta un promedio de $0,0024\pm 0,0005$ [Bq/kg] son la que menos radón exhalan al interior, el promedio exhalación al interior del bloque es de $0,0253\pm 0,009$ [Bq/kg] presenta un valor superior al del ladrillo, por otro lado, las muestras que más concentración de radón aportan es la muestra de concreto de $0,088\pm 0,009$ [Bq/kg] seguida por la del granito de $0,0517\pm 0,03$ [Bq/kg]. Las muestras adicionales como la puzolana presentan una exhalación al interior de $0,036\pm 0,024$ [Bq/kg], la roca de la iglesia ubicada en el Cantón Riobamba presenta una exhalación de $0,025\pm 0,0069$ [Bq/kg] y la roca del auditorio del colegio del Cantón Riobamba presenta una exhalación de $4,46\pm 0,489$ [Bq/kg], siendo esta última la de mayor exhalación de todos los materiales analizados.

4. Debido a la variedad de materiales analizados en este estudio, podemos concluir que tenemos diferentes tipos de porosidad y humedad, ya que las muestras de ladrillo presentan menos porosidad que las muestras de Bloque, y de Concreto y por tanto es más difícil la movilidad de las partículas de ^{222}Rn puedan salir al exterior, también los parámetros ambientales influyen en gran manera en las muestras tanto en la emisión como en la adopción de ^{222}Rn , podemos mencionar que es necesario e indispensable el pretratamiento de las muestras, gracias al pretratamiento, los niveles de humedad se reducen y nos permite obtener medidas mejores ya que no existen factores que interfieran en la exhalación de gas a través del material, podemos concluir que la humedad y la temperatura son factores que afectan tanto para la muestra como para el buen funcionamiento del equipo.

5. La tasa e dosis calculada para los diferentes materiales de construcción debido a la inhalación de ^{222}Rn que se puede observar reflejada en la tabla de cálculo de tasa de dosis, para los materiales de construcción como ladrillo $0,012\pm 0,003[\text{mSv/año}]$, bloque $0,062\pm 0,015[\text{mSv/año}]$, concreto $0,55\pm 0,12[\text{mSv/año}]$, granito $0,23\pm 0,13[\text{mSv/año}]$, puzolana $0,069\pm 0,054[\text{mSv/año}]$ y roca de la iglesia del Cantón Riobamba $0,055\pm 0,02[\text{mSv/año}]$ no sobrepasan el límite anual de dosis efectiva que ha propuesto la UNSCEAR en el año 2006 para inhalación cuyo valor es de $1,1 \text{ mSv/año}$, pero para el caso de la muestra obtenida del auditorio del colegio ubicado en el cantón Riobamba es de $1,26\pm 0,25[\text{mSv/año}]$, la cual sobrepasa lo recomendado por la UNSCEAR.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda usar el método para el análisis de concentración de radón y el coeficiente de exhalación en los diferentes materiales de construcción tanto utilizados en la actualidad como los que se han utilizado en la antigüedad, ya que se considera el método como efectivo para el análisis de materiales de construcción. Esto debido a que es accesible y preciso.
2. Se recomienda tener en cuenta el pretratamiento de la muestra para el respectivo análisis, la humedad afecta de manera directa en el análisis de las muestras, para esto es necesario darle el pretratamiento ya sea secándolo en un horno, los cuales se disponen en los laboratorios de la facultad de ciencias. También es importante la limpieza de la cámara cada ocasión que se cambien de muestra y dejarla que se ventile por cierto periodo de tiempo para eliminar posibles rastros del material analizado.
3. Se recomienda que el material del cual se construye la cámara sea plexiglás ya que tiene características mejores que el vidrio, ya sea común o vidrio tratado o templado como es el caso de nuestra cámara, entre sus ventajas esta que el ambiente dentro de la cámara de plexiglás no varía aun cuando el ambiente fuera de la cámara o del espacio donde se esté analizando varíe.
4. Se recomienda que los datos obtenidos se vayan tomando en menos intervalos de tiempo, por ejemplo, en nuestro caso se tomó cada 1h, pero en el detector se puede configurar para obtener datos cada 30min, esto para así acceder a mayor cantidad de datos y al momento de realizar el ajuste lineal y obtener la curva, será con menor error y los datos más precisos.
5. Se recomienda seguir con los estudios de los materiales de construcción con el método de la cámara cerrada ya que a más del cantón Riobamba y sus alrededores en otros cantones y provincias de la zona 3 se realiza la producción de materiales de construcción y las minas de donde se obtiene el material primo para la producción de los mismos se encuentran en parroquias aledañas.

6. Se recomienda la utilización del método de la cámara cerrada para realizar el análisis de materiales de construcción, sobretodo aplicando el método de la pendiente inicial, considerando que el método es adecuado para el análisis.

7. Se recomienda realizar análisis de la piedra del auditorio del colegio debido a que ha presentado valores un tanto inquietantes, es necesario realizar estudio más a fondo sobre composición del material.

BIBLIOGRAFÍA

Anjos, R.M; et all. Radiation measurements. *Natural radionuclide distribution in brazilian comercial granites.*, 2005, Vol. 39, págs. 245-253.

Besoain, E. Mineralogía de arcillas de suelos. San José, Costa Rica : IICA, 1985.

Bucklow, Dave. giverontheriver.com. [En línea] 8 de Diciembre de 2016. <http://www.giverontheriver.com/2016/12/need-home-inspection/>.

Koike, Katsuaki, et all. *Controls on radon emission from granite as evidenced.*2015, Geophysical Journal International, págs. 428-436.

CSN. www.csn.es. [En línea] 2017. <https://www.csn.es/radiacion-natural-y-artificial2>.

Chao, Christofer, et all.*Determination of Radon Emanation and Back Diffusion Characteristics of Building Materials in Small Chamber Tests* .1996, Elsevier Science , págs. 355-362.

Egues, Aturo,et all. Mapa Geológico de la Republica del Ecuador. Quito, Ecuador : s.n., 2017.

Ferrero, Ana. gredos.usal.es. [En línea] 2013. [Citado el: 20 de 10 de 2017.] https://gredos.usal.es/jspui/bitstream/10366/122183/1/PFC_FerreroVaquero_caracterizacionradiologica.pdf.

Fleischer, R. *Overview of properties, origin, and. Radon Measurements by Etched Track Detectors: Applications in Radiation Protection.* 1997, Earth Sciences and the Environment, pág. 3.

Foro Nuclear. foronuclear.org. [En línea] 22 de Julio de 2010. <http://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-5/115691-58-icuales-son-las-principales-magnitudes-que-se-emplean-en-radiologia?tmpl=component>.

Garzón, L. *Radiactividad y Medio Ambiente.* Oviedo : Servicio PUBL, 1979.

Grassi, A & Miranda, S. *El azufre como material de construcción: Relacion entre las fases cristalinas y la resina mecánica.* 1987, Latin American Journal 01 Metallurgy and Materials, págs. 2-55.

IAEA. rpop.iaea.org. [En línea] 2013. https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/HealthProfessionals/1_Radiology/QuantitiesUnits.htm.

- Juliana, Sarita.** slideplayer.es. [En línea] 2015. <http://slideplayer.es/slide/3075169/>.
- López, Beatriz & Iturbe, José.** *Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno.* Julio de 2004, Ciencia, págs. 6-16.
- MarcKinnon, Barb, et all.** takeactiononradon.ca. [En línea] 2018. [Citado el: 21 de 06 de 2018.] <https://www.takeactiononradon.ca/healtheffects>.
- Materiales de construcción.** Nueva enciclopedia del encargado de obras. España : s.n., 2011.
- Morawska, L & Phillips, C.** *Determination of the radon surface emanation rate from laboratory emanation data..* 253-262, Science of the total environment, pág. 1991.
- Nazaro, William W.** *Radon transport for soil to air.* 1992, Reviews of Geophysics, págs. 137-160.
- Olmo, M & Nave, R.** <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>. [En línea] Agosto de 2000. [Citado el: 20 de Febrero de 2018.] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Nuclear/radon.html>.
- OMS.** who.int. [En línea] Junio de 2016. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>.
- OTCh.** sni.gob.ec. [En línea] 14 de Agosto de 2015. http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660000280001_Actualizaci%C3%B3n%20del%20Proceso%20del%20PDyOT_14-08-2015_16-43-38.pdf.
- Pocetti, Agustin.**blogspot.com. [En línea] 2014. [Citado el: 21 de 06 de 2018.] <http://thetipoficeberg.blogspot.com/2014/10/el-monstruo-del-sotano-el-radon.html>.
- Piedecausa García, Beatriz , et all.** *Radiactividad natural de los materiales.* 2011, Técnica CEMENTO HORMIGÓN, págs. 40-65.
- Piedecausa, Beatriz, et all.** 2011, Técnica CEMENTO HORMIGÓN, págs. 40-65.
- Salazar , A.** Ecoingeniería. [En línea] 31 de Marzo de 2016. <http://www.ecoingenieria.org/>.
- Takeshi Okuda, Okuda.** 2004., Journal of nuclear science and technology, págs. 993-1002.
- Tene Fernández, Talia Beatriz.** Environmental radon measurements using a closed chamber for building materials and water and a feasible program for Ecuador. Italia : s.n., 2017.
- Tomozo Sasaki, Yasuyoshi Gunji** *Radon emanation dependence on grain con_guration.*
- Tuccimei, P, Moroni, M & Norcia, D.** *Simultaneous determination of ^{222}Rn and ^{220}Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and*

a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration. 2, 2006, Applied Radiation and Isotopes, Vol. 64, págs. 254-263.

UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. *Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Vol I.* 2008.

UNSCEAR. *Sources and Effects of Ionizing Radiation.* New York : s.n., 2006.

UNSCEAR. unsear.org. [En línea] 2006.
http://www.unsear.org/docs/publications/2006/UNSCEAR_2006_Annex-E-CORR.pdf.

Ureña, Mynor. blogspot.com. [En línea] 2017.
<http://unidadesradiactividad.blogspot.com/p/particulas.html>.

ANEXOS

ANEXO A:

Certificado de calibración y originalidad del Detector RAD7.



Durrige Company
524 Boston Road, Billerica, MA 01821
Tel: (978) 667-9556, Fax: (978) 667-9557
www.durrige.com

Certificate of Calibration
RAD7 PROFESSIONAL RADON DETECTOR (NRSB Device Code - 31810 CR)

| | | | |
|----------------------------|---|------------------------------------|-------|
| Calibration Date: | December 1, 2017 | Date of Previous Calibration: | _____ |
| Serial Number: | 4670 | Previous Sensitivity, Normal mode: | _____ |
| Model Number: | RAD7-716 | Previous Sensitivity, Sniff mode: | _____ |
| Firmware Version: | 3.1a 151208 | Previous CB Spill Factor: | _____ |
| RADLINK Version: | 311 | | |
| Dates of Calibration Run: | November 29, 2017 to December 1, 2017 | | |
| Reference Unit Number(s): | 504, 961, 1277, 4232 | | |
| Mean Temperature: | 22.2 °C | | |
| Mean Radon Concentration: | 63.2 pCi/L, 2340 Bq/m ³ | | |
| Sensitivity, Normal Mode: | 0.502 CPM/(pCi/L), 0.0136 CPM/(Bq/m ³) | | |
| Sensitivity, Sniff Mode: | 0.241 CPM/(pCi/L), 0.00651 CPM/(Bq/m ³) | | |
| CB Spill Factor: | 0.015 | | |
| Calibration Uncertainty: | 2% 2-Sigma (See Notes 1, 2) | | |
| Conversion Factor, Normal: | 1.99 (pCi/L)/cpm, 73.7 (Bq/m ³)/cpm | | |
| Conversion Factor, Sniff: | 4.15 (pCi/L)/cpm, 154 (Bq/m ³)/cpm | | |

Note 1) Based on counting statistics of the reference and this unit.
Note 2) No account has been made for the calibration uncertainty of the reference unit relative to an absolute standard, which we estimate to be within +/- 5%.

NRSB Accredited Radon Chamber Certificate Number: NRSB TRC0003

NRSB Certification Number: 10SS010
Calibration Technician: Kathleen Fletcher
Signature:  Date: 1 Dec. 2017
Per EPA recommendation, this unit should be calibrated again on or before: December 1, 2018



DURRIDGE COMPANY Inc
524 Boston Road, Brienca, Massachusetts 01821
Phone: 978.667.9556 • Fax: 978.657.2557
Web: www.durrige.com • Email: info@durrige.com

Certificate of Origin

THIS IS TO CERTIFY THAT THE FOLLOWING COMMODITY WAS
MANUFACTURED IN THE COUNTRY STATED BELOW.

PRODUCT: ELECTRONIC RADON DETECTOR

MODEL: RAD7

SERIAL NUMBER: 4670

COUNTRY OF ORIGIN: USA

SUPPLIER: DURRIDGE COMPANY INC.

SIGNATURE: L.M. Alberdelli

OF THE AUTHORIZED PERSON: L.M. ALBERTELLI

DATE: December 18, 2017

ANEXO B.

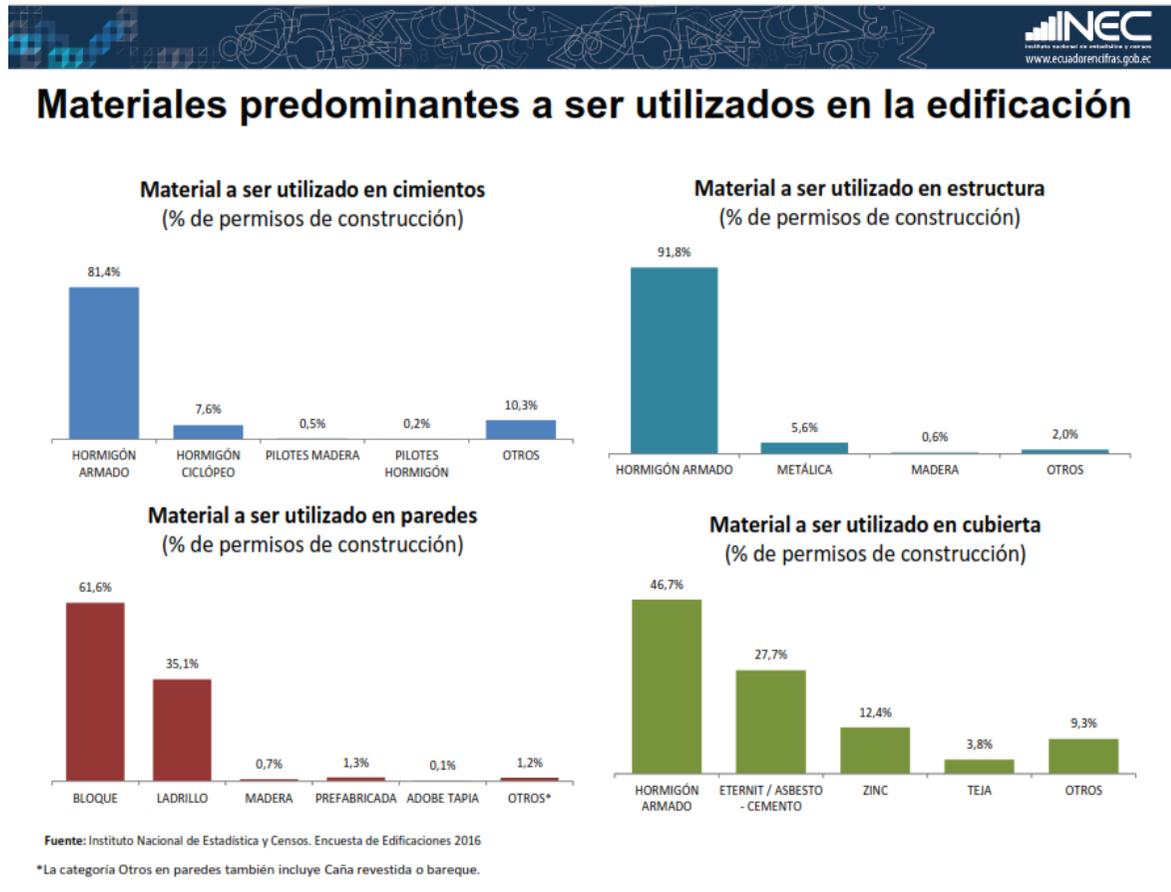
Base de datos de MIDUVI de los materiales de construcción usados en la elaboración de una casa estándar en el Cantón Riobamba.

| | |
|---|---|
|  | |
| REPÚBLICA DEL ECUADOR | |
| MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA | |
| DIRERE4444444 MMMMK76CCIÓN PROVINCIAL DE CHIMBORAZO | |
| CANTON RIOBAMBA | |
| LISTADO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION | |
| | DESCRIPCION |
| | Accesorios PVC sanitario 50mm |
| | Accesorios Sanitarios PVC 110m |
| | Accesorios para lavamanos |
| | Accesorios presion roscables 1 |
| | Acero de Refuerzo 8-12 mm |
| | Agua |
| | Alambre negro n 18 |
| | Alfajias de eucalipto (5x5 L=3) |
| | Arena |
| | Bloque Vibroprensado e=15 cm |
| | Bloque Vibroprensado e=10 cm |
| | Bondex estandar |
| | Boquilla de porcelana |
| | Breaker 10-50 amp |
| | Breaker 220 v |
| | Breaker 50 amp inc. caja termina |
| | Caballote de fibrocemento prep |
| | Cable 7 hilos N 8 |
| | Cable TW solido N 10 |
| | Cajetin Rectangular |
| | Cajetin redondo con tapa |
| | Carbonato de Calcio |
| | Cemento Portland |
| | Ceramica 20x30 cm |
| | Ceramica de piso 30 x30 cm |
| | Cerradura Tipo Pomo llave-botom |
| | Clavos de 2 1/2" |
| | Correa metalica tipo G 80x40x15x2mm |
| | Desague y sifon para lavaplato |
| | Ducha eléctrica con manguera |
| | Electrodos 6011 |
| | Emporador de porcelana |
| | Escalerilla Electrosoldada Tipo E1 2Ø4.5 10cm + Ø3.5@15cm |

| |
|--|
| Estacas de Madera |
| Foco ahorrador 20 W |
| Gancho J 5" incluye capuchon |
| Indoro blanco economico |
| Interruptor simple |
| Ladrillo |
| Lavamanos Blanco |
| Lavaplatos de acero Inoxidable 1 pozo y una falda 60x40cm, inc. Griferia |
| Lija |
| Llave cromada para pared tipo cuello de Ganzo |
| Llave de Campanola |
| Llave de Paso 1/2" |
| Manguera de 1/2" |
| Manguera de 3/4" |
| Silicon |
| Permatex 3 onz |
| Piedra Bola |
| Pintura Anticorrosiva |
| Pintura Latex Vinil acrilico |
| Placa ondulada de fibrocemento |
| Polietileno difuso 6 micras |
| Polipega |
| Puerta de madera 2 paneles inc. Marco y Tapamarco |
| Puerta tol galvanizado 1/25" incl. Cerradura tipo trabex |
| Rejilla de piso 2" cromada |
| Resanflex |
| Rieles de eucalipto 10 cm |
| Ripio Triturado |
| Sellador |
| Tabla de encofrado 20 cm |
| Tablero Triplex 4x8x 12mm |
| Taipe |
| Teflon |
| Tinner |
| Tiras de Eucalipto |
| Tomacorriente doble 110 V |
| Tomacorriente Simple 220 V |
| Tuberia presion roscable 1/2" |
| Tubo PVC sanitario 110mm L=3.0 |
| Tubo PVC sanitario 50mm L=3.00 |
| Ventana de hierro con proteccion |
| Vidrio catedral 4 mm |
| Viga y Cadena Electrosoldad tipo V1 |
| Grifo |
| Banco para ducha |
| Barras de apoyo para baño y ducha |
| Columna Electrosoldad tipo C1 |
| Bloque liviano 40x20x15 |
| Placa ondulada translucida 2.40 x1.10 |
| Riobamba, 2017 |
| |

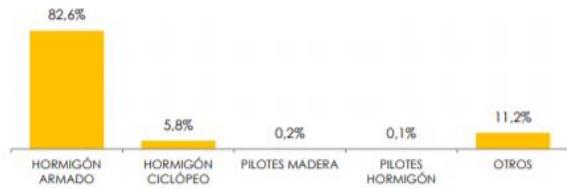
ANEXO C

Informe del 2017 del INEC acerca del uso de materiales de construcción predominantes en la edificación.

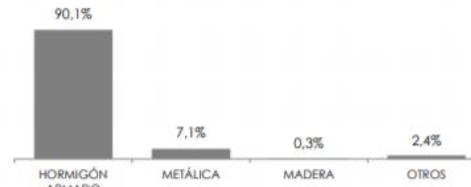


Materiales predominantes a ser utilizados en la edificación

Material utilizado en cimientos
(% de permisos de construcción)



Material utilizado en estructura
(% de permisos de construcción)



Material utilizado en paredes
(% de permisos de construcción)



Material utilizado en cubierta
(% de permisos de construcción)



Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos, Encuesta de Edificaciones 2017
*La categoría otros en paredes también incluye caña revestida o bareque.

Anexo D

Base de datos de INEC sobre el tipo de material de construcción predominante en paredes, cubierta o techos según cada provincia.

NÚMERO DE PERMISOS DE CONSTRUCCIÓN, POR TIPO DE MATERIAL PREDOMINANTE EN LAS PAREDES Y CUBIERTA O TECHO, SEGÚN PROVINCIAS

| Provincias | Total de Permisos | Paredes de: | | | | | | | Cubiertas de: | | | | |
|-----------------|-------------------|---------------|---------------|------------|-------------|----------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Ladrillo | Bloque | Madera | Adobe Tapia | Caña Revestida | Prefabricada | Otros | Hormigón Armado | Eternit Asbesto | Teja | Zinc | Otros |
| <i>NACIONAL</i> | <i>33.717</i> | <i>10.915</i> | <i>21.489</i> | <i>167</i> | <i>38</i> | <i>12</i> | <i>972</i> | <i>124</i> | <i>17.272</i> | <i>6.697</i> | <i>1.118</i> | <i>3.922</i> | <i>4.708</i> |
| <i>AZUAY</i> | <i>2.122</i> | <i>1.432</i> | <i>635</i> | <i>7</i> | <i>24</i> | <i>4</i> | <i>11</i> | <i>9</i> | <i>292</i> | <i>1.459</i> | <i>314</i> | <i>40</i> | <i>17</i> |
| <i>BOLIVAR</i> | <i>395</i> | <i>192</i> | <i>202</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>292</i> | <i>20</i> | <i>16</i> | <i>45</i> | <i>22</i> |
| <i>CAÑAR</i> | <i>575</i> | <i>230</i> | <i>338</i> | <i>2</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>199</i> | <i>299</i> | <i>41</i> | <i>20</i> | <i>16</i> |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|-------|-------|----|---|---|-----|----|-------|-------|-----|-----------|-------|
| <i>CARCHI</i> | 414 | 337 | 75 | - | - | - | 2 | - | 298 | 101 | 5 | 4 | 6 |
| <i>COTOPAXI</i> | 594 | 150 | 439 | 3 | - | - | - | 2 | 518 | 25 | 7 | 29 | 15 |
| <i>CHIMBORAZO</i> | 1.071 | 979 | 90 | 1 | - | - | 1 | - | 994 | 42 | 13 | 13 | 9 |
| <i>EL ORO</i> | 794 | 472 | 320 | 1 | - | - | 1 | - | 277 | 145 | 19 | 245 | 108 |
| <i>ESMERALDAS</i> | 425 | 18 | 353 | 54 | - | - | - | - | 146 | 17 | 3 | 250 | 9 |
| <i>GUAYAS</i> | 8.979 | 400 | 8.119 | 5 | - | - | 413 | 42 | 1.657 | 3.168 | 89 | 959 | 3.106 |
| <i>IMBABURA</i> | 1.687 | 891 | 760 | 1 | 2 | 2 | 31 | - | 1.423 | 157 | 67 | 12 | 28 |
| <i>LOJA</i> | 1.581 | 1.281 | 277 | 1 | 6 | - | 10 | 6 | 832 | 292 | 175 | 124 | 158 |
| <i>LOS RIOS</i> | 853 | 96 | 754 | 3 | - | - | - | - | 345 | 25 | 3 | 356 | 124 |
| <i>MANABI</i> | 2.501 | 1.592 | 747 | 56 | - | 4 | 93 | 9 | 858 | 122 | 65 | 1.19 1 | 265 |
| <i>MORONA SANTIAGO</i> | 365 | 185 | 170 | 7 | - | - | 1 | 2 | 89 | 43 | 18 | 86 | 129 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|------------|-----------|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| <i>NAPO</i> | <i>206</i> | <i>27</i> | <i>172</i> | <i>4</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>140</i> | <i>10</i> | <i>5</i> | <i>26</i> | <i>25</i> |
| <i>PASTAZA</i> | <i>291</i> | <i>63</i> | <i>222</i> | <i>5</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>149</i> | <i>13</i> | <i>3</i> | <i>83</i> | <i>43</i> |
| <i>PICHINCHA</i> | <i>5.859</i> | <i>597</i> | <i>5.153</i> | <i>7</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>65</i> | <i>35</i> | <i>5.180</i> | <i>200</i> | <i>132</i> | <i>58</i> | <i>289</i> |
| <i>TUNGURAHUA</i> | <i>2.197</i> | <i>1.642</i> | <i>540</i> | <i>2</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>8</i> | <i>3</i> | <i>1.931</i> | <i>87</i> | <i>71</i> | <i>56</i> | <i>52</i> |
| <i>ZAMORA CHINCHIPE</i> | <i>418</i> | <i>251</i> | <i>161</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>4</i> | <i>130</i> | <i>43</i> | <i>17</i> | <i>78</i> | <i>150</i> |
| <i>GALAPAGOS</i> | <i>193</i> | <i>3</i> | <i>189</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>111</i> | <i>12</i> | <i>1</i> | <i>68</i> | <i>1</i> |
| <i>SUCUMBIOS</i> | <i>406</i> | <i>21</i> | <i>383</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>232</i> | <i>26</i> | <i>5</i> | <i>66</i> | <i>77</i> |
| <i>ORELLANA</i> | <i>130</i> | <i>24</i> | <i>103</i> | <i>3</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>77</i> | <i>-</i> | <i>3</i> | <i>30</i> | <i>20</i> |
| <i>SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS</i> | <i>1.136</i> | <i>23</i> | <i>783</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>329</i> | <i>1</i> | <i>989</i> | <i>34</i> | <i>19</i> | <i>65</i> | <i>29</i> |
| <i>SANTA ELENA</i> | <i>525</i> | <i>9</i> | <i>504</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>3</i> | <i>8</i> | <i>113</i> | <i>357</i> | <i>27</i> | <i>18</i> | <i>10</i> |

**NÚMERO DE PERMISOS DE CONSTRUCCIÓN, POR TIPO DE MATERIAL PREDOMINANTE EN LAS
PAREDES Y CUBIERTA O TECHO,
SEGÚN PROVINCIAS**

| Provincias | Total de Permisos | Cimientos de: | | | | | Estructura de: | | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|----------------|------------------|--------------|-----------------|--------------|------------|------------|
| | | Hormigón Armado | Hormigón Ciclópeo | Pilotes Madera | Pilotes Hormigón | Otros | Hormigón Armado | Metálica | Madera | Otros |
| <i>NACIONAL</i> | <i>33.717</i> | <i>27.848</i> | <i>1.962</i> | <i>83</i> | <i>41</i> | <i>3.783</i> | <i>30.387</i> | <i>2.402</i> | <i>107</i> | <i>821</i> |
| <i>AZUAY</i> | <i>2.122</i> | <i>1.136</i> | <i>739</i> | <i>13</i> | <i>5</i> | <i>229</i> | <i>1.631</i> | <i>392</i> | <i>19</i> | <i>80</i> |
| <i>BOLIVAR</i> | <i>395</i> | <i>341</i> | <i>7</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>47</i> | <i>387</i> | <i>5</i> | <i>2</i> | <i>1</i> |
| <i>CAÑAR</i> | <i>575</i> | <i>341</i> | <i>173</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>59</i> | <i>524</i> | <i>43</i> | <i>3</i> | <i>5</i> |
| <i>CARCHI</i> | <i>414</i> | <i>371</i> | <i>7</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>34</i> | <i>400</i> | <i>12</i> | <i>1</i> | <i>1</i> |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------|--------------|--------------|------------|-----------|----------|------------|--------------|------------|-----------|------------|
| <i>COTOPAXI</i> | <i>594</i> | <i>468</i> | <i>77</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>47</i> | <i>559</i> | <i>33</i> | <i>1</i> | <i>1</i> |
| <i>CHIMBORAZO</i> | <i>1.071</i> | <i>893</i> | <i>33</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>145</i> | <i>1.033</i> | <i>37</i> | <i>-</i> | <i>1</i> |
| <i>EL ORO</i> | <i>794</i> | <i>675</i> | <i>12</i> | <i>-</i> | <i>2</i> | <i>105</i> | <i>766</i> | <i>14</i> | <i>-</i> | <i>14</i> |
| <i>ESMERALDAS</i> | <i>425</i> | <i>420</i> | <i>2</i> | <i>2</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>355</i> | <i>68</i> | <i>2</i> | <i>-</i> |
| <i>GUAYAS</i> | <i>8.979</i> | <i>7.905</i> | <i>115</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>959</i> | <i>8.350</i> | <i>81</i> | <i>2</i> | <i>546</i> |
| <i>IMBABURA</i> | <i>1.687</i> | <i>1.386</i> | <i>140</i> | <i>3</i> | <i>1</i> | <i>157</i> | <i>1.516</i> | <i>165</i> | <i>5</i> | <i>1</i> |
| <i>LOJA</i> | <i>1.581</i> | <i>957</i> | <i>87</i> | <i>2</i> | <i>1</i> | <i>534</i> | <i>1.275</i> | <i>251</i> | <i>2</i> | <i>53</i> |
| <i>LOS RIOS</i> | <i>853</i> | <i>711</i> | <i>4</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>137</i> | <i>798</i> | <i>44</i> | <i>2</i> | <i>9</i> |
| <i>MANABI</i> | <i>2.501</i> | <i>2.292</i> | <i>31</i> | <i>50</i> | <i>4</i> | <i>124</i> | <i>2.275</i> | <i>137</i> | <i>58</i> | <i>31</i> |
| <i>MORONA SANTIAGO</i> | <i>365</i> | <i>245</i> | <i>50</i> | <i>4</i> | <i>2</i> | <i>64</i> | <i>316</i> | <i>39</i> | <i>5</i> | <i>5</i> |
| <i>NAPO</i> | <i>206</i> | <i>148</i> | <i>15</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>43</i> | <i>176</i> | <i>29</i> | <i>-</i> | <i>1</i> |

| | | | | | | | | | | |
|---|--------------|--------------|------------|----------|----------|------------|--------------|------------|----------|-----------|
| <i>PASTAZA</i> | <i>291</i> | <i>169</i> | <i>8</i> | <i>-</i> | <i>3</i> | <i>111</i> | <i>193</i> | <i>97</i> | <i>-</i> | <i>1</i> |
| <i>PICHINCHA</i> | <i>5.859</i> | <i>5.268</i> | <i>231</i> | <i>1</i> | <i>4</i> | <i>355</i> | <i>5.169</i> | <i>687</i> | <i>2</i> | <i>1</i> |
| <i>TUNGURAHU A</i> | <i>2.197</i> | <i>1.733</i> | <i>148</i> | <i>-</i> | <i>2</i> | <i>314</i> | <i>2.056</i> | <i>134</i> | <i>-</i> | <i>7</i> |
| <i>ZAMORA CHINCHIPE</i> | <i>418</i> | <i>276</i> | <i>32</i> | <i>-</i> | <i>1</i> | <i>109</i> | <i>341</i> | <i>39</i> | <i>-</i> | <i>38</i> |
| <i>GALAPAGOS</i> | <i>193</i> | <i>167</i> | <i>1</i> | <i>-</i> | <i>-</i> | <i>25</i> | <i>185</i> | <i>6</i> | <i>-</i> | <i>2</i> |
| <i>SUCUMBIOS</i> | <i>406</i> | <i>351</i> | <i>33</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>20</i> | <i>376</i> | <i>29</i> | <i>1</i> | <i>-</i> |
| <i>ORELLANA</i> | <i>130</i> | <i>106</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>7</i> | <i>15</i> | <i>118</i> | <i>11</i> | <i>1</i> | <i>-</i> |
| <i>SANTO DOMINGO DE LOS TSACHILAS</i> | <i>1.136</i> | <i>1.005</i> | <i>14</i> | <i>-</i> | <i>5</i> | <i>112</i> | <i>1.078</i> | <i>36</i> | <i>-</i> | <i>22</i> |
| <i>SANTA ELENA</i> | <i>525</i> | <i>484</i> | <i>2</i> | <i>1</i> | <i>1</i> | <i>37</i> | <i>510</i> | <i>13</i> | <i>1</i> | <i>1</i> |