

**VNiVERSiDAD D SALAMANCA**

FACULTAD DE CIENCIAS

INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA  
DE LA EPISIENITA “ROJO SAYAGO”**

ANA FERRERO VAQUERO

2013

**VNiVERSiDAD D SALAMANCA**

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO FIN DE CARRERA

**CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA  
DE LA EPISIENITA “ROJO SAYAGO”**

Por:

ANA FERRERO VAQUERO

Para la obtención del título de Ingeniero Geólogo

Tutores del Proyecto:

MARÍA DOLORES PEREIRA GÓMEZ

ALCIDES J. S. CASTILHO PEREIRA

2013

Dña. María Dolores Pereira Gómez, Profesora Titular del Área de Petrología y Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca.

D. Alcides J. S. Castilho Pereira, Director del Área de Mineralogía, Petrología y Geoquímica del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Coimbra.

CERTIFICAN:

Que el Trabajo Fin de Carrera titulado “Caracterización radiológica de la episienita “Rojo Sayago” ha sido realizado bajo su tutela por Dña. Ana Ferrero Vaquero.

Salamanca, a 14 de febrero de 2013

Dra. D. María Dolores Pereira Gómez

Dr. D. Alcides J. S. Castilho Pereira

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. LA RADIATIVIDAD.....	7
2.1. LA RADIATIVIDAD NATURAL Y ARTIFICIAL .....	7
2.2. EL ÁTOMO .....	9
2.3. TIPOS DE RADIACIÓN .....	12
2.4. RADIACIONES IONIZANTES .....	13
2.5. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN .....	17
2.6. VIDA MEDIA DE LOS RADIONUCLEIDOS Y CADENAS DE DESINTEGRACIÓN .....	19
2.7. LEGISLACIÓN .....	21
3. ANTECEDENTES AL TRABAJO .....	25
4. EL RADÓN.....	28
4.1. EL GAS RADÓN.....	28
4.2. PROCEDENCIA DEL RADÓN .....	30
4.3. MEDICIONES EN EL LABORATORIO .....	32
4.4. PROTECCIÓN CONTRA EL RADÓN .....	37
5. OBJETIVOS .....	39
6. ROJO SAYAGO .....	40
6.1. NOMBRE CIENTÍFICO/NOMBRE COMERCIAL .....	40
6.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	42
6.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS .....	45

7. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	46
7.1. CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA DE LA MUESTRA .....	46
7.2. ANÁLISIS QUÍMICO .....	49
7.3. CALIBRADO DE LOS CONTENEDORES .....	50
7.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA ROJO SAYAGO .....	53
7.5. PROTOCOLO PARA LA MEDIDA DE LA TASA DE EXHALACIÓN DEL RADÓN EN MATERIALES GEOLÓGICOS Y DE CONSTRUCCIÓN.....	55
8. RESULTADOS .....	63
8.1. ANÁLISIS QUÍMICO .....	63
8.2. EXHALACIÓN DE RADÓN .....	72
8.3. MEDICIÓN AMBIENTAL (ESCINTILÓMETRO) .....	74
8.4. DOSIS ESTIMADA DE ACUERDO AL MÉTODO DE LA NORMA TÉCNICA 112 DE LA UNIÓN EUROPEA.....	77
9. CONCLUSIONES .....	79
10. BIBLIOGRAFÍA.....	83

## 1. INTRODUCCIÓN

La radiactividad natural forma parte de nuestras vidas. La Tierra encierra distintas fuentes de radiación de origen natural, resultado de las descomposiciones naturales de los componentes de las cadenas de desintegración de algunos elementos. Los estudios sobre radiactividad natural despiertan gran interés ya que ésta constituye la fuente principal de exposición del ser humano a la radiación.

Una de las fuentes de radiación natural más comunes son los materiales de construcción. Además de los utilizados en las propias estructuras de construcción, los materiales empleados para la decoración de estancias, como los cerámicos, también pueden ser posibles fuentes de radiactividad en interiores. Hasta la actualidad, los estudios sobre radiactividad natural en los materiales de construcción se han realizado con muestras de rocas molidas. Pero, ¿desprende la roca la misma radiación en forma compacta que cuando está molida? Para contestar a esta pregunta surge este proyecto.

El presente trabajo se centra en un tipo de piedra natural, el granito Rojo Sayago, utilizado como material de construcción. El objetivo principal de este estudio es determinar la composición química y mineralógica del granito Rojo Sayago y estudiar el impacto radiológico que esta piedra tiene dependiendo del tamaño muestral.

Los materiales de construcción se presentan siempre en bloques, de modo que parece lógico estudiarlos en forma compacta. Con este trabajo pretendemos comprobar si las aproximaciones seguidas en el pasado para medir la radiactividad eran correctas o si, por el contrario, los niveles de radiactividad varían conforme el tamaño del bloque aumenta. Esta información será de gran utilidad en el control y gestión de construcciones con material potencialmente peligroso.

## 2. LA RADIATIVIDAD

### 2.1. LA RADIATIVIDAD NATURAL Y ARTIFICIAL

La radioactividad es un fenómeno natural por el cual ciertos átomos cambian su estructura. La comprensión de este fenómeno ha permitido su aplicación en diferentes actividades, como la medicina, la energía nuclear, etc.

La mayor parte de la radiación a la que normalmente estamos expuestos procede de fuentes naturales como rocas, suelo, agua y hasta incluso nuestro propio cuerpo. Dicha radiación recibe el nombre de radiación de fondo o **radiación natural**. Los niveles de la radiación de fondo varían de unos lugares a otros aunque el promedio de radiación recibida o dosis anual es bastante constante. La principal fuente de radiación natural es el gas radón formado por el decaimiento de los materiales radiactivos presentes en el suelo o en ciertos materiales de construcción.

La radiación que provoca mayor preocupación es la **radiactividad artificial**, que es la causada por las actividades humanas: aplicaciones médicas de sustancias radiactivas, precipitaciones radiactivas en la atmósfera procedentes de ensayos nucleares realizados a gran escala, descargas provenientes de la industria nuclear y desechos radiactivos.

La proporción de radiactividad artificial con respecto al total es muy pequeña pero sus efectos pueden ser catastróficos (ej., Chernobyl). Algunos materiales resultantes de las actividades humanas no se encuentran en la naturaleza (como el plutonio) pero pueden ser liberados a ésta en formas químicas y físicas diferentes, extendiéndose fácilmente por el ambiente o introduciéndose en las cadenas alimenticias.

Por último, las dosis de radiactividad pueden variar notablemente en el tiempo y en el espacio (ej., zonas próximas a fuentes de descargas radiactivas sufrirán niveles mucho más altos de radiación que el promedio regional o nacional).

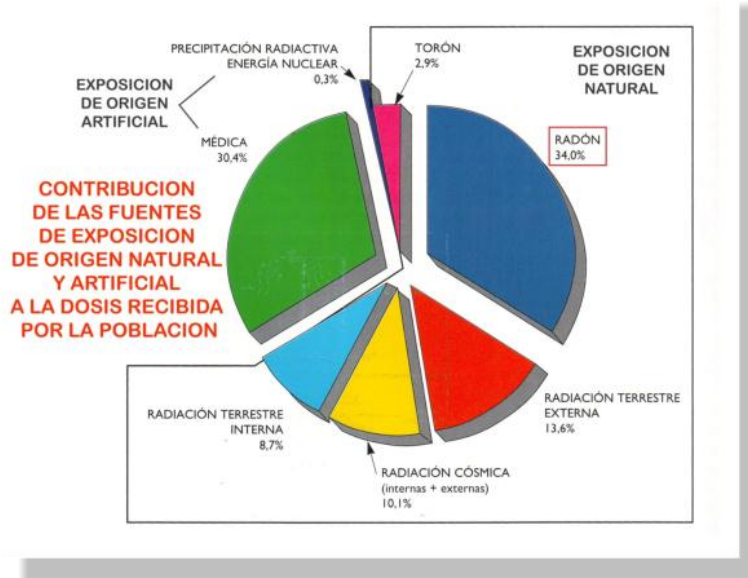


Figura 1. Contribuciones de las fuentes de exposición de origen natural y artificial a la dosis recibida por la población (Quindós Poncela, 1995)



## 2.2. EL ÁTOMO

La radiactividad natural se encuentra en el Universo desde su origen. Está presente en la Tierra e incluso en los seres vivos. La materia se encuentra formada por átomos que suelen ser estables. Sin embargo, cuando algunos de ellos se alteran (pierden alguna de sus partes) y emiten radiaciones que transportan energía dan origen a la radiactividad. El hallazgo de la radiactividad supuso una auténtica revolución del pensamiento científico, que modificó el modelo del universo que se tenía y abrió una nueva rama de la física. En 1896, el físico francés Enrique Becquerel descubrió la cualidad que posee el Uranio de emitir ciertos *rayos invisibles*, y en 1898, el matrimonio Curie, descubrió el Radio, un nuevo elemento. A partir de estos dos logros se dedujo que el átomo debía tener una estructura muy compleja.

Como la radiactividad es resultado de la transformación del átomo, para poder aclarar su naturaleza es importante detallar lo que sucede dentro de estos. Los átomos están constituidos de tres tipos de partículas “subatómicas” que son: protones, neutrones y electrones. El núcleo de cada átomo engloba los protones que están cargados positivamente, y los neutrones que no tienen carga eléctrica; ambos son muy similares en tamaño, casi idénticos, solamente difieren en su carga eléctrica. Alrededor de ellos encontramos los electrones, con carga negativa. El átomo normalmente es eléctricamente neutro, es decir, tiene la misma proporción de protones que de electrones, contrarrestándose unos con otros. Si se incrementa el número de electrones, el átomo se carga negativamente y si se disminuyen se carga positivamente. Esta partícula con carga se denomina ión.

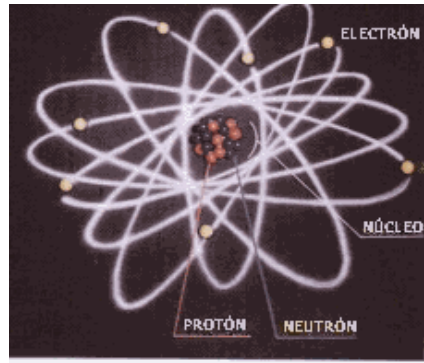
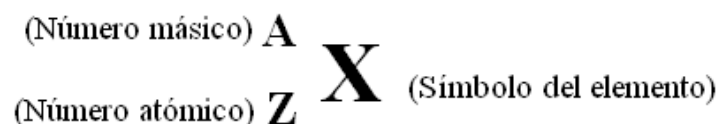


Figura 2. Estructura del átomo (*Jorba Bisbal, Ortega Aramburu, 2010*)

Aunque el tamaño de los átomos de cada elemento es ínfimo (su diámetro es igual a una cienmillonésima de centímetro), forma un conjunto extremadamente complicado, con una estructura similar a nuestro sistema solar.

*Elementos, isótopos, nucleidos y radionucleidos*

El número de protones de un núcleo de un átomo determina el elemento químico. Se denomina **número atómico** del elemento y se nombra con la letra *Z*. Sin embargo, cada elemento químico puede tener varios núcleos diferentes, es decir, pueden tener distinto número de neutrones en el núcleo y, por tanto, distinta masa, recibiendo el nombre de **isótopos** del elemento. Estos se reconocen por un número llamado “número másico” *A*, que es la suma de los protones y los neutrones en el núcleo. De modo que el número de neutrones es la diferencia entre el número másico y el número atómico ( $N = A - Z$ ). El número atómico (*Z*) determina a que elemento químico pertenece un átomo y el número másico (*A*) define a que isótopo del elemento.



Por ejemplo, el Uranio tiene dos isótopos comunes:  $^{235}\text{U}$  (92 protones y 143 neutrones) y  $^{238}\text{U}$  (92 protones y 146 neutrones). Por eso, aunque existen 90 elementos

químicos naturales y 28 artificiales, hay cientos de átomos diferentes debido a que cada elemento puede tener numerosos isótopos naturales.

Se denomina **nucleido** a todos los núcleos que tienen la misma cantidad de protones (Z) que de neutrones (N). Es decir, al igual que todos los átomos con el mismo Z (protones) pertenecen al mismo elemento, todos los elementos con la misma composición de protones y neutrones (Z y N) corresponden al mismo nucleido (ej.,  $^{12}\text{C}$ , con 6 protones, 6 neutrones y masa 12). Existen aproximadamente 1.440 nucleidos conocidos de los cuales 340 se hallan en la naturaleza y alrededor de 1.100 se han obtenido en laboratorios.

A pesar de que los protones al estar cargados positivamente están continuamente repeliéndose los unos a los otros, el núcleo permanece unido gracias a una fuerza llamada “interacción nuclear fuerte” entre estos y los neutrones. La mayor parte de los núcleos están en una situación estable manteniéndose unidos pero en algunas ocasiones protones y neutrones no consiguen permanecer en equilibrio y evolucionan hasta lograr otra forma más estable liberando ciertas partículas. Esto es lo que conocemos como **radiactividad** y dichos átomos son los **isótopos radiactivos**. Parte de la energía que se libera cuando el átomo logra su forma más estable es la denominada **radiación**. Los átomos o los propios nucleidos que se alteran y pasan a ser otros nucleidos se les denomina **radionucleidos**.

A su vez, la nueva estructura tomada por ese átomo también puede ser inestable o radiactiva y continuar decayendo. Estas transformaciones persisten hasta que el átomo alcanza una forma estable.

Existen alrededor de 280 nucleidos estables aunque generalmente son inestables o **radiactivos**.

### 2.3. TIPOS DE RADIACIÓN

La radiación puede tener distintas apariencias:

➤ **Radiactividad alfa:** cuando se expulsa una partícula alfa, el núcleo va a decaer debido a la pérdida de dos protones y dos neutrones de modo que el átomo evoluciona a un elemento diferente que tiene un número atómico con dos valores menos. Esta radiación se produce en los elementos pesados.

➤ **Radiactividad beta:** la partícula beta es expulsada descargando el exceso de energía cuando un neutrón se transforma en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino (antipartícula correspondiente al neutrino, es decir, tienen la misma masa, el mismo spin pero helicidad contraria). Se crea otro elemento químico que contiene un protón más.

➤ **Radiactividad gamma:** emisión de un fotón (partícula elemental de masa cero portadora de todas las formas de radiación electromagnética) que conlleva un reajuste de protones o neutrones del núcleo para pasar a un estado de menor energía y, por tanto, más estable (la proyección de partículas alfa y beta no siempre dejan al núcleo en su estado más estable y el exceso de energía remanente puede ser liberada como rayos gamma).

Los distintos tipos de radiación reaccionan con la materia de diferente forma penetrando unas más q otras.

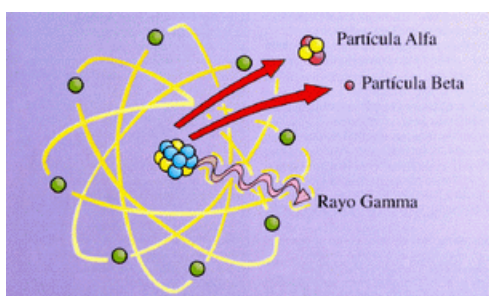


Figura 3. Tipos de radiación (*Quindós Poncela, 1995*)

## 2.4. RADIACIONES IONIZANTES

Los tres modelos de radiaciones mencionadas anteriormente tienen aptitudes para hacer que el material que traspasan se “ionice”, debido a ello reciben el nombre de **radiaciones ionizantes**. Esto significa que al interactuar con la materia que las rodea pueden producir átomos eléctricamente cargados, es decir, iones. También pueden romper o crear enlaces químicos y dañar las células de los organismos vivos.

Aparte de las tres radiaciones explicadas podemos encontrar otros dos tipos de radiaciones ionizantes:

- **Rayos X:** Son semejantes a la radiación gamma pero tienen menos energía. Se producen en las máquinas de rayos X y desaparecen al desconectar la máquina.
- **Emisión de neutrones:** Se produce durante algunos procesos nucleares como la “fisión” dentro de un reactor en el cual el núcleo del átomo pesado es dividido en dos liberando neutrones. Estos neutrones no tienen carga eléctrica pero sí un gran poder de penetración.

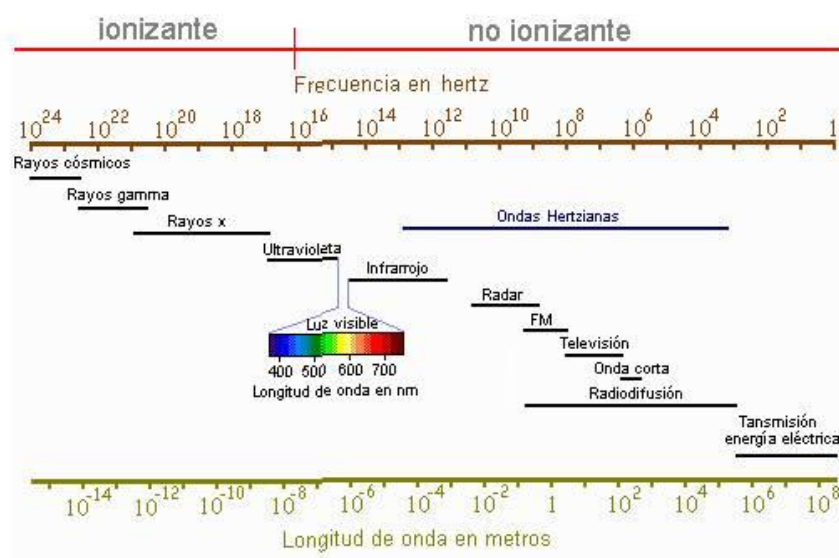


Figura 4. Espectro magnético (Frenzel, 2003)

## Propiedades de los tipos de radiación

➤ **Partículas alfa:** Son partículas relativamente grandes y pesadas. Están constituidas por dos protones y dos neutrones. Su energía se disipa durante el movimiento de modo que las causas por las que se detiene pueden ser:

a) Consecuencia de la interacción con otras partículas cargadas debido a que es una partícula cargada eléctricamente (positiva)

b) Colisión con otras partículas. No pueden traspasar la piel o una hoja de papel, sólo pequeñas distancias en el aire.

Una sustancia que emite partículas alfa puede ser ingerida o inhalada ocasionando lesiones graves en una región concreta de los tejidos.

➤ **Partículas beta:** con menos masa y un movimiento más rápido. Tienen un mayor poder de penetración que las alfa, aunque pueden ser detenidas por una lámina de aluminio. Son partículas con un electrón libre de modo que están cargadas eléctricamente (negativas).

➤ **Rayos gamma, rayos X y neutrones:** La energía se disipa más lentamente en ellos porque no tienen carga eléctrica. Tienen un alto poder de penetración (atraviesan el cuerpo humano) y pueden desplazarse grandes distancias.

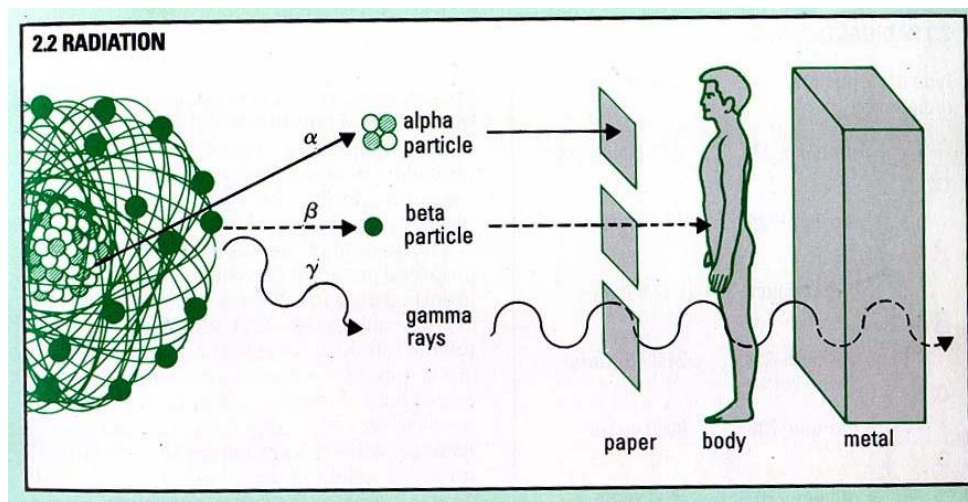


Figura 5. Penetración de las radiaciones (Venturi, 2010)

### *Efectos de la radiación ionizante*

La actividad de un organismo vivo está determinada por sus células. Las radiaciones ionizantes pueden romper los enlaces entre los átomos dentro de las moléculas de las células vivas e incluso variar la naturaleza misma de los átomos. Dichos trastornos en las células pueden producir su muerte o un cambio en su funcionamiento. La radiación ionizante puede compararse con un transporte de energía que al interactuar con la materia provoca peligrosos daños. Las células son lo suficientemente autosuficientes como para subsanar los daños aunque algunos de ellos pueden ser irreparables.

Las alteraciones causadas por la radiación pueden distribuirse en:

a) **Efectos somáticos:** afectan directamente al sujeto que ha estado expuesto a la radiación.

b) **Efectos hereditarios:** las secuelas se transfieren a sus descendientes.

Las radiaciones pueden ocasionar en las células vivas las siguientes consecuencias:

1. Matar la célula.
2. Perjudicar la reproducción de la célula.
3. Deteriorar las células de los ovarios o testículos provocando una anomalía hereditaria en la progenie.

En la mayoría de las ocasiones, la muerte de las células sólo es relevante cuando muere un gran número de ellas, ya que los órganos están formados de un número mayor del que necesitan para su actividad normal. Cuando las dosis tienen unos niveles muy altos entonces las alteraciones de las células se convierten en importantes.

Puede ocurrir que la célula dañada sobreviva a la radiación. En este caso las consecuencias de esta célula afectada pueden permanecer ocultas siempre y no manifestarse, ya que un pequeño número de células perjudicadas que no trabajan de un modo correcto no influirá en un órgano donde la mayoría tienen una conducta normal.

Sin embargo la situación se complica cuando la célula dañada es una célula germinal dentro de los ovarios o testículos. La radiación ionizante puede perjudicar su ADN revelando una anomalía hereditaria en una o más generaciones.

Cuando una célula del tejido vivo varía provocando la replicación incontrolable de las células, estas tienen la capacidad de crecer más rápidamente en relación a las células adyacentes. Esto puede transformarse en un cáncer detectable y en ocasiones, producir la muerte por la difusión local o hacia otras partes del cuerpo.



## 2.5. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN

La radiactividad se expresa en una unidad llamada **becquerel** (Bq); 1Bq corresponde a una desintegración radiactiva por segundo. Pero también se puede expresar con otra unidad, el **curie** (Ci); 1Ci equivale a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Por ejemplo, una muestra de Plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ) con una cantidad de 2.000 Megabecquerel (MBq) emitirá una media de 2.000 millones de partículas alfa cada segundo.

La **dosis absorbida** es la medida de la radiactividad recibida por la materia. Su unidad de medida es el **gray** (Gy), que es la dosis de radiación que produce que un kilogramo de material absorba un julio de energía ( $\text{J.kg}^{-1}$ )

Los distintos tipos de radiación presentan diferentes niveles de energía y poderes de penetración, de modo que cada uno tiene distintos potenciales de riesgo.

Existe un peligro persistente con los rayos gamma, los rayos X y los neutrones ya que todos ellos pueden traspasar el cuerpo humano. Como las partículas alfa no atraviesan la piel no suponen una amenaza a distancia pero sí que conllevan un gran riesgo si se produce ingestión o inhalación. Las partículas beta pueden provocar incluso quemaduras en la piel así que se consideran también peligrosas.

Para poder comparar las distintas clases de radiación empleamos el **factor de calidad (Q)** que multiplicado por la “dosis recibida” nos da la **dosis equivalente**. La

unidad de la dosis equivalente es el **sievert** (Sv), 1 sievert de radiación alfa produce tanto daño como 1 sievert de radiación beta o gamma.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{Factor de Calidad}$$

Debido a que las diferentes partes del cuerpo son afectadas de manera distinta por la misma cantidad de radiación, existe un factor de ponderación para calcular el riesgo global para el organismo debido a exposiciones parciales.

La **Dosis Equivalente Efectiva** se calcula teniendo en cuenta las diferentes sensibilidades a la radiación de cada órgano del cuerpo. Es la suma ponderada de las dosis equivalentes para los órganos individuales y la irradiación total del cuerpo. Se mide también en sieverts.

## 2.6. VIDA MEDIA DE LOS RADIONUCLEIDOS Y CADENAS DE DESINTEGRACIÓN

Los radionucleidos no tienen todos la misma estabilidad, algunos decaen más rápidamente que otros. Cada radionucleido tiene una tasa de decaimiento propia, que lo diferencia del resto, y se denomina **vida media**. La vida media se puede definir como el tiempo necesario para que la actividad de una determinada cantidad de radionucleido se reduzca a la mitad. Otra manera de definirlo sería diciendo que es el tiempo que tardan la mitad de los átomos de la muestra en alcanzar su estado estable. Las vidas medias de los radionucleidos varían desde fracciones de segundo a millones de años.

La desintegración de un elemento inestable en la mayoría de los casos, genera un nuevo elemento que es también inestable y que transcurrido un periodo de tiempo relativamente largo, se desintegrará a su vez, originando otro elemento igualmente radiactivo. Así sucesivamente hasta que una desintegración, la “última”, proporcione un elemento estable. En el caso de las sustancias radiactivas este último elemento siempre es el plomo.

Todos los elementos resultado de desintegraciones sucesivas (hasta alcanzar el plomo) constituyen una **familia radiactiva**. En la naturaleza existen tres series o familias radiactivas: la del radio, la del actinio y la del torio.

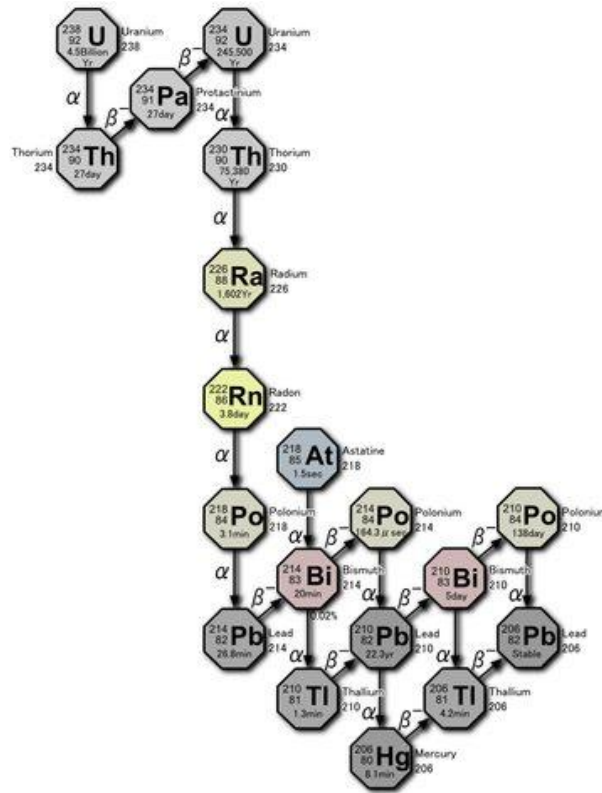


Figura 6. Cadena de desintegración del  $\text{U}^{238}$  (Garzón Ruipérez, 1979)

Las reacciones nucleares pueden modificar de manera artificial el núcleo de un elemento estable y lograr un isótopo radiactivo o un nuevo elemento inexistente en la naturaleza. Como se había comentado anteriormente, la radiactividad originada de esta forma es calificada como inducida o artificial.

La importancia de los radionucleidos en la producción industrial tiene que ver con dos aplicaciones, una es formar radioelementos con vidas medias distintas y otra, usar las cualidades radiactivas y químicas de diferentes elementos. Los isótopos de un mismo elemento, ya sean radiactivos o no, tienen el mismo comportamiento químico. Esta propiedad es empleada en procesos industriales y medicinales.

## 2.7. LEGISLACIÓN

En España no existe una legislación específica reguladora en el uso de los materiales de construcción en relación a su radiactividad natural. En cambio, la Unión Europea establece una serie de reglamentos reguladores en el empleo de dichos materiales dependiendo de su dosis de radiactividad. Esta relación de reglas es la denominada Norma 112 de principios de protección radiológica concerniente a la radiactividad natural de materiales de construcción (*Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials*).

A continuación se reúnen los puntos principales resumidos en *C. González Neila (2008)* y *M. Manteca Álvarez (2011)* incluidos en la Norma 112. Estos describen los conceptos más relevantes sobre la radiactividad natural en materiales de construcción y sus efectos, y las dosis mínimas recomendables en edificios de nueva y vieja construcción aplicables a países miembros de la Unión.

1. Todos los materiales de construcción contienen cantidades variables de nucleidos de radiactivos naturales. Los materiales derivados de rocas contienen cantidades de radionucleidos naturales de las series del U y Th y del isótopo radiactivo del K.

2. La exposición a radiación de los materiales de construcción puede ser dividida en exposición interna y externa. La exposición externa es causada directamente por la radiación gamma. La exposición interna es causada por inhalación de Radón. El Radón es parte de la serie de desintegración del U, que está presente en los materiales de construcción.

En muchos casos, la mayor parte del Radón en el interior de las plantas superiores de los edificios procede de los materiales de construcción.

3. Restringir el uso de ciertos materiales de construcción puede tener consecuencias económicas y sociales a nivel local y nacional. Dichas consecuencias, junto con los niveles nacionales de radiactividad natural de los materiales de construcción, deben ser asesoradas y consideradas estableciendo determinadas regulaciones.

4. El control en la radiactividad de los materiales de construcción puede estar basado en los siguientes criterios y principios radiológicos:

a) Las dosis que superen  $1\text{mSv}^{-1}$  deben ser aceptadas sólo en casos muy excepcionales donde los materiales fueron usados localmente. Es recomendable que los controles estén basados en una dosis en un rango de  $0,3\text{--}1\text{ mSv}^{-1}$ . No obstante, estos criterios son establecidos considerando las circunstancias nacionales.

b) Nivel de exención. Los materiales de construcción deben estar exentos de todas las restricciones concernientes a su radiactividad si el máximo de radiación gamma responsable de la dosis anual efectiva de una persona tiene un valor de  $0,3\text{ mSv}$ . Este es el máximo de radiación gamma que es recibida en exteriores.

c) Criterio de dosis: 
$$I = \frac{C_{Ra}}{300\text{Bq/Kg}} + \frac{C_{Th}}{200\text{Bq/Kg}} + \frac{C_K}{3000\text{Bq/Kg}}$$

Donde  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$ ,  $C_K$  representan la concentración de actividad de los elementos radiactivos en el material de construcción. Dicha concentración de actividad  $I$  no debe exceder los siguientes valores en función del criterio de dosis y de la manera en que el material es usado en la construcción (Tabla 1).

<b>Criterio de dosis</b>	<b>0,3 mSv<sup>-1</sup></b>	<b>1 mSv<sup>-1</sup></b>
Materiales usados en amplias cantidades como el hormigón.	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Materiales superficiales y otros de uso restringido: tejas, losas.	$I \leq 2$	$I \leq 6$

Tabla 1. Límite de concentración de actividad en función del criterio de dosis y del uso del material (Norma 12: *Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials*).

5. Normalmente, las medidas de la concentración de actividad son necesarias sólo en el caso donde haya una razón específica para sospechar que el criterio de dosis de los controles puede ser excedida. Los países miembros deben requerir, como mínimo, la medición de los tipos de materiales que son generalmente sospechosos.

6. Las medidas de actividad de concentración en materiales de construcción deben ser realizadas con equipamiento apropiado cuya calibración haya sido aprobada y su calidad asegurada mediante programas.

7. Algunos materiales de construcción naturales usados tradicionalmente contienen radionucleidos naturales donde la dosis anual de 1 mSv puede ser excedida. Algunos de estos materiales pueden haber sido usados durante décadas o siglos. En estos casos, el uso de estos materiales debe ser analizado y debe incluir costes financieros y sociales.

Cabe destacar el punto 3 dada la importancia de las consecuencias a nivel económico y social si se restringe el uso de ciertos materiales que en la actualidad son

ampliamente usados en España para la construcción, tanto en interiores como en las fachadas exteriores de los edificios oficiales y particulares. Por ello, se hace necesaria una legislación para analizar aquellos materiales empleados generalmente y las posteriores medidas a tomar en relación con la dosis de radiación provocada por cada tipo de material.



### 3. ANTECEDENTES AL TRABAJO

Se encuentran registrados pocos estudios acerca de la radiactividad natural en materiales de construcción de modo que las referencias en relación a este tema son escasas. Vamos a hacer una síntesis de los trabajos expuestos vinculados a ella.

*Higgy et al. (2000)* desarrollaron un ensayo para descubrir la radiactividad de algunos materiales de construcción egipcios empleados en la construcción de paredes y suelos. Todas las muestras del estudio fueron molidas y tamizadas hasta obtener un tamaño inferior a 1mm.

La investigación de *Tzortis et al. (2003)* se basaba en analizar la medida de la radiación gamma en rocas naturales comercializadas como recubrimiento, en concreto de granitos. El análisis, que constaba de un total de 28 muestras, revela la radiación obtenida para la utilización de estos ejemplares en la edificación de un 100%, 50% y 25%. Uno de los resultados a los que se llegó fue que el empleo de un espectrómetro de rayos gamma de alta resolución es un aparato muy sensible ideal para estudiar la radiactividad natural y determinar las concentraciones elementales y tasas de radiación en varios tipos de rocas. Un gran número de los granitos analizados mostraban altos valores de actividad y concentraciones de Th, U y K, que contribuyeron a incrementar la dosis de radiación en el aire en el interior de los inmuebles.

*Anjos et al. (2005)* presenta una publicación muy completa acerca de unas muestras brasileñas e inicia el estudio de la protección radiológica cuando se emplean rocas graníticas en baldosas o revestimientos interiores. El análisis se basa en que las concentraciones de Th, U y K de rocas graníticas se encuentran vinculadas a su composición mineral y sus características petrológicas generales (*Whitfield et al; 1959, Rogers and Ragland, 1961; Doverton and Prenskey, 1992*), utilizando un detector NaI o

espectrómetro de rayos gamma para determinar la concentración de radionucleidos naturales sobre las muestras seleccionadas. Llegaron a la conclusión de que los granitos brasileños estudiados no contenían minerales que pudieran producir altos niveles de radiación cuando son utilizados como recubrimiento.

*El – Hussein (2005)* publica el primer estudio sobre la radiación natural cuyas medidas se efectúan en habitaciones reales de edificios de viviendas. También es el primero que se basa en la concentración de Rn en las habitaciones interiores y de cómo la concentración de sus productos de desintegración es de 2 a 10 veces superior la atmósfera libre que el aire del interior de los edificios. Con ello se quería probar que la alta concentración de estos radionucleidos en el aire del interior de los edificios, junto con largos períodos de exposición en estas habitaciones, provoca que los productos de desintegración del Rn sean un riesgo potencial para la salud.

*Pulidou et al. (2006)* publican un estudio basado en la medida de la radiactividad natural de 16 muestras de granito con un espectrómetro de rayos gamma. Las concentraciones de  $U^{238}$ ,  $Ra^{226}$ ,  $Th^{232}$ , fueron comparadas con otros materiales de construcción y otros granitos. También relacionaron los altos niveles de radiactividad observados en algunos granitos con sus minerales radiactivos y su composición química. Dedujeron que el alto nivel de los granitos estudiados estaba relacionado a la presencia de minerales ricos en potasio y accesorios como el apatito y hematites, que se encuentran con frecuencia en rocas graníticas.

Los estudios más recientes, en nuestro conocimiento, elaborados sobre la radiactividad natural corresponden a rocas que no han sido sometidas a ningún proceso para su posterior comercialización. *Sesana et al. (2006)* realizó un estudio en relación a la medida de radionucleidos en rocas del Valle de Cervo en Piedmont (Italia). Todas las

muestras eran frescas y no presentaban marcas de fracturas rellenadas con minerales de U.

*Lu y Zhang (2007)* editaron un estudio de la radiactividad natural en rocas del parque natural “Montañas Cuihua” en China. Midieron las concentraciones de radionucleidos naturales de  $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Th}^{232}$ , y  $\text{K}^{40}$  mediante un detector NaI.

El Trabajo fin de Carrera de *C. González Neira (2008)* estudia la radiactividad natural de cinco rocas graníticas y dos serpentinitas de origen español y portugués empleadas como materiales de construcción y el trabajo de fin de Carrera de *M. Manteca Álvarez (2011)* trata sobre la caracterización radiológica de las rocas ornamentales de Castilla y León.

## 4. EL RADÓN

### 4.1. EL GAS RADÓN

El radón (Rn) es un gas radiactivo de origen natural, incoloro, inodoro y sin sabor procedente de la desintegración radiactiva directa del radio (Ra) que emite partículas alfa. Dicho radio deriva de la desintegración del torio ( $\text{Th}^{230}$ ) y éste a su vez de la desintegración del uranio ( $\text{U}^{234}$ ). Es decir, allí donde se encuentra el uranio se halla también el radio y, en consecuencia, el radón. El uranio ha existido desde que se formó la Tierra y se está repartido por toda la corteza terrestre, aunque se localiza principalmente concentrado en diferentes materiales naturales como granitos, arcillas, etc. Tiene una larga vida media.

El radón es un elemento inestable que se transforma en otro más estable, el polonio (Po), que es sólido. Para ello, tarda 3,8 días en la desintegración. Concretamente se transforma en  $\text{Po}^{212}$ , que emplea 3 minutos en desintegrarse dando lugar al plomo ( $\text{Pb}^{214}$ ) que en menos de 27 minutos se altera a bismuto ( $\text{Bi}^{214}$ ) radiando partículas beta. Por último, éste se transforma en un elemento estable, el  $\text{Pb}^{206}$ .

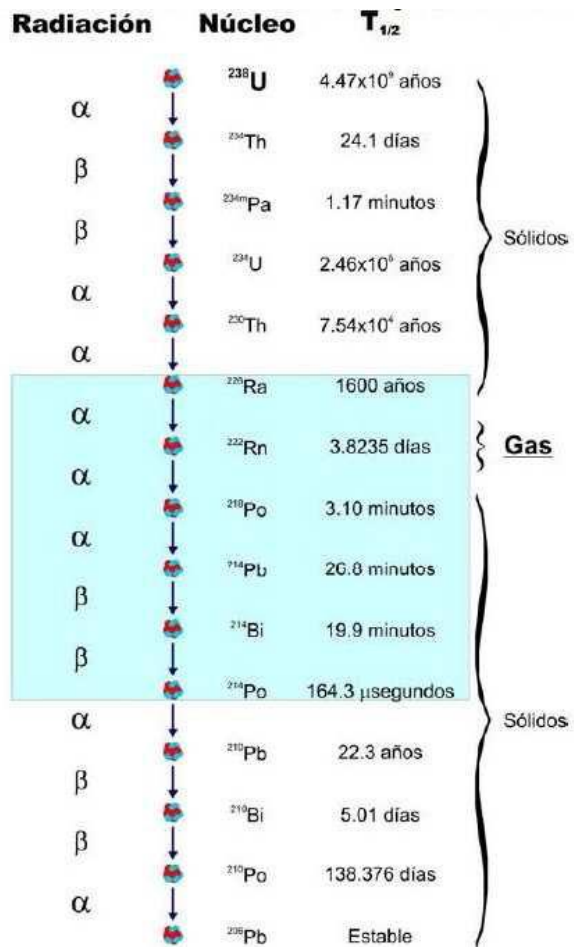


Figura.7. Esquema de desintegración del  $^{238}\text{U}$ . En azul sección de la cadena de desintegración  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$  e hijos de periodo corto (Llerena, 2006)

Los isótopos radiactivos pueden penetrar en los pulmones al respirar algún gas radiactivo, pero también se incorporan a partículas de polvo del aire que a su vez pueden contaminar cualquier objeto de la vida cotidiana.

La abundancia de radón depende del tipo de roca que forme el subsuelo y de los materiales utilizados en la construcción de los edificios, así como de la ventilación de dichos inmuebles.



MATERIA	URANIO 238 (en ppm)	TORIO 232 (en ppm)
Rocas areniscas	0.5	1.7
Rocas carbonatadas	0.5	1.7
Rocas basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3.5	11
Rocas graníticas	5	12

Tabla 2. Concentración de Uranio y Torio (en ppm) de distintos materiales

(Igor Leibar, 2003).

Otros focos de radón son los materiales empleados en la construcción de las viviendas, fundamentalmente los cementos de baja calidad y coste realizados a base de escorias de la industria metalúrgica. También el agua corriente puede contener radón disuelto liberándose a la atmósfera a temperatura ambiente. Incluso el gas que se distribuye como combustible doméstico puede contener gas radón capaz de ser liberado al medio. La concentración de gas radón en un edificio aumenta en función de la porosidad de los materiales empleados en su construcción. Por ello, es indispensable elegir los materiales y construir protegiendo la salud del residente, es decir, es necesario **bioconstruir**.

#### 4.3. MEDICIONES EN EL LABORATORIO

Las medidas de la concentración de radón en el aire se fundamentan en el recuento de las partículas alfa emitidas por dicho gas y por su progenie. Encontramos diferentes procedimientos para medir la concentración de Rn en el aire, pocos de ellos basados en la detección de los rayos gamma. Estos métodos se pueden dividir en activos o pasivos dependiendo de si se emplea o no aire para captar la muestra. En función del tiempo de muestreo (segundos, días o meses) se diferencian: métodos instantáneos, métodos de lectura continua y métodos integrados.

Los equipos y dispositivos que se manejan con mayor frecuencia para las mediciones del radón y sus descendientes son:

- a) *Células de centelleo*: tienen forma de botella y almacenan muestras de aire que después se analizan en el laboratorio. Es un método de medición instantáneo.
- b) *Detectores sólidos de trazas*: cuando las radiaciones atraviesan el sólido dejan una huella imperecedera en ellos después de un largo periodo de exposición.
- c) *Detectores de carbón activo*: el detector recoge los diferentes gases del aire del lugar de medición, entre los que se encuentra el radón. Requiere un tiempo prolongado de exposición.

Otras técnicas empleadas para la detección de radón son:

- Emulsión nuclear.
- Absorción.
- Escintilación sólida.
- Escintilación líquida.
- Espectrometría gamma
- Monitorización beta.



- Detectores de restos nucleares sólidos.
- Electroscopio.
- Cámara de ionización.
- Detectores de barrido superficial.
- Fosforescencia termoluminiscente.

Algunos de los equipos empleados en el Laboratorio de Radiactividad natural de Coimbra son:

- Rd200 Detector Scintrex RDA-200* para la medición instantánea (inmediata) de las concentraciones de radón en el aire del subsuelo.



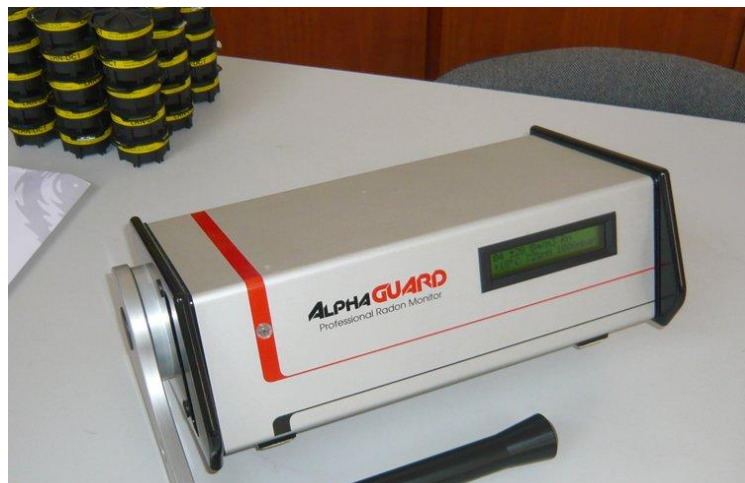
- Cámara de calibración de radón certificada *Genitron* y *NIST SRM-4973*.



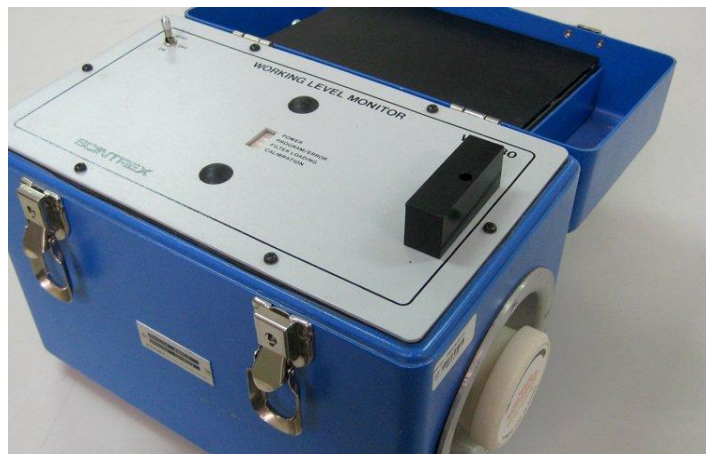
- c) Sistema de análisis automático *Radosys*, para recuento de detectores pasivos de radón del tipo CR39.



- d) Sistema *Genitron Alphaguard 2000 Pro* para la medición del gas radón en suelos, agua, aire y materiales de construcción (utilizado en nuestro estudio).



- e) Monitor continuo de radón y sus descendientes radiogénicos *Scintrex WLM-30*.



f) Monitor continuo de radón *Radim 2PF*.



g) Espectrómetro portátil de rayos gamma *Exploranium GR-130G* para la cuantificación de los elementos radiogénicos uranio, torio y potasio, presentes en las rocas y la determinación de la dosis absorbida.



h) Sistema de espectrometría gamma *Ortec con detector de 3x3 NaI (TI)* y “castillo de plomo” para cuantificar los elementos radiogénicos uranio, torio y potasio.





- i) Espectrómetro de centelleo líquido ultra sensible *Perkin Elmer Quantulus 1220* para la determinación de un amplio conjunto de radionucleidos naturales (U238, U234, Rn222, Ra226, C14...) y artificiales, así como de las radiaciones alfa y beta totales.



- j) Scintilómetro de rayos gamma de campo total *Saphymo SPP2* y equipamiento *Geiger-Muller NDS-200* para la evaluación del fondo radiométrico e identificación de anomalías.



#### 4.4. PROTECCIÓN CONTRA EL RADÓN

La Comisión de las Comunidades Europeas, en su **Recomendación 90/143/EURATOM** concerniente a la protección de la población contra los peligros de la exposición al radón en el interior de edificios, reúne en su punto II, los estudios realizados en Estados de la Unión donde las concentraciones de radón en interiores alcanzan medias de 20 a 50 Bq/m<sup>3</sup>. También, declara en ese mismo punto que, partiendo de modelos de exposición, se puede tomar un factor de conversión entre la media temporal de la concentración de actividad de gas Radón (Rn<sup>222</sup>) y el equivalente de dosis efectiva anual de 20 Bq/m<sup>3</sup> por mSv/año, lo que lleva a dosis típicas en viviendas de la Comunidad de entre 1 y 2.5 mSv/año, alcanzando la población de algunos países los 20 mSv/año debidos al radón, cuando la propia Comunidad fijó el límite de dosis anual de exposición de la población a la radiación producida por el hombre en 5 mSv/año. Por último, se recoge la recomendación de que se disponga de un sistema apto para limitar toda exposición a las concentraciones de radón en el interior de edificios, teniendo cuidado en la información que se proporciona al público. Así mismo, establece un nivel de actuación en edificios ya existentes de 400 Bq/m<sup>3</sup>, y para edificios de nueva construcción de 200 Bq/m<sup>3</sup>.

En la siguiente tabla recoge la relación de límites de actuación propuestos por la U.E. tanto para lugares de trabajo como para viviendas.

LOCALIZACIÓN	Límites máximos de actuación
	UE (Bq/m <sup>3</sup> )
Lugares de Trabajo	1000
Viviendas anteriores a 1990 (vieja construcción)	400
Viviendas posteriores a 1990 (nueva construcción)	200

Relación de límites máximos de actuación recomendados por la Unión Europea.  
La denominación de vivienda vieja o nueva, se toma en base a si fue construida antes o después de la publicación de la Recomendación 90/143/EURATOM.

**90/143/EURATOM:** Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios... D.O.C.E. nº L 080 de 27/03/1990 p. 0026-0028.

## **5. OBJETIVOS**

Los objetivos principales de este trabajo son:

1. Realizar una caracterización radiológica del Rojo Sayago, una de las rocas ornamentales más radiactivas estudiadas hasta el momento. Se persigue determinar la dosis efectiva de radiación que puede provocar esta roca, utilizando muestras de distinto tamaño de grano.
2. Establecer una relación entre la radiactividad natural de la roca y su mineralogía. La finalidad de este análisis es determinar qué elementos de la composición mineral de la roca influyen en el nivel de radiación que es emitida por dicha roca.

Intentaremos alcanzar estos objetivos utilizando una metodología sencilla con las herramientas y conocimientos que disponemos en la actualidad.

## 6. ROJO SAYAGO

Las **rocas ornamentales** o “piedra natural” son las rocas que se explotan industrialmente para la obtención de bloques, losas o placas para recubrimientos usados en construcción. El Rojo Sayago es una roca ornamental, ha mantenido sus propiedades constitutivas constantes después de haber sido trabajada, cortada o devastada.

### 6.1. NOMBRE CIENTÍFICO/NOMBRE COMERCIAL

El nombre específico comercial que identifica al Rojo Sayago realmente es el de granito, lo difiere del nombre científico o petrológico, que es episienita, que describe sus características mineralógicas. Esta disparidad puede tener consecuencias comerciales o incluso sociales en el mercado al designar erróneamente el nombre de la roca.

Las piedras naturales pueden clasificarse en seis grupos importantes atendiendo a su interés comercial y económico, y estos grupos no siempre coinciden con su nombre científico o petrológico. Los grupos desde el punto de vista comercial son: granitos, mármoles, pizarras, areniscas, cuarcitas y alabastros. Según la UNE-EN 12670, los granitos son:

- Científicamente: rocas plutónicas con feldespato alcalino, cuarzo, pequeñas cantidades de plagioclasa, mica y otros minerales accesorios.
- Comercialmente: cualquier roca constituida por agregados cristalinos de varios minerales, que se explota en grandes bloques coherentes y homogéneos, y que pueden ser cortados, desbastados y/o pulidos.



De acuerdo con esto, el Rojo Sayago es considerado un granito a nivel comercial. Sin embargo, es en realidad una episienita, es decir, originalmente era un granito pero por procesos hidrotermales, todo el cuarzo se ha disuelto, formando cavidades que se rellenan de clorita, carbonatos... que son el producto de alteración por el efecto hidrotermal (ver punto 7.1.)

Las características de la roca condicionan las distintas aplicaciones que tienen en decoración y construcción. Los granitos son generalmente utilizados para sillerías y mampostería, pavimentos, revestimiento de fachadas (tanto de interior como de exterior) bordillos y molduras, etc. y este es el uso que se le da también al Rojo Sayago constituyendo una de las rocas más atractivas que se explotan en Castilla y León. Es una roca muy vistosa pero no sirve para ser pulida.

## 6.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

El noroeste de la península ibérica es la zona que presenta los mayores valores de radiactividad natural, debido a la existencia de rocas graníticas. La roca Rojo Sayago aflora al suroeste de la provincia de Zamora (Fig.9). Se encuentra rodeada de rocas básicas e intermedias que podrían ser el origen de la episientitización de un granito original. El Rojo Sayago está asociado a cuerpos básicos profundos, que aportan el hierro, entre otros componentes, participando en la formación de los minerales secundarios.

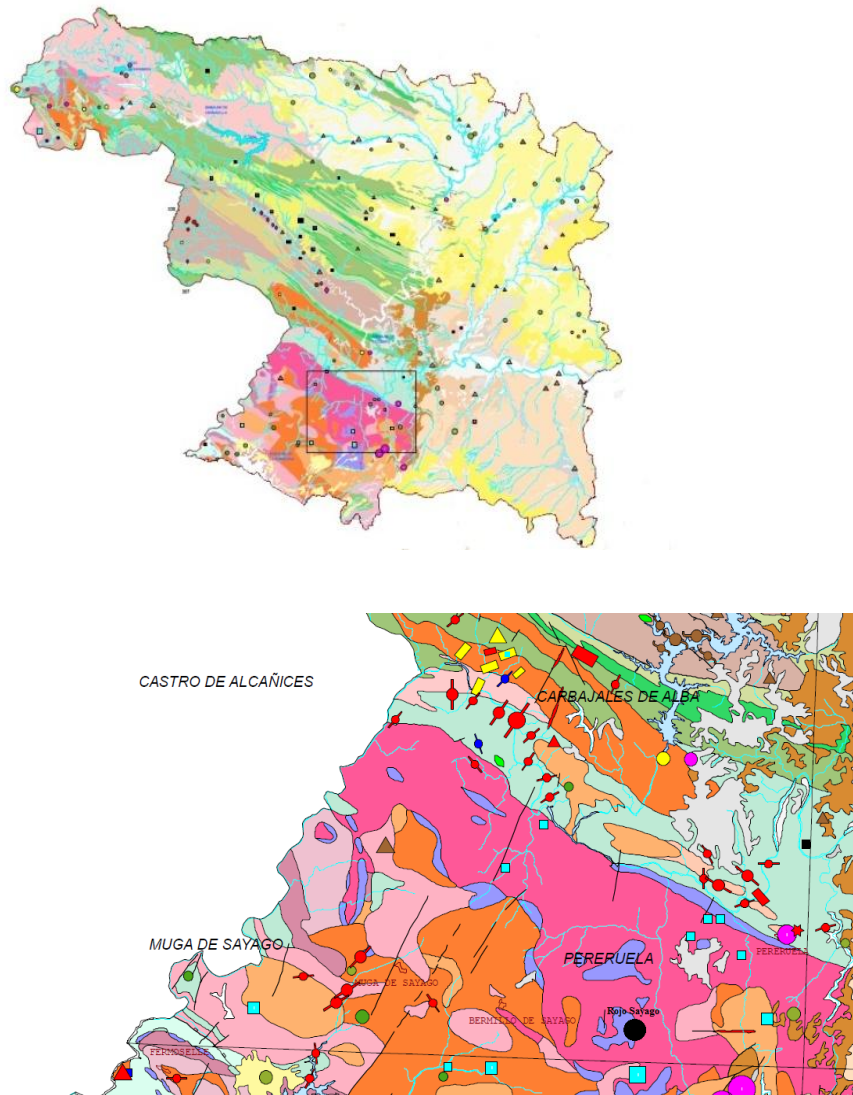


Figura 9. Localización en la provincia de Zamora (arriba) y en la comarca (abajo) de la roca Rojo Sayago

Debido a su aspecto y color llamativos se utiliza como roca ornamental. Se explota en diversas canteras que se encuentran en Piñuel (Zamora) (Fig.10).



Figura.10. Cantera de Piñuel

Esta roca se extrae en la cantera y se traslada en bloques a las canteras de Los Santos (Fig.11) y de Villamayor (Fig.12), ambas en la provincia de Salamanca, donde se elabora todo tipo de material de cantería.



Figura 11. Cantera de Los Santos



Figura 12. Cantera de Villamayor

Es una roca que por sus características se emplea con terminación rústica empleando acabados como el abujardado. No se pule, a pesar de que esto resaltaría más su color, porque transcurrido el tiempo las cloritas que lo componen pueden desaparecer dejando cavidades.

Se emplea principalmente para amueblado urbano como adoquines y placas. Es habitual encontrárselo en combinación con granitos grises.

### 6. 3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Es importante conocer las características técnicas de la roca para saber cómo y cuándo hay que utilizarla y cuáles pueden ser las consecuencias de un mal empleo:

#### **Características**

---

Peso específico	2,53 gr/cm <sup>3</sup>
Coeficiente de absorción	0,67 %
Resistencia a la compresión	1080Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la flexión	11 Kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia a la abrasión	20,00 mm
Módulo de heladicidad	0,02 %
Resistencia al deslizamiento en húmedo	62 USRV

---

## 7. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 7.1. CARACTERIZACIÓN PETROLÓGICA DE LA MUESTRA

La roca Rojo Sayago es petrológicamente una episienita. Las episienitas son rocas plutónicas alcalinas, resultado de la alteración hidrotermal de granitoides. Dicha alteración consiste en el movimiento y reubicación de la sílice. Los granitos, en este caso, son hercínicos. Normalmente afloran rodeadas de rocas básicas e intermedias. El Rojo Sayago es una roca de color rojizo, consecuencia de la inclusión de hierro, de grano grueso y textura porfídica (grandes cristales de feldespato potásico). Su estudio al microscopio nos permite analizar con mayor detalle los minerales de los que está formada así como las alteraciones y deformaciones que tengan.

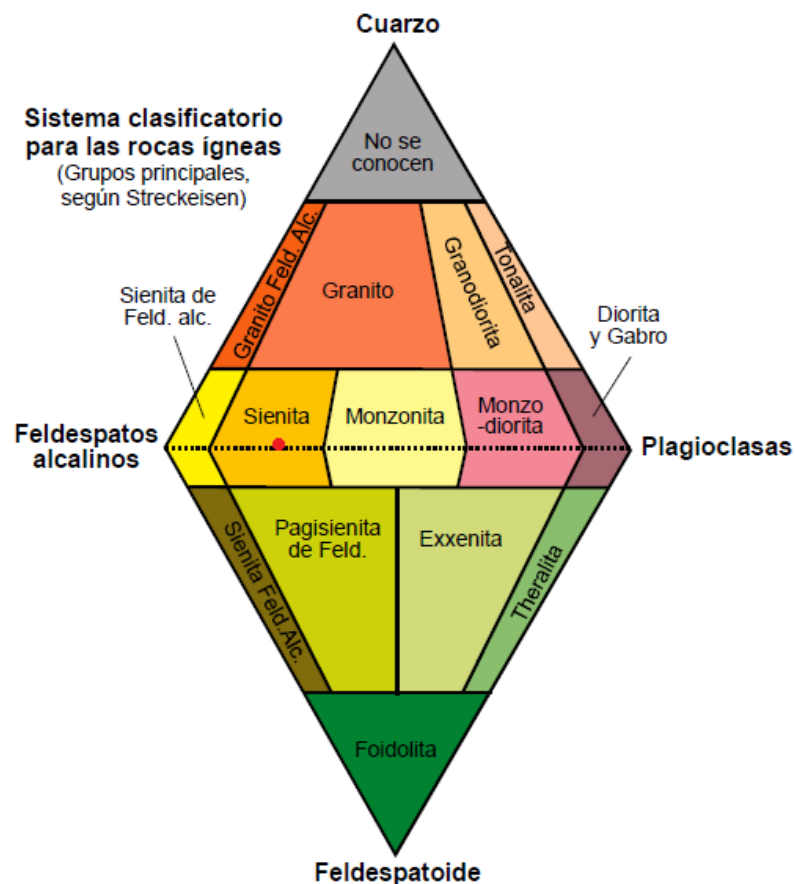


Figura 13. Clasificación de las episienitas según Streckeisen (1978)

Para el estudio petrológico de nuestra roca utilizamos dos láminas delgadas que examinamos al microscopio. Los minerales de mayor tamaño observados son feldespatos ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y plagioclasas  $(\text{Na,Ca})(\text{Si, Al})_3\text{O}_8$ , de aproximadamente 1-2 mm, muchos de ellos fracturados y deformados. En algunas de las plagioclasas se pueden distinguir maclas. Esta deformación y fracturación son evidencias del proceso de alteración sufrido por la roca. Constituyen los minerales principales, junto con la biotita  $(\text{Mg,Fe}^{2+})_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$

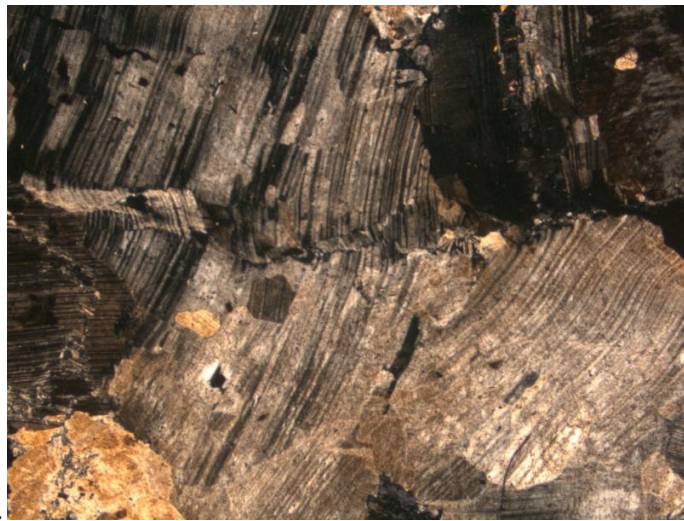


Figura 14. Plagioclasas fracturadas y deformadas

Los minerales secundarios que podemos encontrar son clorita  $((\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6)$  y carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ) producto del proceso hidrotermal padecido por la roca. La clorita es producto de la alteración de la biotita. En algunas de las fracturas podemos observar perfectamente la alteración de biotita a clorita junto con circones ( $\text{ZrSiO}_4$ ) y minerales opacos asociados. Los circones normalmente aparecen asociados a los filosilicatos.



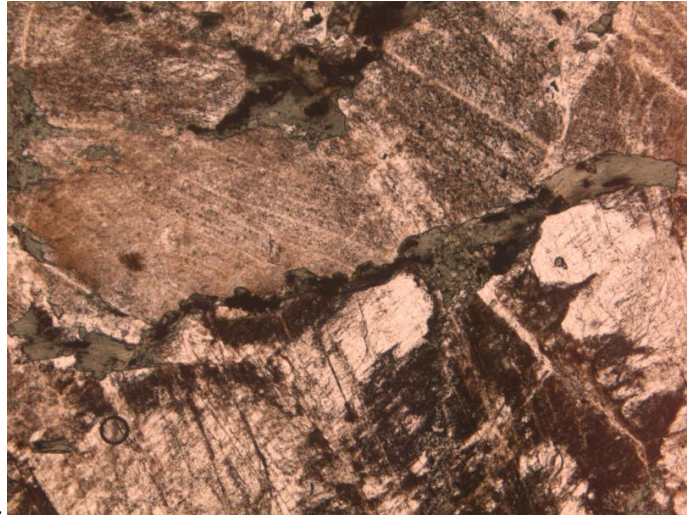


Figura 15. Biotita alterada a clorita con minerales opacos

Los circones son minerales radiactivos, ya que pueden contener impurezas con un pequeño porcentaje de óxido de Uranio ( $U_3O_8$ ). Algunos presentan un color pardo consecuencia de la irradiación que desprenden. Los minerales opacos probablemente son minerales radiactivos como monacita, pechblenda, gumita...

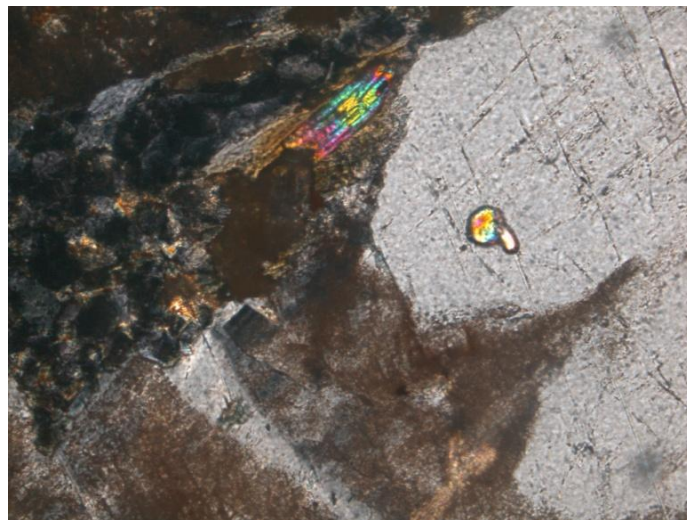


Figura 16. Circón

Como minerales accesorios encontramos moscovitas de pequeño tamaño, muchas de ellas en los feldespatos y plagioclasas.



## 7. 2. ANÁLISIS QUÍMICO

Los datos del análisis químico se obtuvieron de otros trabajos anteriormente realizados (*Manteca Martínez, M., 2011*) Este análisis fue ejecutado mediante la técnica de Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).

Es un procedimiento altamente sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón (Ar) a concentraciones muy bajas. La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de argón. Se basa en el acoplamiento de un método para generar iones (plasma acoplado inductivamente) y un método para separar y detectar iones (espectrómetro de masas)

Las ventajas principales de esta técnica radican en la alta precisión, bajos límites de detección y bajo coste económico.

### 7.3. CALIBRADO DE LOS CONTENEDORES

Antes de medir las muestras que vamos a estudiar es preciso calibrar los contenedores y comprobar si existe alguna fuga en ellos (pérdida de radón).

Para ello utilizamos como muestra los escombros de una mina de Uranio molidos y tamizados hasta alcanzar un tamaño de grano inferior a 1 mm. Para cada contenedor se utiliza la misma cantidad, 1 kg de muestra, que se deposita en recipientes de plástico.

Introducimos las muestras en los contenedores, los cuales han sido numerados. Dichos contenedores son recipientes metálicos que están homologados para el uso o transporte de sustancias peligrosas. Los contenedores tienen unas válvulas en la parte superior que se conectan al instrumental (ver más abajo) para poder medir el radón del interior de los recipientes. Los cerramos herméticamente y apuntamos el día y la hora a la que lo hemos hecho. Las válvulas deben estar también cerradas.



Figura. 17. Contenedores numerados y etiquetados.

Al día siguiente realizamos la medición. Para medir la concentración de gas radón se usa un equipo con cámara de ionización *Alphaguard 2000 Pro*, de *Genitron*

*Instruments* ® con calibración certificada. La determinación de la concentración de radón es efectuada a partir del procedimiento establecido por el fabricante del equipo (*Gonçalves et al (2006)*). Este equipo está conectado a una bomba *Alphapump*, con un caudal controlado de 1 l/min, gracias a la cual se extrae el radón del contenedor. Estos aparatos están conectados entre sí y además se encuentran enganchados a las válvulas del contenedor mediante unos tubos de plástico. El circuito funciona de tal forma que al abrir las válvulas, el radón sale ayudado por la bomba *Alphapump*; una vez la cámara de ionización lo mide, éste vuelve al contenedor. Es un circuito cerrado, no se pierde radón mientras se toman las medidas. Mantenemos el equipo conectado a cada recipiente metálico 15 minutos con las válvulas abiertas. Transcurrido este tiempo, se cierran las válvulas y la cámara de ionización se saca al exterior durante 5 minutos para que se descontamine. Después se conecta a otro contenedor y se repite el mismo proceso. Así con todos los recipientes metálicos que tengamos.



Figura. 18. Medición de cada contenedor con el equipo *Alphaguard 2000 Pro*

El equipo con cámara de ionización *Alphaguard 2000 Pro* al encenderse, emite un código de referencia, que se corresponde con el fichero en el que se guardan los datos de la medida obtenida. Más tarde, desde el ordenador, se abre dicho fichero con el

programa DataExpert. El equipo permanece encendido durante la medición de todos los contenedores, registrándose todas las medidas en un único fichero.

El programa DataExpert registra las medidas tomadas de cada contenedor en unas gráficas que relacionan  $\text{KBq/m}^3$  con el tiempo. En cada gráfica se deben ajustar los ejes  $x$  e  $y$  para obtener la media del radón que emana de la muestra en cada recipiente metálico.

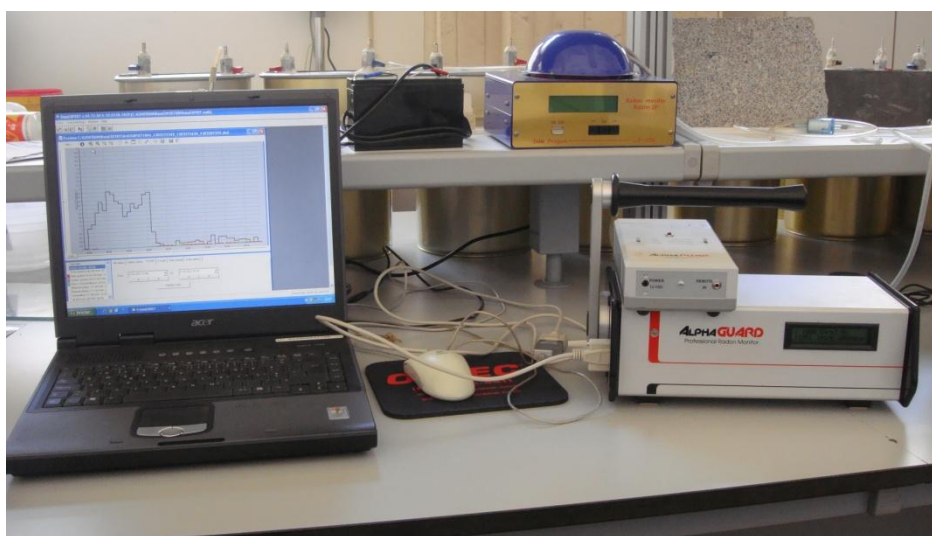


Figura. 19. Registro en el ordenador de los datos obtenidos.

Al ser réplicas de una misma muestra, los resultados de cada contenedor deben ser los mismos o muy similares. Con todos los datos obtenidos calculamos la media y la desviación estándar, y con ambas, el coeficiente de varianza, que informa de si existe o no fuga en los contenedores:

- |                                  |   |                                 |
|----------------------------------|---|---------------------------------|
| Coeficiente de varianza $> 20\%$ | → | Existe fuga en los contenedores |
| Coeficiente de varianza $< 20\%$ | → | No hay pérdidas de radón        |

#### 7.4. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA ROJO SAYAGO

La muestra utilizada en el comienzo del estudio es compacta (Fig. 20). En ese estado se pesa y se introduce en un contenedor homologado durante, al menos, 12 días. Después, se toman medidas usando un Alphaguard (ver protocolo). Recogidos los datos de la primera medición, procedemos a romper la muestra con un martillo en fragmentos de un tamaño relativamente grande (aproximadamente 5-6 cm; Fig. 21) colocándolos en un recipiente y metiéndolos de nuevos en el contenedor repitiendo los pasos anteriores (Fig. 22). Cogidas las mediciones, molem la muestra tamizando hasta llegar a un tamaño de grano menor de 4mm (Fig. 23, Fig. 24) repitiendo el proceso. Finalmente, volvemos a moler hasta que el tamaño de grano es inferior a 1mm. Una vez realizadas todas las mediciones, comparamos resultados.



Figura 20. Placa Rojo Sayago



Figura 21. Fraccionamiento de la placa con ayuda de martillo





Figura 22. Introducción de la muestra en el contenedor homologado.



Figura 23. Tamizado  $< 4\text{mm}$  de la muestra.



Figura 24. Muestra con un tamaño  $< 4\text{mm}$

## 7.5. PROTOCOLO PARA LA MEDIDA DE LA TASA DE EXHALACIÓN DEL RADÓN EN MATERIALES GEOLÓGICOS Y DE CONSTRUCCIÓN

### 1. Preparación de la muestra

En los estudios que utilizan material molido se usa una parte del mismo que se deposita en un recipiente de plástico. Para calcular el volumen depositado se aplica la fórmula  $V = Ah$ , donde  $A$  = área de exposición y  $h$ = altura que ocupa la muestra. El área de exposición se calcula aplicando  $A = \pi r^2$ . En nuestro caso el recipiente, de forma circular, tiene un diámetro interno de 17 cm de modo que el área de exposición es  $227 \text{ cm}^2$ .

Tratándose de una muestra compacta, se utiliza sin realizar alteraciones. De la misma forma que antes, hay que calcular su área y volumen a través de las fórmulas apropiadas (deben usarse materiales preferentemente de formas regulares, y si no, mejor moler la muestra hasta un tamaño de grano inferior a los 5 mm).

### 2. Colocación en el contenedor (inicio del ensayo)

La muestra, en placa o molida, se introduce en el contenedor y éste se cierra, verificando que queda bien sellado y que las válvulas se encuentran en la posición “off”. Existen dos tipos de contenedores, los de mayor tamaño tienen un volumen de 12,7 l y los pequeños de 5,7 l.

En la ficha del contenedor se anotan la fecha y la hora a la que se cierra éste, así como el nombre de la muestra que está en su interior.

Si midiéramos la concentración nada más cerrar obtendríamos el valor del gas radón que hay en el ambiente que ha quedado aprisionado en el interior del contenedor, que nada tiene que ver con el de la muestra. Esta concentración ( $C_0$ ) se corresponde con la del aire exterior y se denomina concentración inicial o “background”.

Existen dos tubos que unen el contenedor y el equipo de medida (“Alphaguard” o AG). El movimiento del aire dentro y fuera del contenedor se regula con dos válvulas. Para realizar la medición hay que respetar la polaridad de estas válvulas; la apertura de la válvula de color rojo permite que el flujo de aire salga del contenedor (posición “IN” en el equipo de medida), mientras que la válvula de color azul se utiliza para devolver el aire al interior del contenedor (posición “OUT” del equipo). Hay que verificar que las válvulas están en la posición “OFF” al terminar la medición.

Para monitorizar la evolución de las concentraciones de radón se usa el programa DataExpert (fig. 25 y 26)

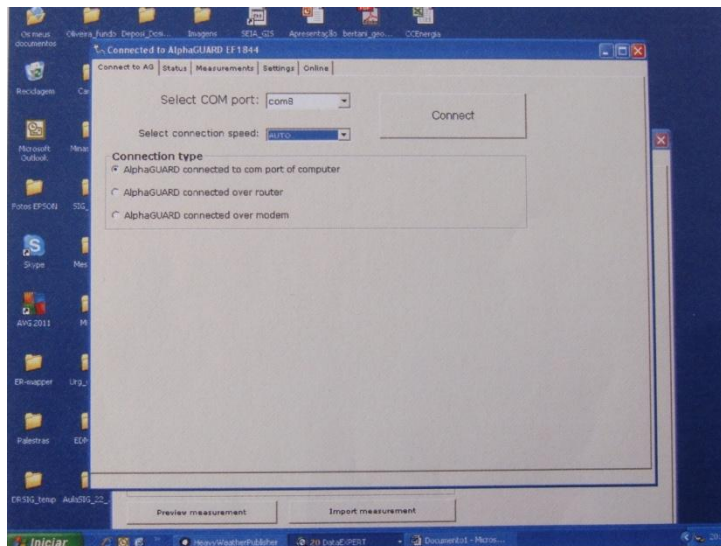


Figura. 25. Conexión del Alphaguard a través del programa DataExpert.



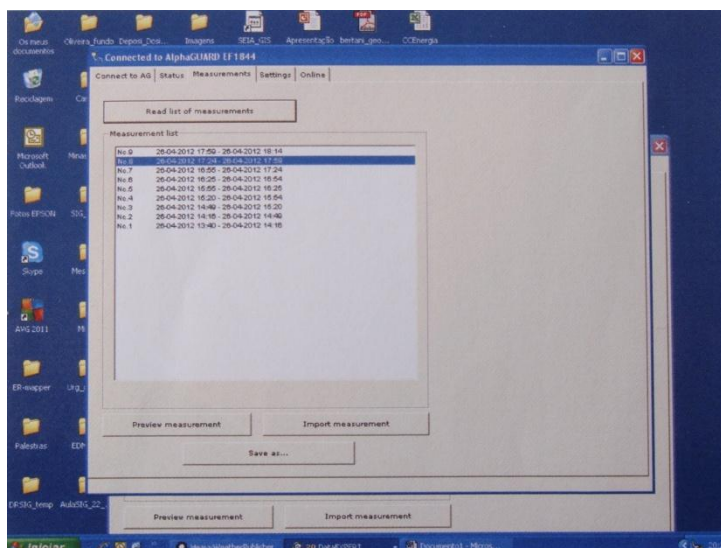


Figura. 26. Ficheros almacenados en el equipo Alphaguard.

### 3. Medición de la concentración acumulada de gas radón

Transcurrido el intervalo de tiempo apropiado, entre 10 y 12 días, se procede a medir la concentración acumulada en el interior del contenedor durante ese periodo. Esta medición debe realizarse con el equipo AG según el siguiente procedimiento:

- a) Medir la concentración de radón del aire exterior durante 10 minutos.
- b) Después de ese tiempo se apaga la bomba y se determinan los parámetros estadísticos, con las herramientas disponibles en programa DataExpert y teniendo en cuenta la medida de la concentración inicial del aparato ( $C_0$ ) o background (ver más arriba).
- c) Para determinar la media de los valores correspondientes al aire exterior o “background” (en la figura 27, conjunto de valores a la izquierda del espectro representado) se selecciona la herramienta “i” (marcada con una flecha en la Fig. 28), y seguidamente la pestaña “X-scale” (señalada en la misma figura); en este último caso se alteran las coordenadas XX para seleccionar sólo la media de los valores representados en el espectro.

- d) Se selecciona “Change axis” (Fig. 29) y después “visible values”, obteniendo un valor medio, un máximo y un mínimo concerniente al conjunto de valores anteriormente seleccionados (Fig.30)
- e) Finalmente, se toma nota del límite superior del intervalo de tiempo correspondiente a los valores previos seleccionados, es decir, del momento en el que la bomba se apaga.

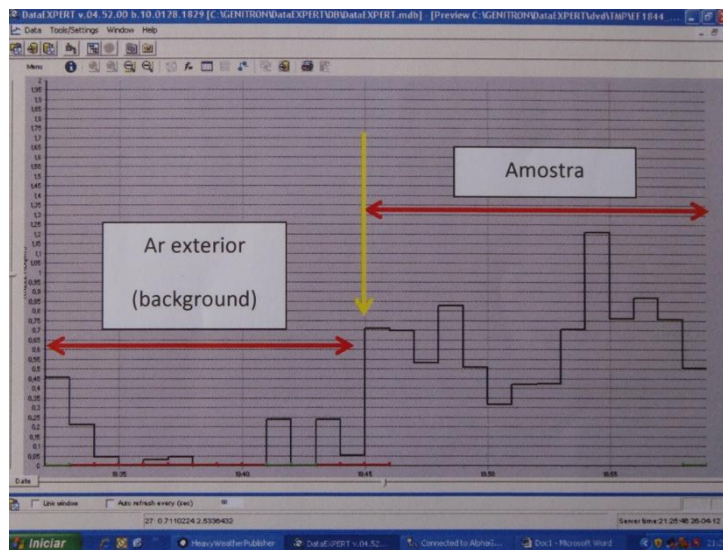


Figura. 27. Ejemplo del espectro obtenido del aire exterior y del interior del contenedor (la flecha amarilla designa la hora en la que se produce la transferencia en el Alphaguard)

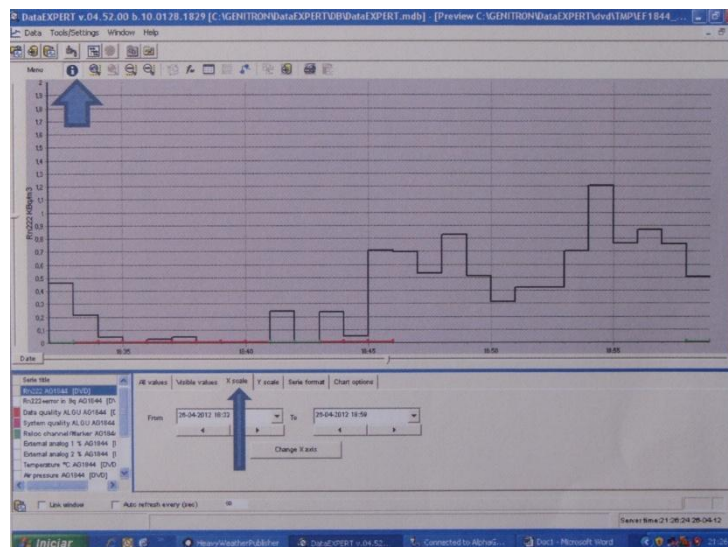


Figura. 28. Selección de la parte izquierda del espectro (aire exterior) – Paso 1

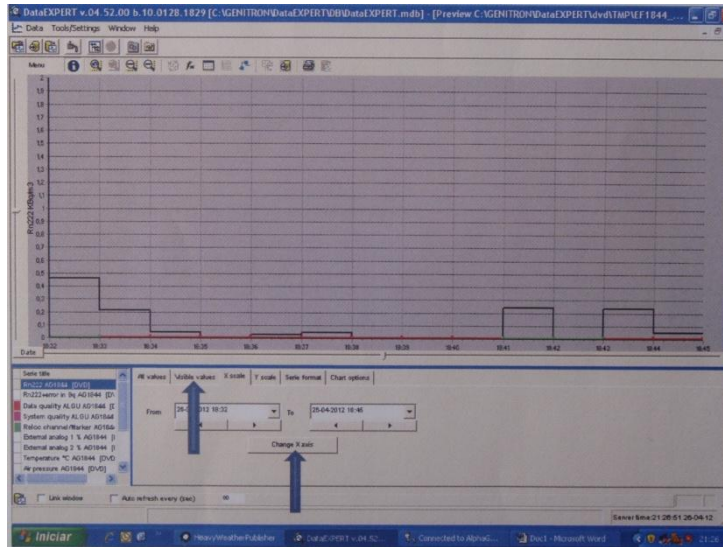


Figura. 29. Idem, paso 2.

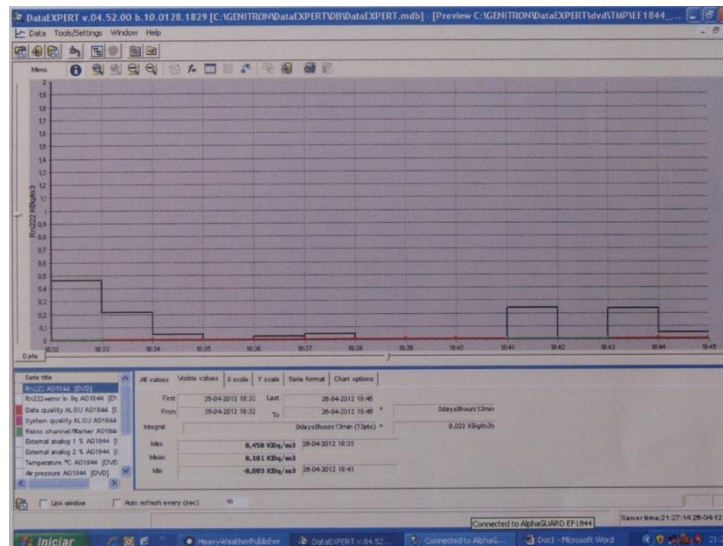


Figura. 30. Parámetros estadísticos relativos al conjunto de valores concernientes a la parte del espectro con los valores más bajos (aire exterior).

- f) Seguidamente se mide la concentración en el interior del contenedor como se indica en el apartado 2 durante un periodo de 15 minutos.
- g) Después se coloca la bomba en la posición “stop” para calcular la concentración media del interior del contenedor seleccionando los valores de concentración medidos después de la hora anotada en el apartado e) (Fig. 31).
- h) Se toma nota también de los valores mínimo y máximo.

- i) A la media de los valores extremos anteriores se le resta el valor medio obtenido en el apartado e). Este será el valor real resultante de exhalación de gas a partir de la muestra.
- j) En el caso de que esta diferencia sea negativa o muy próxima, menor al 15%, conviene repetir la medición tras la descontaminación completa del equipo Alphaguard (por lo menos 3 horas de espera).
- k) Para medir una nueva muestra se apaga el AG y se realizan nuevamente los pasos uno a uno.



Figura. 31. Realizar los mismos pasos para los valores de concentración obtenidos en el interior del contenedor.

#### 4. Cálculo de la tasa de exhalación

Para el cálculo del radón se utiliza la siguiente fórmula:

$$C = C_0 \times \exp(-\lambda t) + E [ 1 - \exp(-\lambda t) ] \times \lambda t$$

en la cual el primer término de la suma indica la concentración de radón inicial, es decir, el no exhalado por la muestra y que va disminuyendo según pasa el tiempo; el segundo término es el radón producido por la propia muestra (“ingrown”).

En una forma más simple:

$$C = E \times (\lambda V)^{-1}$$

ó

$$E = C \times \lambda \times V$$

en las cuales:

C: Concentración de gas radón en Bq/m<sup>3</sup> en el tiempo de la medición (t(h))

C<sub>0</sub>: Concentración inicial (Bq/m<sup>3</sup>) en t = 0

E: Tasa de exhalación (Bq/h)

λ: Tasa de decaimiento del gas radón (h)

Se asume que el contenedor está completamente sellado durante el intervalo de tiempo de la medición y el efecto de “back diffusion” no es significativo. Una manera indirecta de valorar este último efecto es calcular la relación entre el volumen libre del contenedor y el volumen de la muestra. El coeficiente de emanación puede también servir como estimador ya que cuanto menor sea el valor de este dato, menor será la probabilidad de que el factor “back diffusion” tenga significado.

De modo que la tasa de exhalación E se expresa en las unidades Bq/h o Bq/kg/h en el caso de dividir por la masa, o Bq/m<sup>2</sup>/h, si es por el área.

Para los cálculos se utiliza una hoja de cálculo en Excel, desarrollada para ello, compuesta por tres partes. La primera parte (Rn222), sirve para hacer una estimación de la concentración del gas radón en equilibrio teniendo en cuenta la contaminación inicial. Las distintas variables son: la concentración de gas radón al inicio y al final del ensayo,

el día y la hora del comienzo y terminación del estudio y, algunos datos opcionales como temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica al final del ensayo (toda esta información se encuentra disponible en el Alphaguard)

Los valores de concentración son automáticamente utilizados para calcular la tasa de exhalación del radón en peso y en área, por hora o por segundo, en las otras hojas de Excel. Las variables de estas dos hojas, además de la concentración del gas radón son: el volumen de la muestra, el volumen del contenedor, la masa de la muestra y el área de exposición.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se ha efectuado mediante un ICP – MS, en el Servicio de Análisis Químico de la Universidad de Salamanca definiendo así todos los elementos mayores y trazas.

Los *elementos mayores* son aquellos componentes químicos de una roca cuya proporción en la misma normalmente supera el 1%. Su concentración se expresa en tanto por ciento en peso de los óxidos correspondientes, y su suma debe ser próxima a 100. Los elementos mayores analizados en la roca Rojo Sayago son los siguientes:

<b>Elementos mayores</b>	<b>Rojo Sayago (%)</b>	<b>Corteza terrestre (%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,32	15,2
CaO	1,06	4,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,05	*
K <sub>2</sub> O	7,18	3,4
MgO	1,48	2,2
MnO	0,04	0,1
Na <sub>2</sub> O	6,05	3,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,31	*
SiO <sub>2</sub>	66,14	66,0
TiO <sub>2</sub>	0,32	0,5
M.V.	2,43	*

Tabla 3. Porcentaje de cada uno de los elementos mayores en la roca Rojo Sayago y en la corteza terrestre según *S.R. Taylor y S.M. McLennan (1985)*. M.V. material volátil. \* No se encontraron.

## Elementos mayores

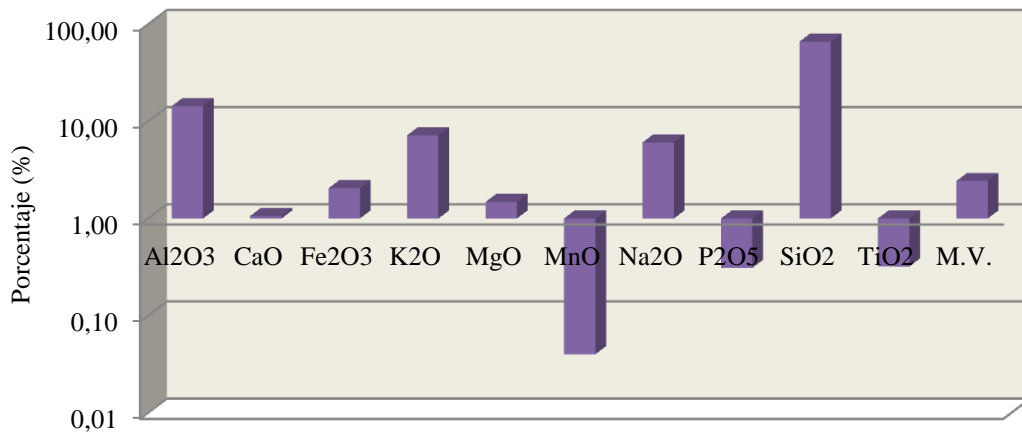


Figura.32. Representación gráfica del porcentaje de cada uno de los elementos mayores en la roca Rojo Sayago.

Con los mayores porcentajes encontramos la sílice (SiO<sub>2</sub>), que es superior al 60%, ya que es una roca granítica, y el aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con un porcentaje casi del 15% (Tabla 3, Fig. 32). Ambos son los elementos más abundantes.

Comparando los resultados con los valores promedios de la corteza (Tabla 3), vemos si hay diferencias significativas o por el contrario, se encuentran dentro de lo normal establecido.



## Elementos mayores

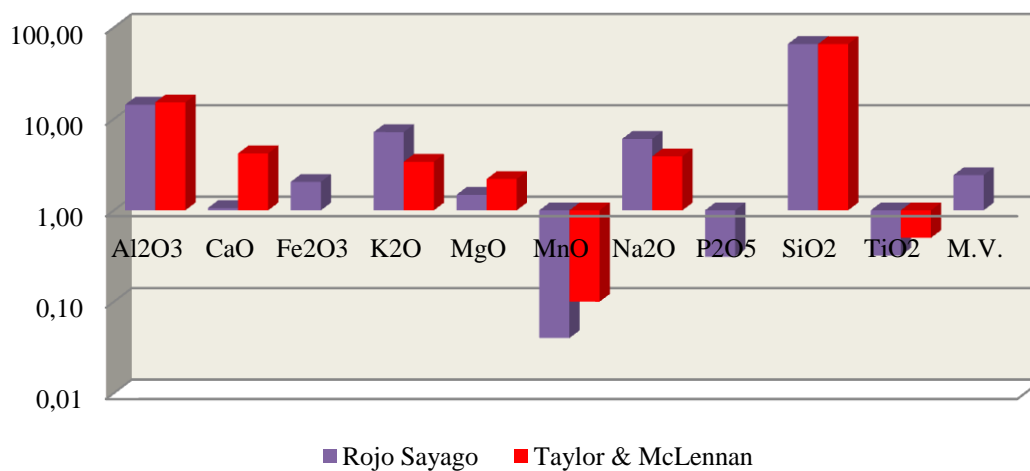


Figura. 33. Representación gráfica de los porcentajes de los elementos mayores del Rojo Sayago con respecto a los valores promedio de la corteza (*Taylor & McLennan, 1985*)

La mayor diferencia que encontramos entre la composición del Rojo Sayago y la corteza terrestre es el  $K_2O$ , que tiene un porcentaje mucho mayor en el Rojo Sayago (Fig. 33).

Un *elemento traza* se define como un elemento que está presente en una roca en concentraciones menores al 0.1% (1000 ppm). La mayoría de los elementos traza si bien no forman especies minerales por sí solos, son capaces de sustituir a los elementos mayores en los minerales formadores de roca. Los elementos traza son importantes en estudios petrológicos ya que son mejores discriminantes entre procesos petrológicos que los elementos mayores.

<b>Elementos traza</b>	<b>Rojo Sayago (ppm)</b>	<b>Corteza terrestre (ppm)</b>
As	*	1,5
Ba	402	550
Be	237	3,0
Cd	*	98
Co	27	10
Cr	30	35
Cu	*	25
Li	25	20
Nb	17	25
Ni	25	20
Pb	65	20
S	*	*
Se	*	50
Sr	154	350
Th	21,2	10,7
U	4,3	2,8
V	36	60
Zn	97	71

Tabla 4. Concentración (ppm) de cada uno de los elementos traza en la roca Rojo Sayago y en la corteza terrestre según *S.R. Taylor y S.M. McLennan (1985)*.

\* No se encontraron

## Elementos traza

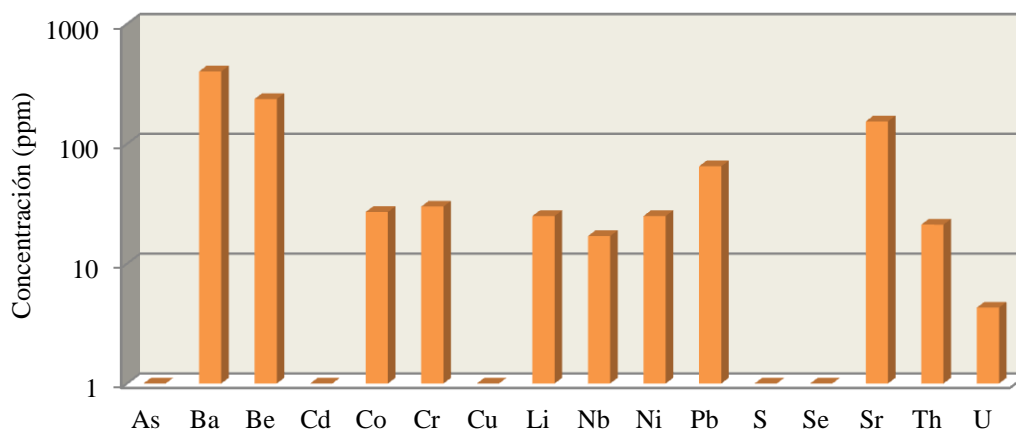


Figura. 34. Representación gráfica de la concentración (ppm) de cada uno de los elementos traza encontrados en la roca Rojo Sayago.

Los elementos traza con mayores porcentajes son el Bario (Ba), con el casi 0,5% y el Berilio (Be) con el 0,23% (Tabla 4, Fig. 34).

Hacemos una comparación de los elementos traza de nuestra muestra y el valor promedio de dichos elementos en la corteza terrestre según *S.R. Taylor y S.M. McLennan (1985)*

## Elementos traza

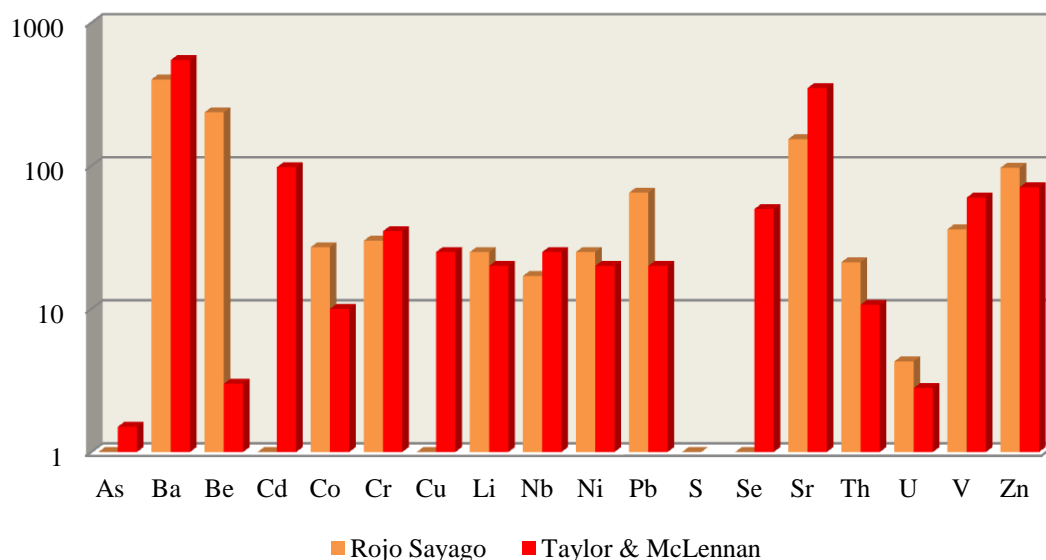


Figura. 35. Representación gráfica de la concentración de los elementos traza del Rojo Sayago y los valores promedio de la corteza terrestre según *S.R. Taylor y S.M. McLennan (1985)*

Los elementos con las mayores diferencias que se pueden observar entre la corteza y el Rojo Sayago son: el Bario (Ba), con 148 ppm de diferencia mayor en la corteza que en Rojo Sayago; el Berilio (Be), con 234 ppm menor en la corteza; el Cadmio (Cd), que no aparece en el Rojo Sayago y sin embargo sí en la corteza; y el Estroncio (Sr), con 146 ppm menos en la muestra que en la corteza.

Dado que no existe una correlación entre la mayoría de los elementos mayores y los elementos traza con la Exhalación de Radón (Rn) presente en la roca (Ver proyecto *Manteca Álvarez, M. 2011*), empleamos sólo los elementos Torio (Th), Uranio (U) y Potasio ( $K_2O$ ) para obtener nuestros resultados de radioactividad, cuyos límites de detección están resumidos en la Tabla 5.

<b>Elemento</b>	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)
<b>Límite de detección</b>	0,5	0,5	0,1

Tabla 5. Límites de detección de los elementos analizados

Los resultados obtenidos del análisis químico realizado están resumidos en la Tabla 6 y Figura 36. Podemos destacar el alto porcentaje de  $K_2O$ , que se encuentra por encima del 7%. El Uranio (U) también tiene un valor bastante elevado en nuestra muestra Rojo Sayago y el Torio (Th) supera los 21 ppm, muy por encima del límite de detección.

	<b>Th (ppm)</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>
<b>Rojo Sayago</b>	21,2	4,3	7,18
<b>Corteza terrestre</b>	10,7	2,8	3,4

Tabla 6. Resultados obtenidos del análisis químico para los elementos

Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K).

## Análisis químico

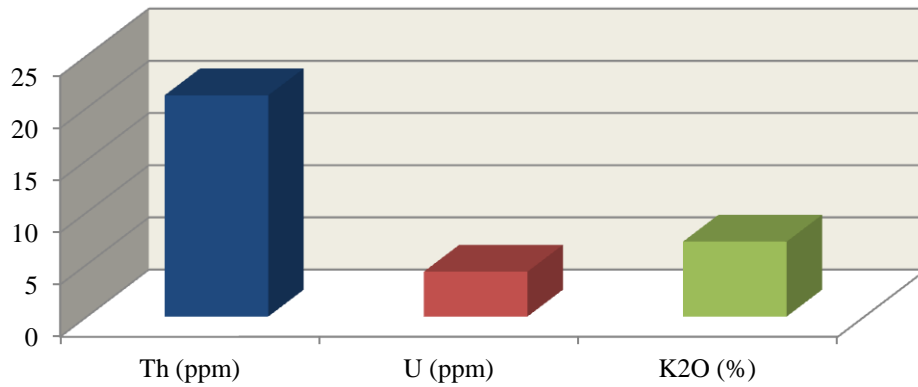


Figura. 36. Representación gráfica de los resultados obtenidos del análisis químico para los elementos Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K).

Los elementos Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K) doblan prácticamente sus proporciones en el Rojo Sayago en comparación con los valores medios existentes en la corteza según *S.R. Taylor y S.M. McLennan (1985)* (Tabla 6, Fig. 37).

## Análisis químico

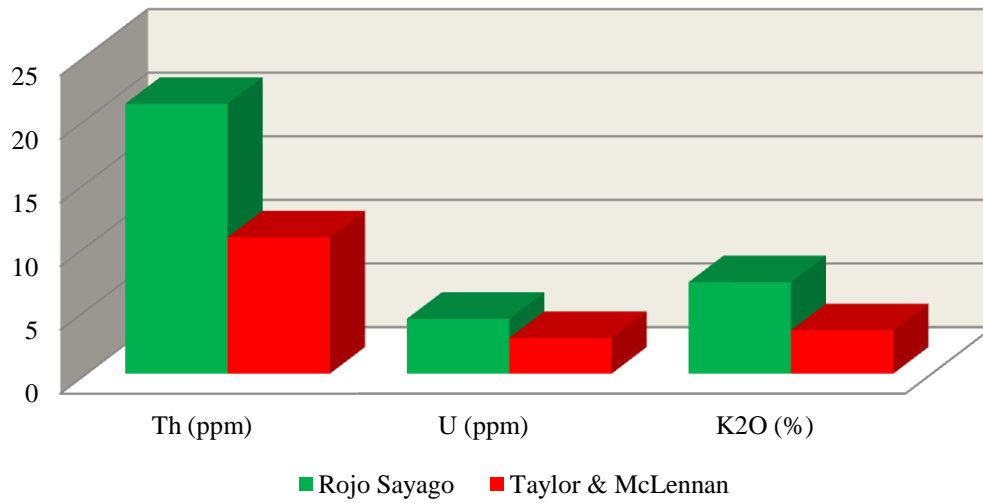


Figura. 37. Comparación de los elementos Torio (Th), Uranio (U) y Potasio (K) del Rojo Sayago con respecto a los valores promedio de la corteza (*Taylor & McLennan, 1985*)

## 8.2. EXHALACIÓN DE RADÓN

Para la realización de este ensayo se utilizó una única muestra que se fue transformando según se iba haciendo el estudio y se recogían los datos, pasando a estar molida cuando en un principio era una roca compacta (ver 7.3. Preparación de la muestra). En cada condición se utilizó el mismo protocolo (ver 7.5. Protocolo). Los resultados de la tasa de exhalación utilizando muestras de distinto tamaño se recogen en la tabla siguiente:

<b>Muestra</b>	<b>Rojo Sayago placa</b>	<b>Rojo Sayago pedazos</b>	<b>Rojo Sayago &lt;4mm</b>	<b>Rojo Sayago &lt;1mm</b>
<b>Fecha (hora) inicio</b>	5/4/12 (11:00)	30/4/12 (11:00)	23/5/12 (15:00)	5/6/12 (11:30)
<b>Fecha (hora) final</b>	27/4/12 (17:45)	16/5/12 (14:13)	4/6/12 (14:52)	20/6/12 (12:55)
<b>T<sub>1</sub> (horas)</b>	535	387	288	361
<b>T<sub>2</sub> (días)</b>	22	16	12	15
<b>C<sub>0</sub></b>	166	86	137	87
<b>Media (C)</b>	4251	4124	3546	3438
<b>Ceq</b>	0,98	0,95	0,89	0,93
<b>Estimativa (E)</b>	4324	4354	3986	3673

Tabla 7. Resultados de la tasa de exhalación de la muestra en diferentes estados. T<sub>1</sub>, tiempo en horas; T<sub>2</sub>, Tiempo en días; C<sub>0</sub>, concentración inicial de radón; Media (C), concentración media; Ceq, porcentaje de concentración de gas radón en el tiempo medido; Estimativa (E), tasa de exhalación.

Los datos como temperatura ambiente, humedad y presión atmosférica son opcionales y en estos ensayos no se han tenido en cuenta porque no alteraban el resultado final.



Para obtener los resultados de la tasa de exhalación (Tabla 7), se ha realizado la siguiente operación (ver 7.5. Protocolo, punto 4):

$$E = C \times C_{eq}^{-1} - C_0 \times \text{EXP}(-0,00755 \times T)$$

En la cual:

E: Tasa de exhalación (Bq/h)

C: Concentración de gas radón en Bq/m<sup>3</sup> en el tiempo de la medición (t(h))

Ceq: Porcentaje de concentración de gas radón en el tiempo medido.

$$C_{eq} = 1 - \text{EXP}(-0,00755 * T)$$

C<sub>0</sub>: Concentración inicial (Bq/m<sup>3</sup>) en t = 0

T: Tiempo que ha estado la muestra en el contenedor (h)

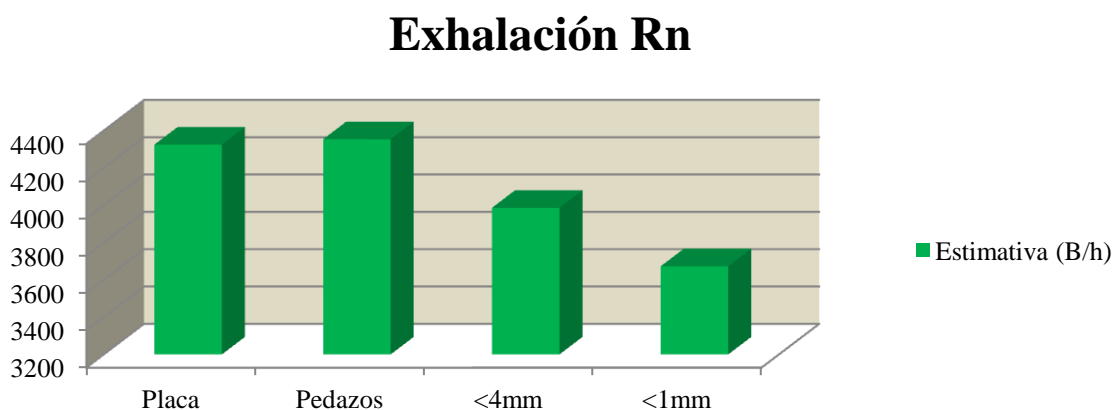


Figura. 38. Tasa de exhalación en los diferentes estados del Rojo Sayago.

Se pueden observar pequeñas diferencias entre los distintos estados de la roca. La mayor tasa de exhalación de la muestra es en pedazos con 4354 Bq/h, mientras que la menor es cuando los granos de nuestro Rojo Sayago son <1mm, 3673 Bq/h. Sin embargo, son diferencias pequeñas y podrían ser debidas a la contaminación exterior o algún fallo en el aparato al realizar la medición.

No se calculó la exhalación de Radón (Rn) en peso ni en aire por la complicación que suponía calcular el área y volumen de la muestra en pedazos.

### 8.3. MEDICIÓN AMBIENTAL (ESCINTILÓMETRO)

Con el espectrómetro portátil de rayos gamma (Fig. 39) y tomando como modelo la roca que forma parte del muestrario de rocas que se encuentra en la 1ª planta del pasillo de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca, hemos obtenido los datos de la Tabla 9. El espectrómetro detecta la radiación gamma que emiten las rocas, y da el valor de energía de radiación gamma característica de cada elemento según un límite de detección dependiendo de cada radionucleido (Tabla 8).

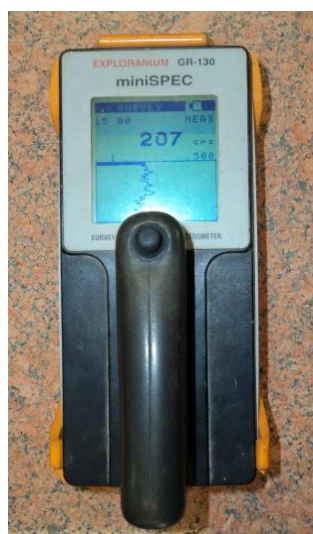


Figura 39. Surveying Gamma Ray Spectrometer (Escintilómetro) (M. Manteca, 2011)

Elemento	Th (MeV)	U (MeV)	K (MeV)
<b>Límite de detección</b>	2,6	1,76	1,46

Tabla 8. Límite de detección de los radionucleidos.

	<b>INTERIOR (count per second)</b>			<b>EXTERIOR (count per second)</b>		
	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>
<b>Rojo Sayago</b>	2,9	5,6	12,1	4,5	9,63	16,1
	215			343		

Tabla 9. Valores de radiación gamma y radionucleidos

De este modo obtenemos los valores de Potasio (K<sub>2</sub>O), Torio (Th), Uranio (U) y la radiación gamma que procede de la roca de estudio. Los valores de la tabla son medias de tres valores tomados dejando un periodo de separación entre ellas de 1 minuto y 40 segundos. La medición fue hecha en el interior y exterior del edificio para ver su variación.

De todas formas, esta técnica es poco representativa y eficaz ya que se debería tomar los datos “in situ” y exagera los valores de Uranio (observación realizada en previos trabajos donde se vio que comparando los análisis químicos y de campo existía un error). Se obtuvo un factor empírico experimental para aproximar el valor a la realidad, dicho factor es 1,5.

	<b>INTERIOR (count per second)</b>			<b>EXTERIOR (count per second)</b>		
	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>	<b>K<sub>2</sub>O (%)</b>	<b>U (ppm)</b>	<b>Th (ppm)</b>
<b>Rojo Sayago</b>	2,9	5,6/1,5=3,73	12,1	4,5	9,63/1,5=6,42	16,1

Tabla 10. Valores de K, U y Th detectados por el espectrómetro gamma.

Para ser representativa la radiación gamma los valores deben tener una diferencia mayor o igual a 10 cuentas por segundo entre los valores obtenidos para una misma muestra.

	<b>INTERIOR</b> <b>(count per second)</b>	<b>EXTERIOR</b> <b>(count per second)</b>	<b>Diferencia &gt; 10 c/s</b>
<b>Rojo Sayago</b>	215	343	128

Tabla 11. Valores de radiación gamma cuya diferencia es > 10c/s.

El Rojo Sayago tiene una diferencia entre interior y exterior de 128 c/s, de modo que es un valor a considerar y tener en cuenta.

<b>Principales Elementos Naturales Radiactivos</b>	
<b>Concentración promedio de la corteza</b>	
K (%)	2,8
U (ppm)	2,8
Th (ppm)	10,7

Tabla 12. Concentración promedio de elementos radiactivos en la corteza (Taylor, S.R. y McLennam, S. M. 1985)

Comparando los valores de elementos radiactivos naturales Potasio (K), Uranio (U) y Torio (Th) detectados en Rojo Sayago, vemos que todos sus elementos tienen cifras superiores a la concentración promedio de la corteza (Tablas 10 y 12).

La radiación emitida por la roca y detectada por el espectrómetro es muy poco eficaz y exacta debido a que la muestra se encuentra a muy poca distancia de otras placas que están en el muestrario pudiendo contaminarse la información recogida por el espectrómetro.

#### 8.4. DOSIS ESTIMADA DE ACUERDO AL MÉTODO DE LA NORMA TÉCNICA 112 DE LA UNIÓN EUROPEA

La dosis estimada en diversos ambientes donde se ha utilizado esta roca como material de construcción puede ser determinada según el método propuesto en el documento de la Unión Europea “Protección Radiológica 112”. Al no existir información referente a la actividad del Radón, estimaremos este parámetro con el contenido de uranio de las rocas, asumiendo el equilibrio secular.

Diferentes escenarios pueden ser modelados para una habitación estándar, en función del uso de la roca en suelos, techos y paredes (C1), suelos y paredes (C2), sólo suelo (C3) y materiales superficiales – e.g. rocas en paredes con un espesor inferior a 3 cm (C4), y el valor de dosis (mSv.y<sup>-1</sup>) resultante del uso de los materiales geológicos puede ser determinado.

Un parámetro fue así mismo propuesto en este documento como un indicador del grado de producción de radiación ionizante (I), y es representado en la tabla (Tabla 1). Los valores superiores a 1 indican que la roca debe ser usada con restricciones.

Muestra	Exceso de dosis efectiva (mSv)				Índice (I)
	C1	C2	C3	C4	
Rojo Sayago	1,2	0,8	0,1	-0,1	1,24

Tabla 13. Valores de Exceso de dosis efectiva (mSv) e Índice I de la roca Rojo Sayago.

Del análisis de la tabla podemos observar que el Rojo Sayago, que es una roca granítica, supera el máximo de dosis límite de 1 mSv por año recomendado por la UE en el escenario C1, de modo que no es recomendable el revestimiento total de una

habitación con este tipo de roca ornamental. No lo supera en el resto de escenarios C2, C3 y C4, siendo la contribución de Radón en éste último no representativa por sus valores  $<1$ . La radiación ionizante (I) supera el límite permitido siendo su valor 1,24 por lo que su uso en construcción queda restringido. Su empleo es aconsejable en revestimientos de exterior, sin embargo, en revestimientos de interior deberá ser intercalada con otro tipo de roca recomendando una mayor ventilación para evitar la concentración y exposición de Radón.

En cualquier caso, considerando que los resultados representados aquí (Fig. 40) están basados en un único análisis y en condiciones extremas sin ventilación, consideramos que deben ser llevados a cabo más trabajos con la intención de confirmar los niveles de riesgo asociados a esta roca. Hay que remarcar que la influencia en la salud humana es prácticamente nula porque su uso es mayoritariamente en exterior.

### Dosis efectiva y radiación ionizante

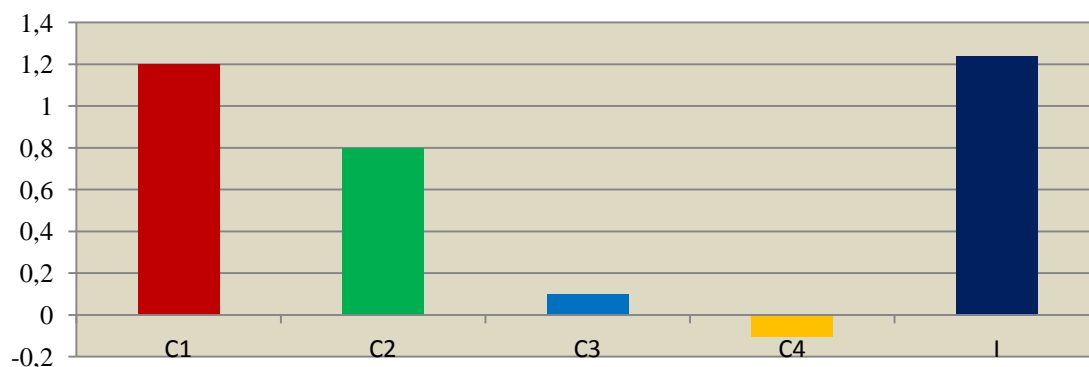


Figura 40. Representación de la dosis efectiva y la radiación ionizante en el Rojo Sayago.

## 9. CONCLUSIONES

El Rojo Sayago es una roca ígnea constituida principalmente por feldespatos potásicos, plagioclasas y biotitas que son minerales silicatados de Aluminio (Al), Sodio (Na) y Potasio (K). La roca ha sufrido una alteración hidrotermal que ha provocado la movilidad de algunos de sus elementos transformándose en una episienita. Esto explica que la concentración de elementos traza como el Bario (Ba), el Berilio (Be) o el Estroncio (Sr), que son elementos móviles, tengan valores muy diferentes a los valores promedio de la corteza terrestre (ver 8.1. Análisis químico). Los elementos radiactivos, como el Torio (Th) y el Uranio (U), se encuentran principalmente en los minerales accesorios de esta roca, como los circones y los opacos (monacita, pechblenda...).

Sin embargo, y a pesar de estar presente en estos minerales accesorios, el contenido de Uranio (U), que es el factor principal que controla la exhalación de Radón, no es muy alto según el análisis químico en relación a la tasa de exhalación emitida por la roca. En la caracterización petrográfica, además, hemos podido observar que la roca muestra fracturas y que en ellas se encuentran la mayor parte de estos circones y minerales opacos. Por este motivo, parece que la cantidad de gas Radón (Rn) emitido por la roca no sólo depende de la cantidad de Uranio (U) que esta tiene, sino que también está determinado por la alteración de la roca y fractura de sus minerales.

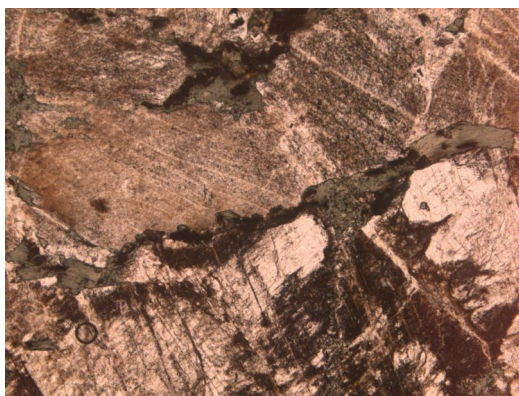


Figura 41. Clorita y minerales opacos en la las fracturas.

En base a los resultados de la tasa de exhalación estudiados en muestras de distintos tamaño de grano, concluimos que esta tasa es la misma con independencia de que la roca se encuentre compacta o en polvo, ya que las diferencias encontradas en la tasa de exhalación de Radón (Rn) entre las muestras no son relevantes. Esto es un resultado muy importante y de gran utilidad para futuros estudios, ya que a partir de ahora se podrá elegir el modo en el que estudiar la muestra, ya sea de forma compacta si tiene una forma regular y por tanto de volumen fácilmente determinable, o en polvo si no la tiene (calculando el área y volumen que ocupe en el recipiente que la contenga). De este modo será más fácil calcular el área y volumen en cualquier estado del material original para poder ser utilizado después al medir la tasa de exhalación.

Por otro lado, este proyecto ha establecido un nuevo protocolo en el que se ha tenido en cuenta la contaminación exterior. Gracias a la incorporación de esta información, y a pesar de que las imprecisiones del aparato no se pueden controlar, es esperable que los resultados obtenidos sean mucho más precisos que los trabajos previos donde no se incorporaba dicha información (ej., *González Neira, 2008*). De hecho, la comparación de medidas realizadas con este nuevo protocolo sobre muestras anteriormente analizadas resultan en datos más congruentes con la realidad. También es menor el tiempo de espera para obtener dichos resultados y para realizar el ensayo. Por ello, podemos concluir que este nuevo protocolo parece más preciso para estudiar la radiación de los materiales de construcción y también más cómodo.

No obstante, hubiese sido interesante poder utilizar otras técnicas para determinar y confirmar los resultados obtenidos en este proyecto, como por ejemplo, el método “Fission Track”. La datación mediante huellas de fisión (“Fission-Track”) es otro procedimiento basado en la radiactividad, concretamente en la fisión nuclear que experimentan algunos átomos pesados, cuyos núcleos se dividen en dos o más núcleos



de menor tamaño que van acompañados de otros subproductos como neutrones libre, partículas alfa y beta y fotones.

El fundamento de esta técnica radica en la fisión espontánea que se produce en un isótopo de uranio  $U^{238}$  mediante la cual su núcleo se divide en dos núcleos más pequeños que se separan a gran velocidad hasta reducirse a la mitad, produciendo a su paso grandes daños en la estructura del mineral original que contiene el Uranio (U). Se basa por tanto en el contaje, por un lado, de las huellas de fisión  $r$  mediante un microscopio óptico. Por otro, en el cálculo del Uranio (U) presente en la muestra mediante la creación artificial de nuevas huellas de fisión por inducción de la fisión en los átomos de  $U^{238}$  (métodos y técnicas de investigación histórica. Es un método mucho más preciso de cálculo de radiactividad que sirve para calcular la edad de las rocas.

Sin embargo, esta técnica no ha podido ser utilizada en este trabajo debido a su alto coste económico y su poco desarrollo (la Universidad de Cádiz cuenta con el único laboratorio de España capaz de aplicar la técnica “Fission-Track”).

Teniendo en cuenta todos los datos obtenidos del análisis químico, la caracterización petrográfica, la medición ambiental y la tasa de exhalación de la roca Rojo Sayago en muestras con distinto tamaño podemos concluir que:

1. La roca Rojo Sayago ha sufrido una alteración hidrotermal que ha provocado fracturas y transformaciones en los minerales, lo que ha favorecido la expulsión de Radón (Rn) de la roca a pesar de no contener un alto porcentaje de Uranio (U).
2. El estado (tamaño del grano muestral) en el que se encuentre la roca no afecta a la tasa de exhalación de Radón (Rn), de modo que los estudios

pueden realizarse de la forma más cómoda posible teniendo en cuenta como sea la muestra a analizar.

3. La radiación de la roca Rojo Sayago no supone ningún peligro para la salud, al menos si se utiliza en el exterior, ya que los niveles de radiación se encuentran dentro de lo normal establecido, aunque si se utiliza este material en interiores hay que tener algunas consideraciones. De todas formas su uso es mayoritariamente en exterior.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

ANJOS, R.M., VEIGA, R., SOARES, T., SANTOS, A.M.A., AGUIAR, J.G., FRASCÁ, M.H.B.O., BRAGE, J.A.P., UZÊDA, D., MANGIA, L., FACURE, A., MOSQUERA, B., CARVALHO, C., GOMES, P.R.S. (2005): Natural radionuclide distribution in brazilian comercial granites. *Radiation measurements* 39. 245 – 253.

Consejo de Seguridad Nacional, (2010). Dosis de Radiación. SDB-04.07.

EL – HUSSEIN, A. (2004): A study on natural radiation exposure in different realistic living rooms. *J. Environ. Radioactivity* 79, 355 – 367.

FRENZEL, LOUIS L. (2003) : *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Traducción de *Principles of Electronic Communication Systems*, The McGraw-Hill Companies. Ed Alfabara. Mexico.

GARZÓN RUIPÉREZ, L. (1979) *Radiactividad y Medio Ambiente*. Universidad de Oviedo. Servicio PUBL.

GONZALEZ NEILA, C. (2008): *Radiactividad Natural en Materiales de Construcción*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Salamanca.

HIGGY, R.H., EL – TAHAWY, M.S., ABDEL – FATTAH, A.T., AL – AKABAWY, U.A. (2000): Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings. *J. Environ. Radioactivity* 50, 253 – 261.

JAMES, W. D. HOBRO. Academic Research Page Bullard Laboratories, Department of Earth Sciences, University of Cambridge. (<http://bullard.esc.cam.ac.uk/~hobro/>).

JORBA BISBAL, J., ORTEGA ARAMBURU, X. (2010) *Radiaciones ionizantes: utilización y riesgos*. Colección E-POLITEXT, 56. Ediciones UPC, S.L. Barcelona, España.

LEIBAR, I. (2003) *Bioconstrucción: Gas radón*. *Rehabilitar*, Nº 6, 28.

LU, X., ZHANG, X. (2007): Natural radioactivity measurements in rock samples of Cuihua mountain national geological park, China. Oxford Journals.

Mathematics & Physical Sciences & Medicine. Radiation Protection Dosimetry

LLERENA CRISTOBO, J.J (2006). Medición de la concentración de Rn222 en el interior de edificios. Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Físicas.

MANTECA ÁLVAREZ, M. (2011): Caracterización radiológica de las rocas ornamentales de Castilla y León. Proyecto Fin de carrera. Universidad de Salamanca.

NÚÑEZ-LAGOS ROGLÁ, R. (2004): La radiactividad. Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza, N° 59 (Serie 2a), 2004 , págs. 47-60.

PAVLIDOU, S., KORONEOS, A., PAPASTEFANOU, C., CHRISTOFIDES, G.,STOULOS, S., VAVELIDES, M. (2004): Natural radioactivity of granites used as building materials. J. Environ. Radioactivity 89, 48 – 60.

QUINDÓS PONCELA, L. S (1995). Rn un gas radiactivo de origen natural en tu casa. Consejo de seguridad nuclear. Universidad de Cantabria. DL SA. 495-1995, ISBN 84-8102-114-8, Imprenta Juventud

ROGERS, J.J.W., RAGLAND, P.C., (1961): Variation of thorium and uranium in selected granitic rocks. Geochim. Cosmochim. Acta 25, 99 – 109.

SESANA, L., FUMAGALLI, M., CARNEVALE, M., POLA, G., FACCHINI, U., COLOMBO, A., TUNESI, A., DE CAPITANI, L., RUSCONI, R. (2006): Natural radionucleides in the rocks of the Valle del Cervo Pluton in Piedmont. Oxford Journals. Mathematics & Physical Sciences & Medicine. Radiation Protection Dosimetry. Volume 118, Number 3, 337 – 344.

Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León. (2008) SIEMCALSA. La piedra Natural en Castilla y León.

STRANDEN, E., KOLSTAD, A.K. (1984): Radon exhalation from the ground; Method of measurements and preliminary results. *The Science of the Total Environment*, Volume 45, October 1985, 165-17.

TAYLOR, S.R. e Mc LENNAN, S.M. (1985) - The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publ., Oxford, 312p.

TZORTZIS, M., TSERTOS, H., CHRISTOFIDES, S., CHRISTODOULIDES, G. (2003): Gamma radiation measurements and dose rates in commercially – used natural tiling rocks (granites). *J. Environ. Radioactivity* 70, 223 – 235.

UNE-EN 12670:2003. Terminología de piedra natural.

UNSCEAR, 1979. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

UNSCEAR, 1982. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

VENTURI, M. (2010): Vivere e convivere con le radiazioni. COSMOPOLIS, rivista semestrale di cultura - CODICE ISSN: 1828-9231  
(<http://www.cosmopolis.globalist.it/>)

WHITFIELD, J.M., ROGERS, J.J.W., ADAMS, J.A.S. (1959): The relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 17, 248 – 271.