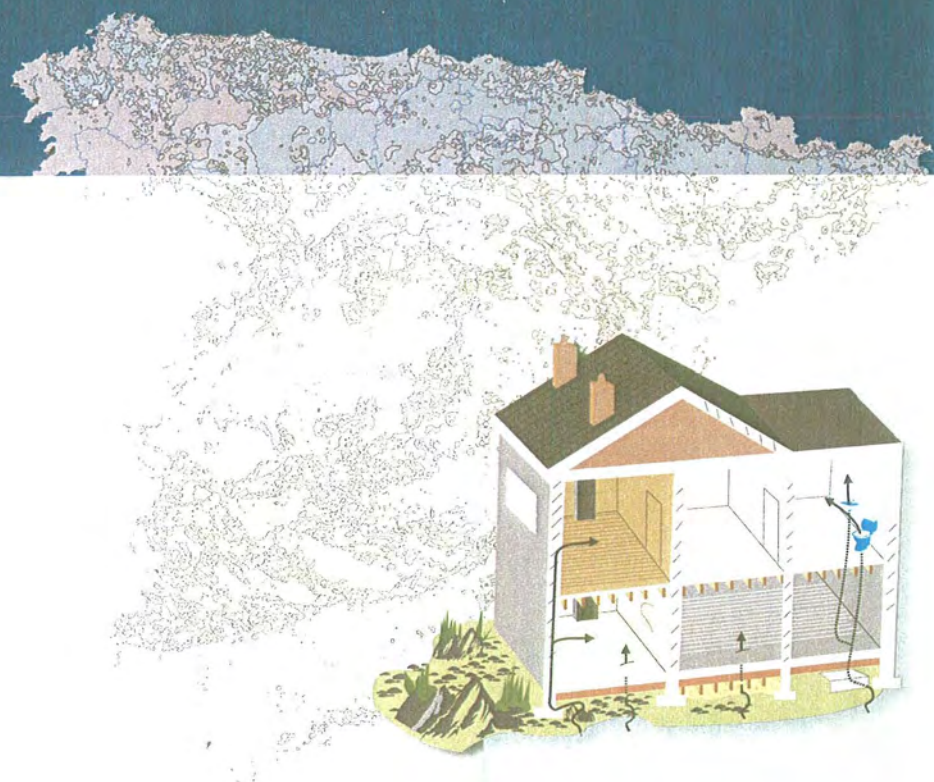


# Concentraciones de radón en viviendas españolas

Otros estudios  
de radiación natural

# CSN



Colección  
Informes Técnicos  
13.2004



Concentraciones de radón  
en viviendas españolas

Otros estudios  
de radiación natural



# Concentraciones de radón en viviendas españolas

Otros estudios  
de radiación natural

Autor: José Luis Martín Matarranz  
*Consejo de Seguridad Nuclear*

Colección  
Informes Técnicos  
13.2004



Colección Informes Técnicos

Referencia INT-04.09

Grupos de investigación participantes en el proyecto Radón del CSN:

- Departamento de Física Médica de la Facultad de Medicina de Santander, Universidad de Cantabria.
- Laboratorio de Radiactividad Ambiental, Universidad de Valencia.
- El Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT.
- Servicio de Física de las Radiaciones, Universidad Autónoma de Barcelona.
- Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental, Universidad de La Laguna.
- Instituto de Técnicas Energéticas, Universidad Politécnica de Cataluña.

© Copyright 2004, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:

Consejo de Seguridad Nuclear

C/ Justo Dorado, 11. 28040 Madrid, España

[www.csn.es](http://www.csn.es)

[peticiones@csn.es](mailto:peticiones@csn.es)

Maquetación y diseño: Ediciones Cinca, S.A.

Impresión: ELECE Industria Gráfica, S.L.

Depósito Legal: M-28.892-2004

## Introducción

---

En 1898 Pierre, Marie Curie y Gustave Bémont descubrieron el radio y observaron que emitía un elemento gaseoso radiactivo que fue denominado inicialmente emanación del radio, antes de ser reconocido por Dorn en 1901 como el más pesado de los gases nobles y al que se denominó radón.

En la naturaleza existen tres isótopos del gas radón, el  $^{219}\text{Rn}$ , isótopo producido en la cadena de desintegración del actinio y al que se denomina actinón, el  $^{220}\text{Rn}$  producido en la serie de desintegración del torio y al que se denomina genéricamente torón y el  $^{222}\text{Rn}$ , constituyente de la cadena de desintegración del uranio y al que se denomina radón. Este último isótopo es el que se encuentra en mayor proporción en el medio terrestre y mientras en espacios abiertos su concentración en el aire no suele ser elevada, salvo en lugares específicos, en espacios cerrados como pueden ser viviendas y lugares de trabajo, principalmente subterráneos, pueden detectarse concentraciones elevadas que impliquen un riesgo potencial para la salud. La existencia de este riesgo potencial, ha llevado a los distintos países a desarrollar programas de vigilancia radiológica con el objeto de conocer las concentraciones existentes en el interior de las edificaciones.

Este documento presenta las actividades realizadas y los resultados obtenidos, hasta junio de 2003, por los diferentes grupos participantes en el Proyecto Radón del CSN. Adicionalmente se ha hecho referencia a programas de medida llevados a cabo en el Principado de Asturias y la Comunidad de Extremadura y al trabajo realizado en colaboración entre el CSN y el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc) relativo a la protección al radón en el Código Técnico de la Edificación.

Mediante el presente documento se revisa el titulado "Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes" publicado por el CSN en el año 1998 [1].



## Sumario

---

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Introducción .....                                                              | 5   |
| Programa realizado por la Universidad<br>de Cantabria .....                     | 9   |
| Programa realizado por la Universidad<br>de Valencia .....                      | 49  |
| Programa realizado por el CIEMAT y<br>la Universidad Autónoma de Barcelona..... | 55  |
| Programa realizado por la Universidad<br>de La Laguna .....                     | 63  |
| Programa realizado por la Universidad<br>Politécnica de Cataluña .....          | 77  |
| Otros programas de medida de radón<br>en viviendas españolas .....              | 85  |
| La protección al radón en el Código Técnico<br>de la Edificación.....           | 89  |
| Referencias bibliográficas.....                                                 | 97  |
| Índice de tablas .....                                                          | 105 |
| Índice de figuras.....                                                          | 107 |



PROGRAMA REALIZADO POR LA  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Con fecha 13 de noviembre de 1988, se promovió por parte del Consejo de Seguridad Nuclear [2], una reunión con diferentes grupos pertenecientes a universidades y organismos, que pudieran colaborar en la determinación de las concentraciones de radón y descendientes en el interior de los edificios del país.

A la reunión asistieron representantes de las universidades de Cantabria, Oviedo, Valencia y Autónoma de Barcelona y de los siguientes organismos, Ciemat, Enresa, Enusa y el Ministerio de Sanidad y Consumo.

Uno de los grupos interesados en dicha colaboración fue el Departamento de Física Médica de la Facultad de Medicina de Santander, perteneciente a la Universidad de Cantabria, que estaba comenzando en esas fechas un programa de medida de concentraciones de radón en el interior de viviendas del país y cuyos objetivos, en general, coincidían con el objeto del acuerdo específico firmado el 26 de diciembre de 1990 entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria, para la determinación de niveles de radón en España [3].

El programa de la universidad constaba de dos fases y sus principales objetivos eran los siguientes [4]:

- Primera fase

Determinación de concentraciones de radón en viviendas e identificación de zonas de mayor riesgo.

Determinación de concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , y  $^{40}\text{K}$  en suelos, con objeto de relacionar los valores de  $^{226}\text{Ra}$ , en suelos con los de radón en casas y de evaluar la irradiación a que estuvieran sometidos los habitantes de cada región.

- Segunda fase:

Realización de estudios más detallados en las zonas donde se detectaran los valores más elevados de concentración de radón. Esos estudios incluían los siguientes aspectos:

- Repetición de las medidas realizadas en la primera fase, empleando adicionalmente en un número

mero apropiado de viviendas la técnica de medida con detectores pasivos de trazas, al objeto de proceder a realizar una intercomparación de resultados.

- Medida del grado de equilibrio entre el radón y sus descendientes en el interior de las viviendas.
- Caracterización de las fuentes que dan lugar a los niveles de radón en las viviendas (suelos, materiales de construcción y aguas).
- Determinación de la exhalación de radón procedente de suelos y materiales de construcción.

## 1. Determinación de concentraciones de radón

Como se ha indicado anteriormente, el programa de vigilancia para determinar los niveles de las concentraciones de radón existentes en el interior de las viviendas se llevó a cabo en dos fases, la primera en el período noviembre 1988-marzo 1989 y la segunda en el período noviembre 1989-marzo 1990.

### 1.1. Desarrollo de la primera fase

Durante la primera fase, se llevaron a cabo medidas en 55 poblaciones del país y en un total de 1.555 casas [4] [5] [6].

La elección de los lugares de muestro, se realizó de manera que cubriesen lo más homogéneamente posible toda la geografía nacional y por otra parte, que fueran representativos de las distintas áreas geológicas. Se consideró adecuada una separación de aproximadamente 100 km entre cada par de puntos de medida.

Elegidas las localizaciones, la selección de casas se llevó a cabo de manera aleatoria, con la idea de que fueran representativas del tipo de viviendas de la zona, tratando de abarcar los modelos de viviendas rurales existentes en el país [4] [5].

### 1.1.1. Condiciones y métodos de muestreo y medida

Las condiciones en las que se recogieron las muestras, pueden calificarse de conservadoras, pero apropiadas para conseguir el objetivo marcado, esto es, conocer en el más corto espacio de tiempo posible los niveles existentes, de forma que éstos diesen idea de los valores promedio. Dichas condiciones fueron las siguientes:

- Período invernal.
- Primeras horas de la mañana.
- Muestreo en habitación cerrada con anterioridad durante al menos diez horas.

El método de muestreo y medida fue desarrollado en el laboratorio de la Cátedra de Radiología y Física Médica de la Universidad de Cantabria.

Este método consistía básicamente en recoger la muestra de aire en una célula de metacrilato de un litro de volumen, en la que previamente se había realizado el vacío y cuyo interior estaba cubierto de una capa de  $SZn(Ag)$ . La fluorescencia que se produce mediante la radiación  $\alpha$  que emite el radón y sus descendientes de período de semidesintegración corto en equilibrio, tres horas después de ser tomada la muestra, es detectada por un fotomultiplicador y contada mediante un sistema amplificador y contador.

La célula empleada es un diseño modificado de la célula de Lucas original, siendo las principales variaciones introducidas las siguientes:

- Normalización del volumen a un litro.
- Extracción de la base de la célula.
- Sustitución de la capa fluorescente por una lámina plástica renovable en la que está depositada la sustancia fluorescente [6] [7].

Mediante las modificaciones introducidas, es posible la fabricación suficiente de células para recoger un gran número de muestras a la vez que se facilita su

limpieza para ser reutilizadas. Las células fueron calibradas en el Lovelace Inhalation Toxicology Research Institute de Albuquerque, Nuevo Méjico, en Estados Unidos, y comparadas en los laboratorios del National Radiological Protection Board (NRPB) [8].

### 1.1.2. Resultados obtenidos

En la tabla 1, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en todo el país, según las diferentes comunidades autónomas [9].

A través de la revisión de los datos expuestos, puede verse que los valores medios más elevados se obtuvieron en las siguientes comunidades:

|                               |                       |
|-------------------------------|-----------------------|
| Galicia                       | 118 Bq/m <sup>3</sup> |
| Madrid (sierra de Guadarrama) | 95 Bq/m <sup>3</sup>  |
| Extremadura                   | 90 Bq/m <sup>3</sup>  |
| Castilla y León               | 68 Bq/m <sup>3</sup>  |
| Canarias                      | 64 Bq/m <sup>3</sup>  |

Los valores medios más bajos se obtuvieron en las siguientes comunidades autónomas:

|                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| Comunidad Valenciana | 18 Bq/m <sup>3</sup> |
| La Rioja             | 19 Bq/m <sup>3</sup> |
| Navarra              | 20 Bq/m <sup>3</sup> |
| Cataluña             | 23 Bq/m <sup>3</sup> |
| Baleares             | 27 Bq/m <sup>3</sup> |

En la documentación consultada se asocian en líneas generales, los valores encontrados con las características geológicas de las diferentes zonas. Específicamente en el documento [10], se indica que España desde el punto de vista geológico, puede considerarse dividida en tres grandes regiones.

#### Primera

Formada por rocas paleozoicas con formaciones metamórficas graníticas y pizarrosas asociadas con rocas filonianas como las cuarcitas. Ocupa la parte occidental de la Península Ibérica incluyendo Galicia, partes de Zamora y Salamanca y buena parte de Avila, Segovia, Madrid, Extremadura y la región oeste de Castilla-La Mancha, prolongándose hacia el sur hasta el Valle del Guadalquivir.

Tabla. 1. Valores de las concentraciones de radón en las diferentes comunidades autónomas

| Comunidad autónoma                         | Número de medidas | Valor medio* Bq/m <sup>3</sup> | Rango de valores        |
|--------------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Andalucía                                  | 278               | 31                             | LID <sup>1</sup> -848,4 |
| Aragón                                     | 130               | 39                             | LID-921,3               |
| Asturias                                   | 54                | 43                             | 18,5-947,2              |
| Baleares <sup>2</sup>                      | 27                | 27                             | LID-160,6               |
| Canarias <sup>3</sup>                      | 60                | 64                             | 14,8-1.875,8            |
| Cantabria                                  | 103               | 40                             | LID-1.972,4             |
| Castilla-La Mancha                         | 168               | 43                             | LID-395,9               |
| Castilla y León                            | 309               | 68                             | LID-15.402,7            |
| Cataluña                                   | 78                | 23                             | LID-1.775,9             |
| Extremadura                                | 111               | 90                             | LID-1.258               |
| Galicia                                    | 112               | 118                            | 18,5-2.068,3            |
| Madrid (sierra de Guadarrama) <sup>4</sup> | 29                | 95                             | 28,1-492,1              |
| Murcia                                     | 59                | 25                             | LID-104,7               |
| Navarra                                    | 49                | 20                             | LID-95,8                |
| La Rioja                                   | 26                | 19                             | LID-1.072,9             |
| Vascongadas                                | 79                | 28                             | LID-303,8               |
| Valencia                                   | 124               | 18                             | LID-214,2               |
| España                                     | 1.796             | 43                             | LID-15.402,7            |

\* Media geométrica.

<sup>1</sup> LID=Límite Inferior de Detección.

<sup>2</sup> Datos de Mallorca.

<sup>3</sup> Datos de Tenerife.

<sup>4</sup> Datos de Hoyo de Manzanares.

Segunda

Formada por sedimentos de origen marino, principalmente calizas, margas y arcillas. Se sitúa a lo largo de la cordillera pirenaica, sur del valle del Ebro y toda la región costera mediterránea, incluyendo la parte de Andalucía situada al sur del Guadalquivir.

Tercera

Formada por rocas sedimentarias de origen continental más modernas como arcillas, areniscas, mar-

gas y formaciones yesíferas y calcáreas. Ocupa buena parte de Castilla y León, el valle del Ebro y la región de Castilla-La Mancha.

En el documento elaborado por Carmen Ródenas [9], se incluye adicionalmente una cuarta región geológica asociada a las Islas Canarias, que al tener las mismas un origen volcánico, presentan un gran número de formaciones basálticas y de rocas piroclásticas y volcánicas.

De forma simplificada, se puede decir que existen, si se exceptúa Canarias, tres grandes regiones con diferentes tipos de suelos:

- Tipo silíceo correspondiente al dominio herciniano
- Tipo calcáreo correspondiente al dominio alpino.
- Tipo arcilloso correspondiente a las depresiones terciarias.

Luis Quindós (1992) [10], indica que, cuando se comparan las concentraciones de radón encontradas en el interior de las viviendas con la descripción geológica general expuesta, se encuentra una notable correspondencia entre ambas.

Los valores promedio de la concentración de radón obtenidos en viviendas situadas en los suelos de naturaleza silícea (Galicia, sierra de Guadarrama en Madrid y Extremadura), son significativamente mayores que el valor medio nacional, mientras que los valores obtenidos en viviendas situadas en suelos de naturaleza calcárea (comunidades de Valencia, La Rioja, Navarra, Cataluña, Baleares y Murcia) son inferiores al valor medio nacional.

Las localizaciones situadas en regiones arcillosas como Aragón y Castilla-La Mancha y también Astu-

rias y Cantabria, dan valores próximos a la media nacional.

Castilla y León y Canarias, adicionalmente, son ejemplos claros de la existencia de suelos de naturaleza diversa, estando afectados los valores medios encontrados, por la elección de puntos de muestreo situados en suelos de muy distinta caracterización geológica, reflejo de la geología propia de esas zonas, silíceos y arcillosos en el primer caso y mantos de lava en el segundo, por lo que sus valores resultan más difíciles de interpretar y se requerirá de un mayor número de medidas en esas zonas.

En relación con los datos relativos a Madrid (Sierra de Guadarrama), contenidos en la tabla 1, hay que señalar que corresponden a una única población, Hoyo de Manzanares, según se ha deducido de la información contenida en el documento elaborado por Luis Quindós (1993) [11]. No obstante se realizaron medidas en otras siete poblaciones de la Sierra de Guadarrama [12] [13], La Cabrera, Miraflores de la Sierra, Manzanares el Real, El Escorial, Navas del Rey, San Martín de Valdeiglesias y Navacerrada.

En la tabla 2, se han recopilado los resultados obtenidos en las poblaciones indicadas anteriormente, incluyendo adicionalmente la población de Hoyo de Manzanares.

Tabla 2. Valores de concentración de radón en poblaciones de la Sierra de Madrid

| Población                   | Número de casas | Valor medio Bq/m <sup>3</sup> | (Rango)     |
|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| La Cabrera                  | 11              | 146,20                        | (52-269)    |
| El Escorial                 | 19              | 247,80                        | (23-1.573)  |
| Hoyo de Manzanares          | 29              | 94,90                         | (28-492)    |
| Manzanares el Real          | 9               | 321,60                        | (69-1.221)  |
| Miraflores de la Sierra     | 18              | 185,90                        | (34-1.325)  |
| Navacerrada                 | 8               | 118,30                        | (32-762)    |
| Navas del Rey               | 3               | 557,80                        | (175-1.202) |
| San Martín de Valdeiglesias | 10              | 126,30                        | (65-284)    |

En el estudio de L. Quindós [4], se indica que en un 13% de las viviendas donde se llevaron a cabo medidas de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$ , se encontraron valores superiores a  $148 \text{ Bq/m}^3$  ( $4 \text{ pCi/l}$ ) [14], valor que la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos, basándose en la información disponible, cree que puede llegarse en la reducción de los niveles de radón de la mayoría de las viviendas. No obstante, a través del análisis de los resultados individuales correspondientes a 1873 viviendas remitidos por la Universidad de Cantabria [13], se ha obtenido un porcentaje de un 17% de casas que han superado dicho valor.

Únicamente un 4% de las viviendas, superó el nivel de referencia de  $400 \text{ Bq/m}^3$ , valor recomendado por la Unión Europea a sus Estados miembros para iniciar acciones de remedio en viviendas ya edificadas [15].

En la tabla 3, se expone por comunidades autónomas, el porcentaje de casas que superó el nivel de  $400 \text{ Bq/m}^3$ , porcentaje que se ha obtenido a través del análisis de los resultados contenidos en la publicación [14].

A la vez que se realizaban las medidas en el interior de las viviendas, se recogieron una serie de datos relativos a sus características, con objeto de realizar un estudio que relacionase dichas características con los niveles de radón detectados. Los datos que se recogieron fueron los siguientes: tipo de vivienda, combustible empleado, antigüedad, lugar donde se llevó a cabo la medida en el interior de la vivienda y materiales de construcción.

De todos los parámetros analizados, el más importante en su relación con los niveles de radón, fue el referido a los materiales de construcción de las viviendas [16], ya que el valor medio de la muestra total, resultó ser de 1,5 veces superior para las casas de piedra que para las construidas con ladrillo, aunque no se indica si para el mismo tipo de terreno.

En la tabla 4, se presentan los valores obtenidos de concentración de actividad de radón en relación con el material de construcción de las viviendas.

Tabla 3. Porcentaje de casas en cada comunidad autónoma con valores superiores a  $400 \text{ Bq/m}^3$

| Comunidad autónoma            | Porcentaje de viviendas con concentraciones $> 400 \text{ Bq/m}^3$ |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Andalucía                     | 4                                                                  |
| Aragón                        | 3                                                                  |
| Asturias                      | 2                                                                  |
| Baleares                      | 0                                                                  |
| Canarias                      | 4                                                                  |
| Cantabria                     | 3                                                                  |
| Castilla-La Mancha            | 0                                                                  |
| Castilla y León               | 30                                                                 |
| Cataluña                      | 1                                                                  |
| Extremadura                   | 4                                                                  |
| Galicia                       | 11                                                                 |
| Madrid (Sierra de Guadarrama) | 17                                                                 |
| Murcia                        | 0                                                                  |
| Navarra                       | 0                                                                  |
| La Rioja                      | 1                                                                  |
| Valencia                      | 0                                                                  |
| Vascongadas                   | 0                                                                  |

Tabla 4. Relación de las concentraciones de radón con los materiales de construcción

| Material     | Número de medidas | Valor medio $\text{Bq/m}^3$ | Rango de valores |
|--------------|-------------------|-----------------------------|------------------|
| Piedra       | 808               | 49,6                        | LD-15.402,7      |
| Ladrillo     | 607               | 33,9                        | LD-5.676,0       |
| Adobe-Piedra | 70                | 48,6                        | LD-848,40        |
| Otros        | 69                | 18,5                        | LD-232,4         |

1.2. Desarrollo de la segunda fase

La segunda fase, se llevó a cabo entre noviembre de 1989 y marzo de 1990 con los siguientes objetivos:

- Efectuar una segunda campaña de medidas, para confirmar los resultados obtenidos en la primera fase.
- Colocar en alguna de las viviendas detectores pasivos de trazas que permitieran efectuar una intercomparación de los métodos de medida, así como una evaluación de las concentraciones integradas de radón.

1.2.1. Confirmación de los resultados obtenidos

En la primera fase, se seleccionaron 307 casas en las denominadas zonas de interés (zonas con elevados niveles de radón) y se realizaron medidas nuevamente en 228 casas. El valor medio de concentración estimado a partir de los resultados obtenidos en la primera fase en las 307 viviendas, fue de 125 Bq/m<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 3,0. En la segunda fase el valor medio estimado a partir de los resultados obtenidos en las 228 viviendas, fue de 115,7 Bq m<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 3,2.

Estos resultados según indica Luis Quindós (1990) [4], ponen de manifiesto la reproductividad de las medidas realizadas con las células de centelleo.

1.2.2. Intercomparación de métodos de medida

Se realizaron medidas con detectores pasivos de trazas en 448 viviendas [16], 250 en viviendas donde las concentraciones fueron bajas y 198 en viviendas donde se habían detectado niveles elevados. Adicionalmente, se realizaron medidas puntuales con el método de células de centelleo.

En las 198 viviendas donde se midieron valores más altos, se colocaron detectores de trazas procedentes de la compañía Tech/OPS Landauer Terradex EE.UU. y en 94 de ellas, adicionalmente detectores pasivos de trazas del National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido.

Los detectores fueron colocados en noviembre de 1989 y retirados tres meses más tarde. Tanto el día de su colocación como el de su retirada, se efectuaron medidas instantáneas con las células de centelleo [5] [17].

En la tabla 5 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con los distintos métodos de medida,

Tabla 5. Comparación de resultados con diferentes métodos de medida

| Rango de concentración<br>Bq/m <sup>3</sup> | Células de centelleo |              | Detectores trazas (Terradex) |              | Detectores trazas (NRPB) |              |
|---------------------------------------------|----------------------|--------------|------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
|                                             | Número medidas       | Valor* medio | Número medidas               | Valor* medio | Número medidas           | Valor* medio |
| <37                                         | 11                   | 26,3         | 15                           | 29,6         | 12                       | 29,6         |
| 37-75                                       | 17                   | 44,4         | 44                           | 44,4         | 26                       | 44,4         |
| 75-150                                      | 25                   | 107,3        | 15                           | 103,6        | 19                       | 103,6        |
| 150-200                                     | 10                   | 173,9        | 12                           | 166,5        | 12                       | 170,2        |
| 200-400                                     | 16                   | 281,2        | 12                           | 281,2        | 14                       | 270,1        |
| >400                                        | 15                   | 869,5        | 11                           | 806,6        | 11                       | 782,9        |
| Total                                       | 94                   | 140,9        | 94                           | 107,3        | 94                       | 114,7        |

\* Media geométrica.

considerando diferentes intervalos de concentración, en los 94 lugares en los que se emplearon los tres métodos.

La revisión de los resultados indicó que si bien existía una mayor concordancia entre los resultados obtenidos en las medidas realizadas empleando los dos tipos de detectores de trazas, las tres medias geométricas no fueron significativamente diferentes.

|                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Valor medio células de centelleo | 140,9 Bq/m <sup>3</sup> |
| Valor medio trazas Terradex      | 107,3 Bq/m <sup>3</sup> |
| Valor medio trazas NRPB          | 114,7 Bq/m <sup>3</sup> |

Comparando los valores obtenidos para los diferentes intervalos de concentración, se observó que las diferencias entre los respectivos resultados, aunque pequeñas, se presentaban esencialmente para los niveles más bajos de concentración, hecho relacionado según indica L. Quindós [4] [17], con el valor límite de detección asociado a la medida con células de centelleo, 10 Bq/m<sup>3</sup>, superior al obtenido por el método de trazas, que proporciona una mayor sensibilidad y una mayor fiabilidad en la medida de concentraciones muy bajas.

## 2. Otros estudios

En el documento de L. Quindós (1990) [4] se exponen, adicionalmente a los resultados de las concentraciones de radón obtenidos a través de las medidas realizadas en el interior de las viviendas, las actividades realizadas en relación con la caracterización de las fuentes de radón, aspecto que se desarrolla más ampliamente en el informe de Quindós y Soto [16]. Este tipo de fuentes han sido las siguientes:

- El terreno sobre el que se asienta la vivienda.
- Los materiales de construcción que integran la estructura de la vivienda.
- Las aguas de consumo doméstico.

### 2.1. Suelos

El programa de muestreo de suelos se realizó durante el período 1989-1992, con objeto de determinar

las concentraciones de los siguientes isótopos: <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th.

Se recogieron una serie de muestras en 952 lugares a lo largo del país, en cada lugar se recogieron cinco muestras en una superficie de 1.000 m<sup>2</sup> a una profundidad de 5 cm [18] [19].

Las muestras de cada punto de muestreo se mezclaron en el laboratorio y fueron sometidas a un proceso de preparación que llevaba implícita la desecación de la muestra, primero dejándolas expuestas al aire y posteriormente introduciéndolas en una estufa a una temperatura de 100 °C durante un período aproximado de 24 horas. Mediante una nueva pesada se determinó el contenido de agua de las muestras, que posteriormente fueron tamizadas para que la granulometría fuera uniforme.

Las muestras se situaron en un contenedor herméticamente cerrado durante un período de cuatro semanas, con objeto de permitir el equilibrio entre el <sup>222</sup>Rn, <sup>220</sup>Rn y sus correspondientes descendientes. La determinación de los correspondientes isótopos se realizó mediante espectrometría gamma.

En la tabla 6, se presentan, por comunidad autónoma y en la totalidad del país, los valores obtenidos de las concentraciones de actividad de los isótopos indicados [19].

También se realizaron medidas de la exhalación de radón en suelos, mediante la técnica denominada de acumulación [20]. Los valores obtenidos están referidos a las zonas con altos niveles de radón en viviendas. Las medidas se realizaron a primeras horas de la mañana durante el mes de noviembre de 1989 y se repitieron en los mismos puntos en febrero de 1990.

Los valores obtenidos durante la primera campaña de medidas, mostraron un amplio grado de variación comprendido entre valores de 43 Bq/m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup> a 940 Bq/m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>.

Los resultados encontrados durante el segundo período de medidas, presentaron una gran variabilidad, aunque los valores medios fueron notablemente infe-

Tabla 6. Concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en suelos (Bq/kg)

| Comunidad autónoma | Número de medidas | $^{226}\text{Ra}$ |        | $^{232}\text{Th}$ |        | $^{40}\text{K}$ |           |
|--------------------|-------------------|-------------------|--------|-------------------|--------|-----------------|-----------|
|                    |                   | Valor medio       | Rango  | Valor medio       | Rango  | Valor medio     | Rango     |
| Andalucía          | 126               | 29,0              | 8-82   | 30,0              | 5-79   | 426             | 46-1.660  |
| Aragón             | 44                | 35,8              | 48-72  | 34,7              | 16-77  | 485             | 141-1.120 |
| Asturias           | 17                | 43,7              | 20-167 | 44,5              | 21-81  | 410             | 64-800    |
| Baleares           | 11                | 34,5              | 23-70  | 31,2              | 10-58  | 367             | 153-600   |
| Canarias           | 30                | 51,2              | 21-136 | 64,7              | 32-169 | 832             | 270-1.990 |
| Cantabria          | 94                | 44,3              | 10-141 | 45,8              | 8-87   | 565             | 107-1.560 |
| Castilla-La Mancha | 119               | 29,4              | 9-65   | 42,4              | 9-108  | 526             | 93-1.390  |
| Castilla y León    | 144               | 38,8              | 9-300  | 41,4              | 8-128  | 674             | 87-1.710  |
| Cataluña           | 45                | 39,5              | 13-138 | 38,4              | 7-96   | 598             | 33-1.200  |
| Extremadura        | 73                | 49,5              | 11-240 | 56,8              | 9-258  | 712             | 118-1.840 |
| Galicia            | 71                | 93,9              | 18-310 | 68,4              | 10-215 | 999             | 280-2.040 |
| Madrid             | 37                | 48,6              | 12-158 | 57,7              | 7-139  | 1.113           | 113-1.720 |
| Murcia             | 16                | 31,5              | 18-63  | 24,6              | 11-45  | 424             | 240-700   |
| Navarra            | 15                | 33,5              | 19-80  | 28,6              | 16-39  | 410             | 230-670   |
| La Rioja           | 12                | 42,2              | 168-69 | 50,4              | 27-85  | 653             | 360-1.060 |
| Vascongadas        | 45                | 45,1              | 9-93   | 46,5              | 8-92   | 516             | 31-1.380  |
| Valencia           | 32                | 28,1              | 8-61   | 29,4              | 10-66  | 382             | 78-910    |
| España             | 931               | 38,9              | 8-310  | 41,0              | 5-258  | 578             | 31-2.040  |

riores con un rango entre los 12 y 190 Bq/m<sup>2</sup>·h<sup>-1</sup>. La explicación de los valores más bajos se relacionó con el mayor contenido de humedad del suelo.

## 2.2. Materiales de construcción

Las actividades llevadas a cabo por este grupo se pueden dividir en dos apartados, un primer grupo de medidas realizadas en una serie de muestras que se recogieron aleatoriamente [16] [21], y un segundo

grupo de muestras recogidas de manera sistemática (granito, cemento y pizarra).

La técnica de preparación y análisis aplicada a las muestras, fue análoga a la indicada anteriormente para suelos.

Para la realización del primer grupo de medidas se recogieron y analizaron muestras de arena de playa, arena, ladrillos, cemento, hormigón, estuco, yeso y

suelo, determinándose el contenido de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ . En la tabla 7 se exponen los resultados obtenidos en las distintas muestras analizadas.

La conclusión de este primer estudio [21], fue que los materiales de construcción analizados estaban dentro de los intervalos aceptados en las normas adoptadas

en relación con la exposición en interiores por la República Federal de Alemania y los criterios establecidos en un informe de la OCDE/NEA del año 1979 [22], siendo la excepción un tipo de cemento, el denominado en la tabla como Cemento II, que mostraba los valores más elevados  $^{226}\text{Ra}$  (421,8 Bq/kg),  $^{232}\text{Th}$  (266,4 Bq/kg) y  $^{40}\text{K}$  (599,4 Bq/kg).

Tabla 7. Concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en materiales de construcción

| Material       | Número de muestras | Concentración de actividad Bq/kg |                   |                 |
|----------------|--------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
|                |                    | $^{226}\text{Ra}$                | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
| Arena de playa | 6                  | 5,9                              | 3,7               | 55,5            |
| Arena I        | 4                  | 30,3                             | 27,7              | 30,7            |
| Arena II       | 7                  | 7,0                              | 2,9               | 11,5            |
| Ladrillo I     | 3                  | 55,1                             | 43,6              | 747,4           |
| Ladrillo II    | 8                  | 73,2                             | 59,9              | 292,3           |
| Cemento I      | 3                  | 25,1                             | 19,6              | 59,2            |
| Cemento II     | 7                  | 421,8                            | 266,4             | 599,4           |
| Cemento III    | 5                  | 94,7                             | 66,6              | 44,1            |
| Cemento IV     | 4                  | 23,3                             | 18,5              | 85,1            |
| Cemento V      | 5                  | 51,8                             | 40,7              | 403,3           |
| Cemento VI     | 6                  | 35,5                             | 29,6              | 203,5           |
| Cemento VII    | 7                  | 53,6                             | 37,7              | 274,9           |
| Yeso I         | 3                  | 9,6                              | 4,4               | 55,5            |
| Yeso II        | 5                  | 35,9                             | 26,3              | 155,4           |
| Yeso III       | 7                  | 50,7                             | 34,0              | 166,5           |
| Yeso IV        | 5                  | 11,1                             | 7,4               | 70,3            |
| Estuco         | 4                  | 8,1                              | 4,8               | 74,0            |
| Hormigón       | 24                 | 29,9                             | 31,8              | 203,5           |
| Suelo          | 12                 | 14,8                             | 11,8              | 214,6           |

Posteriormente y según lo indicado en [18] [23] [24], se realizó un estudio a nivel nacional del contenido de isótopos naturales en dos materiales de construcción utilizados comúnmente en nuestro país, granito y cemento [25] [26].

En el caso de los granitos, se recogieron un total de 134 muestras, 87 de granitos nacionales y 47 muestras de granitos de importación, representando los nacionales el 98% de los empleados en la construcción en nuestro país. En las muestras se determinó el contenido de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  por espectrometría gamma [24].

Los resultados de las medidas fueron los que se exponen en la tabla 8 para granitos nacionales y en la tabla 9 para granitos extranjeros.

En relación con los cementos, se recogieron un total de 132 muestras procedentes de los distintos productores de nuestro país y adicionalmente siete muestras de cementos de importación procedentes de Turquía y Sudáfrica. En todas las muestras se determinaron las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ .

Tabla 8. Contenido de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en muestras de granitos nacionales. Bq/kg

| Provincia  | Número de medidas | $^{226}\text{Ra}$ |            | $^{232}\text{Th}$ |            | $^{40}\text{K}$ |             |
|------------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------------|-------------|
|            |                   | Valor medio       | Rango      | Valor medio       | Rango      | Valor medio     | Rango       |
| Ávila      | 2                 | 86,1              | 59,7-112,6 | 68,4              | 61,6-75,3  | 1.206           | 1.104-1.309 |
| Badajoz    | 23                | 66,3              | 7,1-143,7  | 40,9              | 2,5-107,3  | 957,6           | 234-1.362   |
| Cáceres    | 10                | 78,2              | 37,4-103,6 | 43,9              | 8,7-132,6  | 997,2           | 629-1.236   |
| La Coruña  | 3                 | 92,0              | 78,0-114,0 | 64,5              | 43,9-100,7 | 1.329           | 1.225-1.424 |
| Huelva     | 1                 | 32,6              |            | 2,2               |            | 337             |             |
| Huesca     | 1                 | 282,1             |            | —                 |            | 712             |             |
| Lugo       | 6                 | 93,1              | 42,3-168,9 | 32,8              | 11,1-63,3  | 951             | 454-1.324   |
| Madrid     | 13                | 90,9              | 44-171,9   | 42,4              | 11,1-60,0  | 976             | 567-1.283   |
| Orense     | 5                 | 78,4              | 43,1-98,1  | 42,9              | 12,0-81,2  | 1.251           | 754-1.869   |
| Pontevedra | 12                | 112,0             | 36,4-197,5 | 44,6              | 5,7-124    | 1.112           | 453-1.394   |
| Salamanca  | 3                 | 61,3              | 43,8-81,8  | 37,5              | 26,4-53,5  | 1.112           | 1.022-1.180 |
| Segovia    | 3                 | 126,7             | 90-165,8   | 57,5              | 49,0-66,8  | 1.049           | 1.007-1.123 |
| Sevilla    | 1                 | 30,3              |            | 110,7             |            | 790             |             |
| Toledo     | 1                 | 191,2             |            | 73,7              |            | 1.253           |             |
| Zamora     | 3                 | 73,9              | 58,8-94,5  | 47,1              | 2,4-73,6   | 987             | 578-1.318   |

Tabla 9. Contenido de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en muestras de granitos extranjeros. Bq/kg

| País      | Número de medidas | $^{226}\text{Ra}$ |            | $^{232}\text{Th}$ |            | $^{40}\text{K}$ |             |
|-----------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------------|-------------|
|           |                   | Valor medio       | Rango      | Valor medio       | Rango      | Valor medio     | Rango       |
| Argentina | 1                 | 98,1              |            | 125               |            | 1.276           |             |
| Brasil    | 11                | 102,0             | 9,8-191,5  | 129,5             | 42,6-366   | 1.171           | 800-1.800   |
| Finlandia | 3                 | 54,4              | 16,1-90,2  | 83,0              | 51-104,8   | 925,6           | 707-1.073   |
| Francia   | 2                 | 15,6              | 6,9-24,4   | 55,4              | 33,1-77,8  | 1.541,5         | 1.312-1.771 |
| India     | 7                 | 129,3             | 6,1-672    | 60,8              | 4,2-98,5   | 920             | 306-1.533   |
| Noruega   | 7                 | 101,7             | 13-218,7   | 104,0             | 14,8-239,5 | 1.192,1         | 912-1.403   |
| Portugal  | 1                 | 31,6              |            | 18,1              |            | 279             |             |
| Suecia    | 1                 | 60,7              |            | 27,8              |            | 694             |             |
| Sudáfrica | 8                 | 43,4              | 3,7-157,0  | 53,9              | 4,0-157,0  | 843,4           | 62-1.361    |
| Tanzania  | 1                 | 20,3              |            | 273               |            | 288             |             |
| Venezuela | 5                 | 50,2              | 23,5-122,0 | 65,2              | 43,0-99,1  | 1.224           | 881-1.580   |

Los valores medios de los resultados obtenidos en los cementos producidos en España, según la provincia de origen se exponen en la tabla 10.

El laboratorio del departamento de Física Médica de la Universidad de Cantabria, con el objeto de validar sus resultados y establecer un control de calidad de las medidas, coordinó y participó junto con otros laboratorios pertenecientes a Bélgica, Dinamarca, Grecia, Holanda, Hungría, Irlanda, Japón, Portugal, Suecia y Reino Unido, en dos ejercicios de medida de isótopos emisores gamma en muestras de suelo y materiales de construcción [27] [28].

Dentro de un nuevo acuerdo específico firmado entre el CSN y la Universidad de Cantabria [29] en el año 1996, se continuó con el estudio de los materiales de construcción utilizados en nuestro país, centrándose este nuevo estudio en pizarras [30]

La identificación de las distintas canteras y de los diferentes tipos de pizarras se llevó a cabo mediante la información bibliográfica del Instituto Tecnológico Geominero y se recogieron un total de 59 muestras

de las principales canteras localizadas en las provincias de Barcelona, Guipúzcoa, Huelva, León, Lugo, Pontevedra, Salamanca y Segovia.

Los análisis realizados consistieron en la determinación de las concentraciones de actividad de los tres isótopos indicados anteriormente:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ .

En la tabla 11 se recogen los valores medios y el rango de concentraciones de los isótopos indicados, considerando el número de muestras recogidas en cada provincia.

Los valores obtenidos se compararon en su momento con los contenidos en las recomendaciones emitidas por las autoridades en protección radiológica de los países nórdicos [31].

En estas recomendaciones se indica que el nivel de exención para materiales de construcción como fuentes de radiación gamma, debería ser  $M < 1$ , donde  $M = C_K/3.000 + C_{Ra}/300 + C_{Th}/200$ .

$C_K$ ,  $C_{Ra}$ ,  $C_{Th}$  son las actividades específicas en Bq/kg de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ .

Tabla 10. Concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  en cementos españoles. Bq/kg

| Provincia | Número de muestras | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ | $^{40}\text{K}$ |
|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Albacete  | 1                  | 32,0              | 31,0              | 315,0           |
| Alicante  | 8                  | 30,7              | 22,9              | 244,6           |
| Almería   | 3                  | 72,7              | 45,3              | 287,0           |
| Asturias  | 5                  | 60,2              | 30,2              | 408,2           |
| Barcelona | 18                 | 46,3              | 36,7              | 273,0           |
| Cantabria | 5                  | 56,4              | 30,2              | 377,8           |
| Córdoba   | 1                  | 74,0              | 19,0              | 341,0           |
| Guipúzcoa | 6                  | 55,7              | 30,8              | 315,3           |
| Huelva    | 3                  | 27,6              | 26,6              | 233,6           |
| Huesca    | 3                  | 92,3              | 40,7              | 330,0           |
| Jaén      | 5                  | 43,8              | 35,2              | 381,8           |
| León      | 3                  | 93,0              | 41,6              | 509,0           |
| Lugo      | 2                  | 28,5              | 45,0              | 438,5           |
| Málaga    | 6                  | 55,7              | 47,3              | 357,0           |
| Mallorca  | 1                  | 29,0              | 43,0              | 302,0           |
| Madrid    | 9                  | 38,6              | 25,7              | 330,1           |
| Murcia    | 8                  | 57,4              | 34,8              | 304,5           |
| Navarra   | 6                  | 42,6              | 31,0              | 350,2           |
| Sevilla   | 2                  | 23,5              | 15,5              | 169,5           |
| Tarragona | 4                  | 33,0              | 14,7              | 290,0           |
| Toledo    | 8                  | 42,5              | 30,5              | 337,8           |
| Valencia  | 11                 | 31,7              | 22,8              | 284,8           |
| Vizcaya   | 10                 | 54,3              | 39,6              | 271,5           |
| Zaragoza  | 4                  | 74,5              | 32,5              | 387,0           |

Tabla 11. Contenido de <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K en muestras de pizarras nacionales. Bq/kg

| Provincia  | Número de medidas | <sup>226</sup> Ra |            | <sup>232</sup> Th |            | <sup>40</sup> K |           |
|------------|-------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-----------------|-----------|
|            |                   | Valor medio       | Rango      | Valor medio       | Rango      | Valor medio     | Rango     |
| Barcelona  | 1                 | 30,7              |            | 51,7              |            | 863,0           |           |
| Guipúzcoa  | 1                 | 23,5              |            | 21,7              |            | 480,0           |           |
| Huelva     | 3                 | 42,6              | 23,2-61,5  | 51,5              | 24,4-86,6  | 778,0           | 603-900   |
| León       | 5                 | 56,4              | 44,6-71,4  | 69,2              | 54-91,6    | 1.033,0         | 747-1.315 |
| Lugo       | 24                | 48,8              | 11,5-80,4  | 56,6              | 22,6-96,4  | 823,0           | 371-1.372 |
| Orense     | 20                | 65,8              | 39,4-352,0 | 99,3              | 40,2-792,2 | 969,0           | 416-1.407 |
| Pontevedra | 1                 | 70,9              |            | 86,1              |            | 1.204,0         |           |
| Salamanca  | 1                 | 33,3              |            | 65,6              |            | 809,0           |           |
| Segovia    | 3                 | 34,7              | 28,2-39,0  | 41,2              | 36,3-50,2  | 560,3           | 333-917   |

Estas recomendaciones han sido revisadas en el año 2000, manteniéndose el nivel de exención indicado, que se debe considerar a la hora de las nuevas edificaciones [32].

De las 59 muestras analizadas, únicamente una de ellas que representaría un 1,7% del total, rebasaría el valor del índice debido a los valores de <sup>226</sup>Ra (352 Bq/kg) y <sup>232</sup>Th (792,2 Bq/kg) [33].

2.3. Estudio de niveles de radiación

Durante un período de tres años, el grupo investigador llevó a cabo un estudio en el que se realizaron medidas de niveles de radiación gamma a lo largo de todo el país [34] [35]. Las medidas en el exterior se llevaron a cabo en 1.000 localizaciones, utilizando un detector Geiger-Müller y a 1 metro sobre el terre-

no, excluyendo la contribución de la radiación cósmica y del fondo del instrumento.

En la tabla 12 se exponen los valores medios obtenidos en las diferentes comunidades autónomas.

El valor medio obtenido para el territorio nacional fue de 38,4 nGy/h, con un rango comprendido entre 22,1 y 75,9 nGy/h, correspondientes respectivamente a las comunidades de Valencia y Madrid.

Adicionalmente y en un total de 100 viviendas y con la misma metodología se llevaron medidas de niveles de radiación gamma en el interior [35].

Los valores obtenidos en el interior de las viviendas fueron más elevados que los obtenidos en el exterior, entre 1,2 y 1,6 veces.

Tabla.12. Valores de niveles de radiación gamma en las diferentes comunidades autónomas

| Comunidad autónoma    | Número de medidas | Valor medio* nGy/h |
|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Andalucía             | 141               | 27,6               |
| Aragón                | 46                | 31,5               |
| Asturias              | 19                | 35,3               |
| Baleares <sup>1</sup> | 32                | 33,8               |
| Canarias <sup>2</sup> | 11                | 57,6               |
| Cantabria             | 66                | 42,0               |
| Castilla-La Mancha    | 145               | 35,2               |
| Castilla y León       | 227               | 38,9               |
| Cataluña              | 42                | 44,7               |
| Extremadura           | 105               | 48,6               |
| Galicia               | 59                | 59,4               |
| Madrid                | 62                | 75,9               |
| Murcia                | 18                | 23,4               |
| Navarra               | 13                | 29,8               |
| La Rioja              | 13                | 29,8               |
| Vascongadas           | 17                | 35,8               |
| Valencia              | 49                | 22,1               |
| España                | 1.061             | 38,4               |

\* Media geométrica.  
<sup>1</sup> Datos correspondientes a las islas de Mallorca e Ibiza.  
<sup>2</sup> Datos correspondientes a la isla de Tenerife.

2.4. Estudios en aguas

Los estudios realizados por la Universidad de Cantabria se centraron en la medida del contenido de <sup>226</sup>Ra y <sup>222</sup>Rn en aguas de consumo público y balnearios, siendo estas últimas las que presentaron unos niveles de <sup>222</sup>Rn disuelto notablemente más elevados [16].

2.4.1. Balnearios

J. Soto en la publicación [36] presenta los resultados de las medidas realizadas en diferentes balnearios de las comunidades de Cantabria, Galicia, Extremadura, y Castilla y León, resultados que se han recopilado en la tabla 13.

Tabla 13. Concentración de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{226}\text{Ra}$  en aguas de diferentes balnearios

| Balnearios                           | Concentración de actividad Bq/l |                   |
|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------|
|                                      | $^{222}\text{Rn}$               | $^{226}\text{Ra}$ |
| <b>Cantabria</b>                     |                                 |                   |
| Alceda                               | 2                               | 0,06              |
| Las Caldas de Besaya                 | 824                             | 0,84              |
| Liérganes                            | 6                               | 0,02              |
| Puente Viesgo                        | 34                              | 0,51              |
| Aldea del Ebro                       | 5                               | 0,02              |
| Fontibre                             | 2                               | n.d.              |
| La Hermida                           | 840                             | 0,12              |
| Hoznayo                              | 19                              | 0,02              |
| Puente Nansa                         | 4                               | n.d.              |
| <b>Galicia</b>                       |                                 |                   |
| Acuña                                | 104                             | 0,006             |
| Arteixo                              | 181                             | —                 |
| Caldas de Molgas                     | 355                             | 0,23              |
| Caldelas de Tuy                      | 112                             | —                 |
| Dávila                               | 29                              | n.d.              |
| La Toja                              | 266                             | 3,66              |
| <b>Extremadura y Castilla y León</b> |                                 |                   |
| Alange                               | 112                             | —                 |
| Baños de Montemayor                  | 13                              | 0,043             |
| El Raposo                            | 6                               | n.d.              |
| Ledesma                              | 35                              | 0,016             |
| Retortillo                           | 147                             | 0,087             |

n.d. = no detectado.

Para la medida de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  disuelto en agua, las muestras se recogieron en un portamuestras de metacrilato, con geometría Marinelli y se midieron en un detector de INa(Tl), determinándose la concentración de  $^{222}\text{Rn}$ , a través de los fótocos de 0,61 MeV y 1,76 MeV del  $^{214}\text{Bi}$ . El límite de detección del método empleado fue de 2 Bq/l [36] [37].

La medida de la concentración de  $^{226}\text{Ra}$  en agua, se realizó mediante un proceso de separación radioquímica [38], midiéndose la plancheta con el precipitado en un detector de SZn(Ag). El límite de detección para el método empleado fue de 4 mBq/l [39].

Dentro de los balnearios donde se tomaron muestras en la comunidad de Cantabria, se destaca [40] como de especial interés al balneario de Las Caldas de Besaya, donde se encontraron, valores relativamente elevados de  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{226}\text{Ra}$  en sus aguas.

Adicionalmente en este balneario, se realizaron medidas de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en su interior en diferentes áreas (baños y duchas, zonas cercanas al manantial, salas de inhalación, así como en el vestíbulo de entrada).

En los aerosoles inhalados por los pacientes, se midieron concentraciones de radón comprendidas entre 99.400 y 102.700 Bq/m<sup>3</sup>, siendo los valores obtenidos en el vestíbulo de entrada los más bajos (580 Bq/m<sup>3</sup> valor medio).

Los valores encontrados en las zonas de baños, estuvieron comprendidos entre 3.560 Bq/m<sup>3</sup> y 6.650 Bq/m<sup>3</sup>, indicándose adicionalmente que estos valores podrían implicar un riesgo radiológico para los trabajadores del balneario [40].

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), en su publicación 65 [41], sugiere que el nivel de acción en lugares de trabajo, sea considerado entre 500 y 1.500 Bq/m<sup>3</sup>.

En una publicación [42] del año 1999, realizada por el mismo grupo investigador, se informa sobre el estudio de 54 balnearios españoles, donde en seis de ellos se llevó a cabo una estimación de las dosis que estarían recibiendo los diferentes grupos de trabajadores (doctores, fisioterapeutas, asistentes de sala,

personal de oficina y personal de limpieza). La conclusión de dicho estudio fue que las mayores dosis las estarían recibiendo los asistentes de sala de tres de los seis balnearios estudiados, con valores anuales de dosis de 45, 33 y 28 mSv. En la publicación no se indica el nombre de dichos balnearios.

Otros grupos españoles que han llevado a cabo estudios en balnearios han sido el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Málaga y el departamento de Física de la facultad de Veterinaria de la Universidad de Extremadura.

La Universidad de Málaga [43] llevó a cabo un estudio del contenido radiactivo de las aguas de 28 balnearios andaluces (actividades  $\alpha$  y  $\beta$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{222}\text{Rn}$ ) y de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$ , en el aire de las salas.

La Universidad de Extremadura (Cáceres), también realizó un estudio en los balnearios de dicha comunidad autónoma, que fue publicado en el año 1995 [44], este estudio estuvo centrado básicamente en la determinación del contenido isotópico de dichas aguas [45].

#### 2.4.2. Aguas potables

En relación a las aguas de consumo público [4], los estudios se comenzaron a partir de la segunda campaña de medidas de radón, recogiendo muestras en casas y fuentes públicas de once pueblos elegidos, con el fin de medir la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  disuelto y la concentración de  $^{226}\text{Ra}$ , para correlacionar dichas medidas.

Los pueblos elegidos situados en la zona oeste de la provincia de Salamanca, fueron los siguientes [46]:

|                            |                    |
|----------------------------|--------------------|
| Alameda del Gardón         | Saelices el Chico  |
| Barquilla                  | Serranillo         |
| Castillejo de Martín Viejo | Villar de Argañán  |
| Ciudad Rodrigo             | Villar del Ciervo  |
| Fuentes de Oñoro           | Villar de la Yegua |
| Gallegos de Argañán        |                    |

Las muestras se recogieron durante el período 1991-1992 en un total de 33 fuentes y viviendas de dichas poblaciones.

Los resultados obtenidos presentaban una gran disparidad en los valores de concentración de  $^{222}\text{Rn}$ , estando comprendidos entre  $\text{LID} \approx 10 \text{ Bq/l}$  y  $16.000 \text{ Bq/l}$ , destacándose las poblaciones de Villar del Ciervo y Villar de la Yegua.

El agua de abastecimiento municipal en ambas poblaciones, se recogía de pozos de antiguas prospecciones mineras no explotadas. En Villar del Ciervo en el agua de pozo se detectaron valores de  $1.100 \text{ Bq/l}$ , mientras en las casas los valores fueron más bajos del orden de  $400 \text{ Bq/l}$ . En Villar de la Yegua, las concentraciones fueron más elevadas tanto en el depósito como en las viviendas, midiéndose en estas últimas concentraciones de  $16.000 \text{ Bq/l}$ .

Las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ , fueron generalmente inferiores a  $0,05 \text{ Bq/l}$ , siendo únicamente las aguas de la población de Villar de la Yegua, donde se detectaron valores relativamente elevados de dichos isótopos, del orden de  $0,9 \text{ Bq/l}$ , valor próximo al correspondiente al nivel de notificación ( $1 \text{ Bq/l}$ ), indicado en la Guía de Seguridad GSG-7,7(Rev1) del CSN [47].

En esta población se midieron también valores elevados de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total [48], estando en los meses lluviosos (marzo), los valores de actividad  $\alpha$ , comprendidos entre  $0,24$  y  $6,9 \text{ Bq/l}$  y los de actividad  $\beta$  entre el  $\text{LID}$  y  $7,2 \text{ Bq/l}$ , mientras que en los meses secos (septiembre), los valores fueron más elevados. Los valores de actividad  $\alpha$  estuvieron comprendidos entre  $9,9$  y  $13,6 \text{ Bq/l}$  y los de actividad  $\beta$  entre  $7,2$  y  $12 \text{ Bq/l}$ .

Estos valores según los autores [48] se encontraban entre los más elevados que aparecían en la bibliografía, citándose las siguientes referencias [49] [50].

La población de Villar de la Yegua, como resultado de los estudios realizados se consideró un caso singular en el país, de exposición a la radiación natural, indicándose que debería de estudiarse en más detalle esta población y otras próximas [51] [52].

### 3. Estudios específicos

Una vez identificadas las zonas de la Sierra de Guadarrama y la población de Villar de la Yegua, como

lugares con valores elevados de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de las viviendas, se llevó a cabo un estudio específico de dichas zonas, mediante un nuevo acuerdo específico [29] entre el CSN y la Universidad de Cantabria.

#### 3.1. Estudio de las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama

El objetivo del estudio fue estimar las dosis que estarían recibiendo los habitantes de poblaciones ubicadas en dichas zonas.

##### 3.1.1. Arribes del Duero

Por parte de la Subdirección de Protección Radiológica, se consideró la necesidad de estudiar la zona del entorno de la población de Villar de la Yegua, con objeto de identificar otros posibles núcleos habitados en los que pudieran darse las mismas o análogas condiciones radiológicas, al estar localizadas sobre el mismo sustrato geológico.

En el estudio llevado a cabo se consideró la medida de los siguientes parámetros:

- Niveles de radón en el interior de las viviendas.
- Niveles de radiación gamma en el exterior e interior de las viviendas.
- Concentración de radionucleidos naturales en aguas de consumo.
- Concentración de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en suelos.

#### Niveles de radón en el interior de las viviendas

Las medidas de concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de las viviendas, se realizaron en las siguientes poblaciones:

|                         |                   |
|-------------------------|-------------------|
| Ahígal de los Aceiteros | Lumbrales         |
| Aldea del Obispo        | Olmedo de Comaces |
| Bañobárez               | Puerto Seguro     |
| Bermellar               | Saelices el Chico |

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Bogajo                  | San Felices de los Gallegos |
| Castillejo Martín Viejo | Saucelle                    |
| Cerralbo                | Sobradillo                  |
| Fuenteliente            | Villar de Argañán           |
| Hinojosa de Duero       | Villar del Ciervo           |
| La Bouza                | Villar de la Yegua          |
| La Fregeneda            | Villavieja de Yeltes        |
| La Redonda              |                             |

Las medidas se realizaron en un total de 56 casas de la zona, durante dos periodos, un período anual (septiembre 95-septiembre 96) y un período semestral (octubre 95-abril 96).

Los valores medios anuales obtenidos en cada una de las poblaciones y en el conjunto de la zona [30], junto con el rango de valores, se exponen en la tabla 14.

Tabla. 14. Concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de viviendas (Arribes del Duero)

| Población                   | Número de casas | Valor medio* Bq/m <sup>3</sup> | Rango de valores |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| Ahigal de los Aceiteros     | 2               | 107                            | 107-107          |
| Aldea del Obispo            | 1               | 126                            |                  |
| Bañobarez                   | 4               | 57                             | 41-89            |
| Bermellar                   | 3               | 234                            | 152-364          |
| Bogajo                      | 2               | 100                            | 78-122           |
| Castillejo Martín Viejo     | 2               | 203                            | 159-248          |
| Cerralbo                    | 2               | 122                            | 122-122          |
| Fuenteliente                | 2               | 74                             | 74-74            |
| Hinojosa de Duero           | 2               | 76                             | 52-100           |
| La Bouza                    | 3               | 121                            | 63-181           |
| La Fregeneda                | 2               | 98                             | 59-137           |
| La Redonda                  | 3               | 222                            | 174-311          |
| Lumbrales                   | 3               | 132                            | 56-263           |
| Olmedo de Comaces           | 2               | 74                             | 74-74            |
| Puerto Seguro               | 2               | 61                             | 55-67            |
| Saelices el Chico           | 2               | 300                            | 111-488          |
| San Felices de los Gallegos | 2               | 115                            | 115-115          |
| Saucelle                    | 2               | 159                            | 159-159          |
| Sobradillo                  | 2               | 111                            | 111-111          |
| Villar de Argañán           | 2               | 142                            | 104-181          |
| Villar del Ciervo           | 2               | 142                            | 104-181          |
| Villar de la Yegua          | 6               | 597                            | 133-1.654        |
| Villavieja de Yeltes        | 3               | 178                            | 107-359          |
| Zona de estudio             | 56              | 185                            | 41-1.654         |

\* Valor medio aritmético

De los datos reflejados en la tabla, destacan los de la población de Villar de la Yegua con un valor medio anual de 597,5 Bq/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 1.654 Bq/m<sup>3</sup>. Estos valores se incrementaron en el período invernal ya que se obtuvo un valor medio de 995 Bq/m<sup>3</sup> y un máximo de 2.368 Bq/m<sup>3</sup>.

Considerando los resultados obtenidos en Villar de la Yegua en el presente estudio y en el estudio previo, donde se realizaron medidas en 29 casas, se tendría una concentración media aritmética de radón en la población de 1.790 Bq/m<sup>3</sup>, y una media geométrica de 740 Bq/m<sup>3</sup>, presentando el 71,4% de las casas donde se realizaron medidas concentraciones superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup> [33], valor recomendado por la Unión Europea a sus Estados miembros para iniciar acciones de remedio [15].

El resto de las poblaciones no mostraron valores tan llamativos, siendo las localidades con valores medios más elevados superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> las siguientes, Saelices el Chico, Bermellar, La Redonda y Castillejo Martín Viejo. El grupo investigador realizó en agosto de 1998 una campaña de medidas (40 en total), utilizando células de centelleo, en las cuatro poblaciones señaladas, obteniendo en promedio valores similares a los indicados, superiores a 200 Bq/m<sup>3</sup> [53].

En un 29% de las casas de esta zona donde se realizaron medidas, la mayoría pertenecientes a la población de Villar de la Yegua, mostraron concentraciones superiores de 400 Bq/m<sup>3</sup>. Este hecho implica que dicha zona debería de considerarse como "radon-prone area" según lo indicado en la publicación 65 de la CIPR [41].

#### Niveles de radiación gamma

Se realizaron medidas de los niveles de radiación  $\gamma$ , tanto en el exterior como en el interior de las viviendas de diferentes poblaciones de la zona.

El número de puntos de medida fue de 93 y las medidas se llevaron a cabo con un detector Geiger-Müller diseñado especialmente para medir niveles ambientales de radiación  $\gamma$ . Las medidas se realizaron a una altura de 1 metro sobre el terreno, excluyendo

la contribución debida a la radiación cósmica y al fondo del instrumento.

El valor medio de dosis absorbida en la zona, considerando las medidas realizadas en el exterior de las viviendas fue de 75,12 nGy/h con un rango comprendido entre 25 nGy/h y 195 nGy/h. El valor medio obtenido en el interior de las viviendas fue de 118,3 nGy/h con un rango comprendido entre 36,1 y 311,4 nGy/h.

Los valores más elevados tanto en el exterior como en el interior se obtuvieron en la misma población, Pozos de Hinojo.

Otra población donde se midieron valores elevados fue Villar de la Yegua donde los niveles en el exterior y en el interior fueron respectivamente de 182,8 y 290,6 nGy/h valores que supondrían una dosis por radiación externa de 2,35 mSv/año. En estos valores no estaría incluida la contribución de la radiación cósmica.

La relación media para la zona entre los niveles medidos en el interior y exterior de las viviendas fue de 1,58.

Como criterio de comparación se pueden reseñar los valores obtenidos por el mismo grupo investigador, en un estudio previo a nivel nacional en el cual se realizaron 1.000 medidas de niveles de radiación  $\gamma$  en el exterior de las viviendas, obteniéndose un valor medio<sup>1</sup> para el país de dosis absorbida en aire de 38,4 nGy/h, con un rango de 25 y 82,67 nGy/h [34] [35].

#### Concentración de radionucleidos naturales en suelos

Los radionucleidos naturales considerados, fueron <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th. Para la realización de la toma de muestras se seleccionaron 93 puntos de la zona, la mayoría de ellos coincidentes con núcleos habitados. En las muestras recogidas y después del tratamiento adecuado de las mismas se determinaron estos isótopos mediante espectrometría gamma.

<sup>1</sup> Valor medio geométrico.

En la tabla 15 se recogen los valores medios de las concentraciones de actividad de los isótopos indicados, así como el rango [30].

Tabla 15. Concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en suelos (Arriales del Duero)

| Isótopo           | Valor medio <sup>a</sup> Bq/kg | Rango     |
|-------------------|--------------------------------|-----------|
| $^{40}\text{K}$   | 866,7                          | 264-1.566 |
| $^{226}\text{Ra}$ | 57,4                           | 12-300    |
| $^{232}\text{Th}$ | 46,7                           | 7,3-253   |

<sup>a</sup> Media aritmética.

A la vista de los resultados, puede indicarse, que los valores obtenidos en la zona de estudio, son superiores a los correspondientes valores medios determinados mediante el estudio a nivel nacional realizado por el mismo grupo investigador, en el que se analizaron 952 muestras recogidas en distintas zonas de todo el país [18] [19].

Los valores medios nacionales obtenidos en dicho estudio fueron los siguientes:  $^{40}\text{K}$  (578 Bq/kg),  $^{226}\text{Ra}$  (38,9 Bq/kg), y  $^{232}\text{Th}$  (41 Bq/kg).

Los valores individuales más elevados de los diferentes isótopos, se obtuvieron en las siguientes localizaciones:

Las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ , en las poblaciones de Villar de la Yegua (300 Bq/kg) y Villar de Argañán (165 Bq/kg), las de  $^{232}\text{Th}$ , con 253 Bq/kg en Pozos de Hinojo. En el caso del  $^{40}\text{K}$  los valores más elevados dentro de núcleos habitados, se midieron en las poblaciones de Centenares con 1.422 Bq/kg y Lumbrales con 1.380 Bq/kg.

#### Concentraciones de actividad en aguas de consumo

Aunque con anterioridad al desarrollo de este proyecto, el equipo investigador había llevado a cabo estudios de las aguas potables de la zona [46] [48] [54], dentro del proyecto se consideró más apropiado

estudiar un número mayor de poblaciones, por lo que se recogieron y analizaron en un primer programa, muestras de abastecimientos y fuentes de 24 poblaciones. En las muestras se llevaron a cabo análisis de los índices de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total y de  $^{226}\text{Ra}$ .

Los valores medios de concentraciones de actividad, así como el rango de los mismos, para cada una de las poblaciones y para la totalidad de la zona se exponen en la tabla 16. De los datos expuestos, destacan los correspondientes a la población de La Redonda por lo elevado de los índices de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total, con valores medios de 0,76 y 2,86 Bq/l respectivamente. Los valores más elevados de dichos índices se obtuvieron en dos de los tres lugares de muestreo, con 1,4 y 1,3 Bq/l de concentración de actividad  $\alpha$  total y 3,0 y 3,5 Bq/l de concentración de actividad  $\beta$  total. En estas aguas se obtuvieron también valores relativamente elevados de  $^{226}\text{Ra}$ , con 0,37 y 0,76 Bq/l.

En una segunda fase se volvieron a recoger muestras de agua en las siguientes poblaciones, Bañobarez, Castillejo de Martín Viejo, Cerralbo, Fuenteliante, La Redonda, Saelices el Chico, Sobradillo y Villar de la Yegua, incluyéndose adicionalmente Barruecopardo y Ciudad Rodrigo. En las muestras se realizó la determinación de los índices de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total y de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  y de  $^{226}\text{Ra}$  (en algunas de las muestras). Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 17.

De los valores expuestos en ambas tablas conviene destacar los valores más elevados detectados en la población de La Redonda, con valores máximos de actividad  $\alpha$  total de 1 y 0,7 Bq/l y de  $\beta$  total de 2,4 y 2,6 Bq/l.

Llama la atención el valor de concentración de actividad de  $^{226}\text{Ra}$ , obtenido en uno de los lugares de muestreo de la población de Sobradillo con una concentración de 4,2 Bq/l (valor que ha sido confirmado por el grupo investigador) y que duplica el nivel de actuación que para ese isótopo viene reflejado en la Guía de Seguridad 7.7 (Rev 1) del CSN [47].

<sup>a</sup> Los análisis de  $^{226}\text{Ra}$  se realizaron en aquellas muestras que superaron el valor de 0,1 Bq/l de concentración de actividad  $\alpha$  total.

Tabla 16. Concentraciones de actividad en aguas de consumo (Arribes del Duero). Bq/l

| Población                   | Número de puntos de muestreo | $\alpha$ total    | $\beta$ total    | $^{226}\text{Ra}$   |
|-----------------------------|------------------------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Ahigal de los Aceiteros     | 4                            | 0,09 (LID-0,15)   | 0,11 (0,07-0,20) | LID                 |
| Aldea del Obispo            | 3                            | 0,05 (LID-0,07)   | LID              | —                   |
| Bañobarez                   | 3                            | 0,11 (LID-0,22)   | 0,20 (0,1-0,35)  | 0,026 (0,012-0,040) |
| Bermellar                   | 3                            | LID               | 0,47 (0,45-0,50) | —                   |
| Bogajo                      | 5                            | LID               | 0,13 (LID-0,15)  | —                   |
| Castillejo de Martín Viejo  | 6                            | 0,19 (LID-0,30)   | 0,20 (LID-0,3)   | 0,096 (LID-0,19)    |
| Cerralbo                    | 3                            | 0,21 (LID-0,32)   | 0,26 (0,20-0,32) | 0,076 (0,056-0,089) |
| Fuenteliante                | 3                            | 0,24 (LID-0,50)   | 0,26 (LID-0,30)  | 0,056 (0,045-0,065) |
| Hinojosa de Duero           | 2                            | 0,12 (LID-0,14)   | 0,30 (0,20-0,40) | LID                 |
| La Bouza                    | 3                            | 0,086 (0,035-0,2) | 0,15 (0,10-0,25) | LID                 |
| La Fregeneda                | 3                            | 0,04 (LID-0,04)   | 0,11 (0,06-0,20) | —                   |
| La Redonda                  | 3                            | 0,72 (0,21-1,40)  | 2,86 (1,5-3,5)   | 0,264 (0,049-0,76)  |
| Lumbrals                    | 10                           | 0,05 (LID-0,06)   | 0,13 (LID-0,20)  | —                   |
| Olmedo de Comaces           | 3                            | 0,06 (LID-0,06)   | 0,10 (LID-0,10)  | —                   |
| Puerto Seguro               | 2                            | 0,15 (0,10-0,20)  | 0,1 (LID-0,1)    | LID                 |
| Retortillo                  | 2                            | LID               | 0,10 (LID-0,10)  | —                   |
| Saelices el Chico           | 3                            | 0,14 (LID-0,30)   | 0,087 (0,06-0,1) | 0,014 (LID-0,014)   |
| Saucelle                    | 5                            | 0,05 (LID-0,05)   | 0,086 (LID-0,10) | —                   |
| San Felices de los Gallegos | 4                            | 0,035 (LID-0,035) | 0,10 (LID-0,10)  | —                   |
| Sobradillo                  | 3                            | 0,20 (LID-0,25)   | 0,28 (0,20-0,35) | LID                 |
| Villar de Argañán           | 3                            | 0,06 (LID-0,06)   | 0,17 (LID-0,20)  | —                   |
| Villar del Ciervo           | 3                            | 0,04 (LID-0,04)   | 0,20 (LID-0,30)  | —                   |
| Villar de la Yegua          | 7                            | 0,36 (LID-0,7)    | 0,48 (LID-2,3)   | 0,395 (0,20-0,63)   |
| Villavieja de Yeltes        | 7                            | 0,08 (LID-0,10)   | 0,19 (LID-0,42)  | —                   |
| Zona de estudio             | 93                           | 0,20 (LID-1,40)   | 0,34 (LID-3,5)   | 0,20 (LID-0,76)     |

LID  $\alpha_i = 0,03$  Bq/l; LID  $\beta_i = 0,05$  Bq/l; LID  $^{226}\text{Ra} = 0,003$  Bq/l.

Tabla 11. Concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total en aguas potables (Arriales del Duero) (Bq/l)

| Población                  | Número de puntos de muestreo | $\alpha$ total   | $\beta$ total   | $^{222}\text{Rn}$ | $^{226}\text{Ra}$  |
|----------------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Bañobarez                  | 1                            | 0,07             | LID             | 68                | —                  |
| Barruecopardo              | 1                            | LID              | 0,06            | 1,5               | —                  |
| Castillejo de Martín Viejo | 1                            | LID              | LID             | —                 | —                  |
| Cerralbo                   | 2                            | 0,17 (0,13-0,21) | 0,3 (LID-0,3)   | 123*              | 0,236 (0,15-0,36)  |
| Ciudad Rodrigo             | 1                            | LID              | LID             | —                 | —                  |
| Fuenteliente               | 1                            | 0,08             | LID             | 3,5               | —                  |
| La Redonda                 | 3                            | 0,52 (0,06-1,0)  | 1,76 (0,5-2,4)  | 27*               | 0,087 (0,075-0,10) |
| Saelices el Chico          | 1                            | 0,04             | 0,06            | —                 | —                  |
| Sobradillo                 | 3                            | 0,11 (0,05-0,15) | LID             | 59*               | 4,2 (LID-4,2)      |
| Villar de la Yegua         | 2                            | 0,17 (LID-0,17)  | 0,12 (LID-0,12) | 205*              | 0,35               |
| Zona de estudio            | 15                           | 0,22 (LID-1)     | 0,83 (LID-2,4)  | 69,57 (1,5-205)   | 0,81 (0,07-4,2)    |

\* Los resultados corresponden a un único punto de muestreo; LID  $\alpha$  = 0,025 Bq/l; LID  $\beta$  = 0,04 Bq/l; LID  $^{226}\text{Ra}$  = 0,003 Bq/l; LID  $^{222}\text{Rn}$  = 2 Bq/l.

También hay que señalar el descenso en los valores de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total detectado en las aguas de Villar de la Yegua con respecto a los muestreos iniciales. Este hecho fue debido al cambio realizado en la captación de aguas para el abastecimiento de la población.

#### Estimación de dosis

Conforme a lo indicado en el correspondiente acuerdo específico, se realizó la estimación de las dosis que estarían recibiendo los habitantes de las poblaciones estudiadas. Las vías de exposición consideradas fueron las siguientes, inhalación de radón, exposición externa a la radiación gamma e ingestión de agua potable.

Las mayores dosis se estarían recibiendo por inhalación de radón, el valor medio estimado para la zona fue de 3,02 mSv/año, con un valor máximo en la población de Villar de la Yegua con 42,16 mSv/año. Esta población de acuerdo al censo del año 2001 [55] tiene una población de 285 habitantes.

En relación con la exposición a la radiación gamma, el valor medio de la zona se estimó en 0,73 mSv/año, con un valor máximo correspondiente a la población de Pozos de Hinojo de 1,53 mSv/año.

En la ingestión de agua de bebida se consideraron despreciables las dosis de las mayoría de las poblaciones, con excepción de los municipios de Cerralbo, La Redonda y Sobradillo. En las dos primeras las dosis respectivas fueron de 0,20 y 0,85 mSv.

Un caso especial puede considerarse a la población de Sobradillo, donde en el agua de una de las fuentes, las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{222}\text{Rn}$  detectadas darían lugar a una dosis de 4,15 mSv.

Las aguas de las poblaciones de La Redonda y Sobradillo, se deberían de estudiar más ampliamente, identificando el uso que la población hace de las mismas y en su caso determinar el contenido de los principales radionucleidos naturales.

3.1.2. Sierra de Guadarrama

El estudio radiológico de la zona de la Sierra de Guadarrama, surgió como consecuencia de la identificación en dicha zona [12] [13], de valores elevados de concentraciones de radón en algunas poblaciones, como El Escorial, Manzanares el Real, Miraflores de la Sierra, Navacerrada y Navas del Rey.

En el estudio radiológico realizado se consideraron los siguientes parámetros:

- Niveles de radón en el interior de las viviendas.
- Niveles de radiación gamma en el exterior e interior de las viviendas.
- Concentración de radionucleidos naturales en aguas de consumo.
- Concentración de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, y <sup>232</sup>Th en suelos.

Niveles de radón en el interior de las viviendas

Como se ha indicado anteriormente, en un estudio previo realizado por el grupo investigador de la Universidad de Cantabria en la zona de la Sierra de

Guadarrama [12] [13], se identificaron una serie de poblaciones en las que existían algunas casas con valores superiores a 1.000 Bq/m<sup>3</sup>. Estas poblaciones fueron El Escorial, Manzanares el Real, Miraflores de la Sierra, Navacerrada y Navas del Rey [51] [52].

En el nuevo estudio se consideraron las siguientes poblaciones:

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| Aoslos                  | Navacerrada                 |
| La Cabrera              | Navas del Rey               |
| Cercedilla              | Rascafría                   |
| El Escorial             | San Martín de Valdeiglesias |
| Guadarrama              | Talamanca del Jarama        |
| Hoyo de Manzanares      | Valdemorillo                |
| Manzanares el Real      | Villar del Prado            |
| Miraflores de la Sierra |                             |

Las medidas se realizaron en un total de 58 casas durante dos períodos, un período anual (septiembre 96-septiembre 97) y un período semestral (abril 97-septiembre 97).

Los valores medios anuales obtenidos en cada una de las poblaciones y en el conjunto dela zona [30], junto con el rango de valores se expone en la tabla 18.

Tabla 18. Concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior de viviendas (Sierra de Guadarrama)

| Población                   | Número de casas | Valor medio* Bq/m <sup>3</sup> | Rango de valores |
|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|
| Aoslos                      | 3               | 73                             | 51-96,2          |
| La Cabrera                  | 4               | 122                            | 82-155           |
| Cercedilla                  | 3               | 384                            | 63-984           |
| El Escorial                 | 4               | 309                            | 222-511          |
| Guadarrama                  | 4               | 165                            | 126-203          |
| Hoyo de Manzanares          | 5               | 155                            | 67-274           |
| Manzanares el Real          | 3               | 127                            | 101-172          |
| Miraflores de la Sierra     | 4               | 185                            | 85-318           |
| Navacerrada                 | 5               | 367                            | 166-548          |
| Navas del Rey               | 5               | 106                            | 41-196           |
| Rascafría                   | 4               | 152                            | 51-318           |
| San Martín de Valdeiglesias | 4               | 166                            | 14-318           |
| Talamanca del Jarama        | 3               | 109                            | 65-170           |
| Valdemorillo                | 3               | 54                             | 26-104           |
| Villar del Prado            | 4               | 52                             | 22-100           |
| Zona de Estudio             | 58              | 172                            | 14-984           |

\* Valor medio aritmético.

Mediante los resultados obtenidos en el nuevo estudio, se siguieron observando valores relativamente elevados de  $^{222}\text{Rn}$  en las poblaciones de El Escorial y Navacerrada donde se obtuvieron respectivamente valores medios anuales de 309 y 367 Bq/m<sup>3</sup> y valores máximos de 511 y 548 Bq/m<sup>3</sup>. Se encontró una nueva población Cercedilla donde a través de las medidas realizadas en tres viviendas se obtuvo un valor anual medio de 384 Bq/m<sup>3</sup> y un valor máximo de 984 Bq/m<sup>3</sup>.

El valor medio obtenido para la zona teniendo en cuenta únicamente los datos obtenidos en este estudio fue de 172 Bq/m<sup>3</sup>, valor 4,13 veces más elevado que el valor medio nacional [55] 41,6 Bq/m<sup>3</sup>.

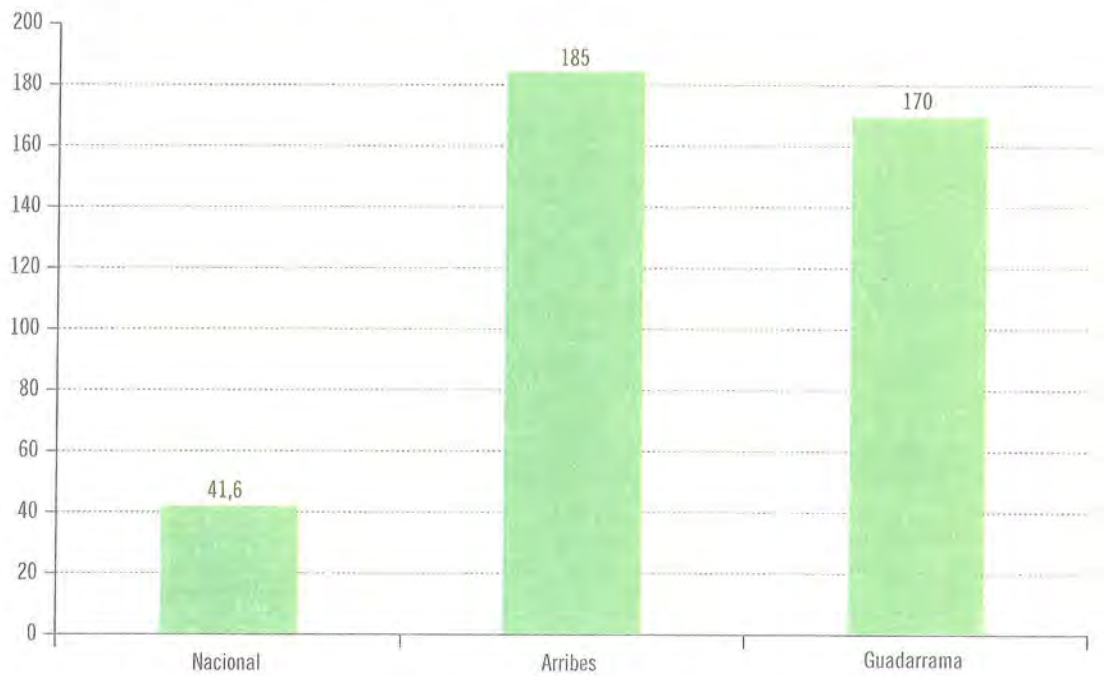
Considerando los resultados obtenidos en ambos estudios, el valor medio de la zona sería de 233 Bq/m<sup>3</sup> unas 5,6 veces más elevado que el valor medio nacional.

Considerando ambos estudios, el porcentaje de casas donde se midieron concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>, fue de un 12,7%. Este hecho hace que dicha zona pueda clasificarse también como una "radon-prone área" [41].

#### Niveles de radiación gamma

Se llevaron a cabo un total de 55 medidas de los niveles de radiación  $\gamma$ , en el exterior e interior de al-

Figura 1. Concentraciones medias de radón en viviendas Bq/m³



gunas de las viviendas de una serie de poblaciones de la zona de estudio.

El valor medio obtenido en la zona, considerando las medidas realizadas en el exterior de las viviendas fue de 91,86 nGy/h con un rango comprendido entre 41,4 y 135,8 nGy/h, este último valor obtenido en la población de Fresnedillas de la Oliva.

Considerando las medidas realizadas en el interior, el valor medio fue de 148, con un rango comprendido entre 68,7 y 218,2 nGy/h.

La relación obtenida para la zona entre los niveles medidos en el interior y exterior de las viviendas fue de 1,61.

En la figura 2 se comparan los valores medios obtenidos en las zonas de los Arribes del Duero y de la Sierra de Guadarrama con el valor medio del estudio realizado a nivel nacional.

Concentraciones de radionucleidos naturales en suelos

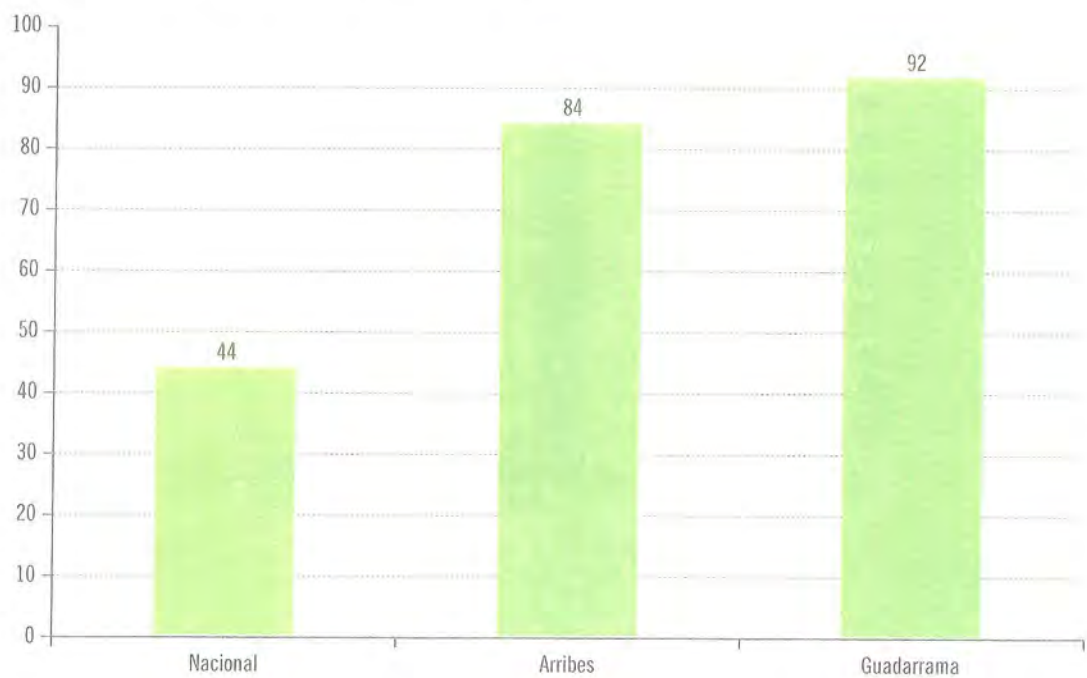
Los isótopos medidos fueron también <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra, y <sup>232</sup>Th. Las muestras se recogieron en 25 localizaciones de la zona, la mayoría de ellas coincidentes con núcleos habitados. En la tabla 19, se muestran los valores medios de las concentraciones de actividad de los isótopos indicados así como su rango.

Tabla 19. Concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos (Sierra de Guadarrama)

| Isótopo           | Valor medio* Bq/kg (rango) |
|-------------------|----------------------------|
| <sup>40</sup> K   | 914,0 (631-1.100)          |
| <sup>226</sup> Ra | 46,2 (14,3-78,6)           |
| <sup>232</sup> Th | 62,0 (14,1-144,5)          |

\* Media aritmética.

Figura 2. Valores medios de niveles de radiación gamma exterior nGy/h



En la tabla 20, se comparan los valores obtenidos en la Sierra de Guadarrama con los de los Arribes del

Duero y aquellos obtenidos en el estudio a nivel nacional.

Tabla 20. Concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos. Estudio nacional, Arribes del Duero y Sierra de Guadarrama

| Isótopo           | Estudio nacional | Arribes del Duero | Sierra de Guadarrama |
|-------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| <sup>40</sup> K   | 578 (31-2040)    | 866,7 (264-1566)  | 914 (631-1.100)      |
| <sup>226</sup> Ra | 38,9 (8-310)     | 57,4 (12-300)     | 46,16 (14,3-78,6)    |
| <sup>232</sup> Th | 41 (5-258)       | 46,7 (7-253)      | 62,01 (14,1-144,5)   |

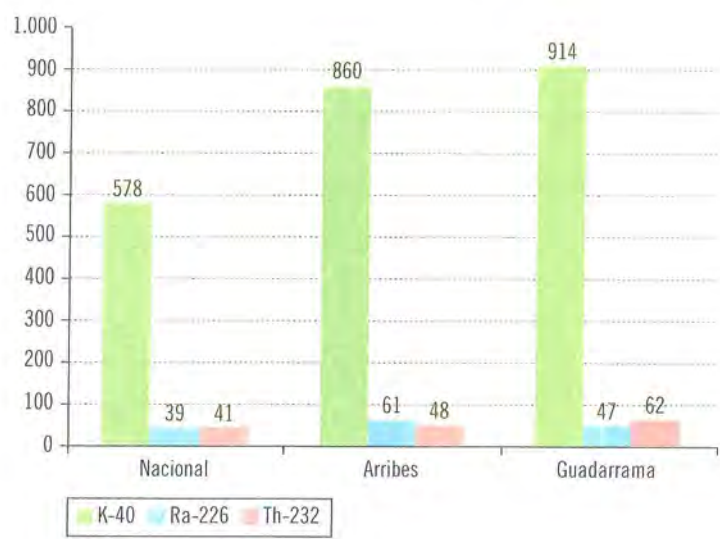
Esta comparación está también reflejada en la figura 3. Como puede observarse, los valores medios de los tres radionucleidos, son más elevados en las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama que los que podrían considerarse como valores medios representativos del país.

Concentraciones de actividad en aguas de consumo

Aunque en un principio se consideró en el estudio, la vía de ingestión de agua potable, no se desarro-

lló en su totalidad debido al origen superficial de las aguas de los correspondientes abastecimientos, que dio lugar a valores muy bajos en los análisis que se realizaron en las aguas de abastecimiento de poblaciones como La Cabrera, El Escorial, Hoyo de Manzanares, Miraflores de la Sierra y San Martín de Valdeiglesias. Este hecho dio lugar a la suspensión del estudio de esta vía, debido a su escasa significación radiológica. En la tabla 21 se recogen los resultados obtenidos de los análisis realizados de <sup>226</sup>Ra y <sup>222</sup>Rn.

Figura 3. Valores medios de concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos de las zonas de los Arribes del Duero y de la Sierra de Guadarrama (Bq/kg)



Estimación de dosis

La estimación de las dosis que estarían recibiendo los habitantes de la zona, se realizó considerando únicamente las vías de exposición interna al radón y

de exposición externa a la radiación  $\gamma$ . No se consideró la ingestión de agua potable, debido a las bajas concentraciones obtenidas de los isótopos analizados (<sup>222</sup>Rn y <sup>226</sup>Ra) que la mayoría de las veces fueron reportadas como valores LID.

Tabla 21. Concentraciones de <sup>226</sup>Ra y <sup>222</sup>Rn en aguas potables. Sierra de Guadarrama (Bq/l)

| Población                   | Número de puntos de muestreo | <sup>226</sup> Ra  | <sup>222</sup> Rn |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|
| La Cabrera                  | 1                            | < LID              | <LID              |
| El Escorial                 | 1                            | < LID              | <LID              |
| Miraflores de la Sierra     | 2                            | 0,004 (LID-0,004)  | <LID              |
| San Martín de Valdeiglesias | 1                            | 0,006              | <LID              |
| Hoyo de Manzanares          | 2                            | 0,004 (LID-0,004)  | <LID              |
| Zona de estudio             | 6                            | 0,0046 (LID-0,006) | <LID              |

LID <sup>226</sup>Ra = 0,003 Bq/l; LID <sup>222</sup>Rn = 2 Bq/l

En la vía de exposición interna por inhalación de radón se obtuvo un valor medio para la zona de 3,04 mSv/año, con un valor máximo de 30,4 mSv/año en

la población de Cercedilla. En el caso de la exposición a la radiación  $\gamma$  el valor medio estimado fue de 0,83 mSv/año, con un valor máximo de 1,07 mSv/año.

### 3.2. Estudio en el entorno de las centrales nucleares

Con fecha 6 de octubre de 1997, se firmó un nuevo acuerdo entre el CSN y la Universidad de Cantabria para la evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas [57].

El objetivo general del proyecto fue la evaluación de las dosis debidas a la radiación natural que estarían recibiendo las poblaciones situadas en el entorno de las centrales nucleares.

Las actividades desarrolladas en cada una de las zonas estudiadas fueron las siguientes [58] [59]:

- Obtención de muestras suelos y realización de los análisis pertinentes para determinar las concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ .
- Medida de los niveles de radiación  $\gamma$  en el exterior e interior de las viviendas seleccionadas en las diferentes poblaciones elegidas.
- Medida de los niveles de radón en el interior de las viviendas seleccionadas en las distintas pobla-

ciones, analizando las variaciones estacionales de las concentraciones medidas.

- Estimación de las dosis recibidas por los habitantes de las diferentes zonas, por la totalidad y cada una de las vías de exposición.

#### Concentración de radionucleidos naturales en suelos

En total se recogieron 293 muestras de suelos, en las que se realizaron los análisis indicados. Los resultados obtenidos están recopilados en la tabla 22.

La zona del entorno de la central nuclear de Almaraz, es donde se midieron los valores más elevados de los tres isótopos. A. Baeza mediante el estudio realizado en la provincia de Cáceres, donde recogió muestras en 263 localizaciones, obtuvo los valores que se exponen en la tabla 23, similares a los obtenidos en el estudio realizado por la Universidad de Extremadura (Cáceres) en suelos de la provincia de Cáceres.

A. Baeza destaca la variabilidad de los valores, asociados a los distintos tipos de suelos, indicando que los valores más elevados se obtuvieron en las muestras recogidas en las zonas de suelos graníticos [60].

Tabla 22. Concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en suelos (Bq/kg). Centrales nucleares

| Instalación           | Isótopos          |                   |                   |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                       | $^{40}\text{K}$   | $^{226}\text{Ra}$ | $^{232}\text{Th}$ |
| Almaraz               | 716,6 (139-1.698) | 50,3 (14,4-128,3) | 51,1 (14,0-144,0) |
| Ascó-Vandellós        | 371,8 (70-950)    | 23,9 (9,5-51,5)   | 29,4 (5,6-56,6)   |
| Cofrentes             | 371,4 (90-1.166)  | 18,9 (8,77-32,3)  | 28,8 (12-47,7)    |
| José Cabrera          | 295,3 (73-669)    | 19,5 (5,4-63,5)   | 18,02 (2,1-57,4)  |
| Santa María de Garoña | 277,5 (102-476)   | 23,6 (11,9-71,69) | 28,5 (7,6-45,4)   |
| Trillo                | 411,8 (111-672)   | 20,9 (6,2-44,2)   | 30,14 (2,5-90,4)  |

Figura 4. Valores medios de concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos, Central nuclear de Almaraz y provincia de Cáceres

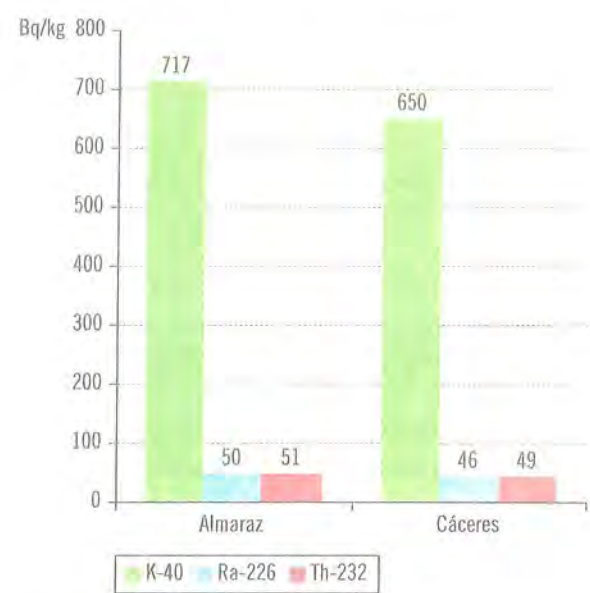


Tabla 23. Concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos. Provincia de Cáceres. Bq/kg

| Isótopos        |                   |                   |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| <sup>40</sup> K | <sup>226</sup> Ra | <sup>232</sup> Th |
| 650 (48-1.586)  | 46 (13-165)       | 49 (7-204)        |

Niveles de radiación gamma

La medida de los niveles de radiación gamma, se realizó en las localizaciones donde se recogieron las muestras de suelos, llevándose a cabo medidas tanto en el exterior como en el interior de las viviendas. En total se hicieron 586 medidas.

Las medidas de las tasas de dosis (nGy/h), se realizaron de acuerdo a la metodología descrita en [34] [35], a una altura de un metro sobre el suelo, excluyendo cualquier contribución tanto de la radiación cósmica como del fondo del instrumento.

En la tabla 24, se recogen los valores medios y el intervalo de las medidas de los niveles de radiación gamma realizados en el exterior e interior de las viviendas de las distintas zonas.

Tabla 24. Valores medios de los niveles de radiación gamma. Centrales nucleares

| Instalación           | Niveles de radiación (nGy/h) |              |
|-----------------------|------------------------------|--------------|
|                       | Exterior                     | Interior     |
| Almaraz               | 80 (36-211)                  | 119 (54-313) |
| Ascó-Vandellós        | 38 (19-84)                   | 46 (22-97)   |
| Cofrentes             | 30 (9-73)                    | 37 (20-82)   |
| José Cabrera          | 32 (9-62)                    | 43 (17-87)   |
| Santa María de Garoña | 32 (16-67)                   | 38 (21-82)   |
| Trillo                | 36 (11-69)                   | 52 (17-100)  |

En el emplazamiento de la central de Almaraz, fue donde se detectaron los valores más elevados, siendo en este emplazamiento las poblaciones de Jaraíz de la Vera (211 nGy/h exterior y 306 nGy/h interior) y Jarandilla de la Vera (209 nGy/h exterior y 313 nGy/h interior, donde se detectaron los valores más elevados.

Niveles de radón en el interior de las viviendas

Las medidas de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas, se llevaron a cabo en un total de 58 poblaciones.

En las viviendas seleccionadas en cada una de las poblaciones, se situaron los dosímetros de trazas durante un período comprendido entre los meses de abril y septiembre de 1998 y con objeto de conocer las variaciones estacionales, en algunas de las casas se colocó otro dosímetro adicional durante el período comprendido entre los meses de octubre y marzo.

En la tabla 25, se exponen los valores obtenidos en cada uno de las emplazamientos, valor medio y rango.

A la vista de los datos obtenidos, se desprende que en general no existe una problemática especial, relativa al radón en los emplazamientos de las diferentes centrales nucleares, principalmente en los de las centrales de

Tabla 25. Valores de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas. Centrales nucleares

| Instalación         | Concentración de radón (Bq/m³) |                  |
|---------------------|--------------------------------|------------------|
|                     | Media aritmética (Rango)       | Media geométrica |
| Almaraz             | 142<br>(22-640)                | 94               |
| Ascó-Vandellós      | 65<br>(8-129)                  | 34               |
| Cofrentes           | 18<br>(5-61)                   | 14               |
| José Cabrera-Trillo | 41<br>(12-116)                 | 34               |
| Santa M.ª de Garoña | 25<br>(9-50)                   | 23               |

Ascó, Cofrentes, José Cabrera, Santa María de Garoña, Trillo y Vandellós. En estos emplazamientos, no se obtuvo ningún valor superior a 400 Bq/m³ [15].

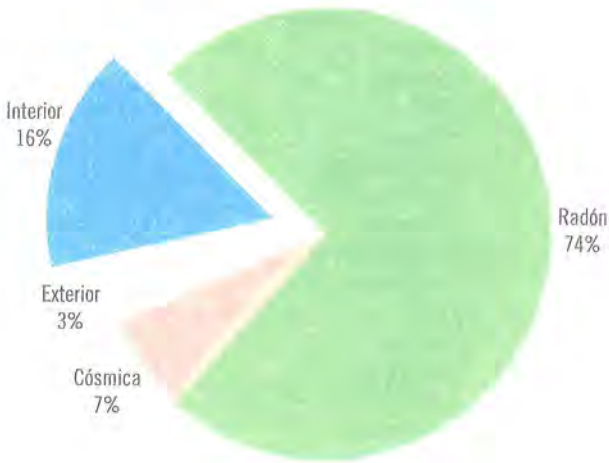
En el emplazamiento de la central nuclear de Almaraz se obtuvieron valores más elevados que en el resto, por ejemplo, el valor medio en este emplazamiento, fue cuatro veces superior al valor obtenido en la zona de la central de Cofrentes.

Los valores más elevados, se midieron en las poblaciones de Jarandilla y Jaraíz de la Vera. En esta zona el porcentaje de casas con valores superiores a 400 Bq/m³ fue de un 10%.

3.2.1. Estudio específico de la zona de la central nuclear de Almaraz

Como conclusión del estudio llevado a cabo en el entorno de las distintas centrales nucleares, se indicó que de los valores de dosis los de la zona de la central nuclear de Almaraz destacaban con un valor de 4,07 mSv/año, valor superior al obtenido en el resto de los emplazamientos, que estuvieron com-

Figura 5. Contribución de las distintas vías a las dosis. Central nuclear de Almaraz



prendidos entre 0,86 mSv/año (Cofrentes) y 1,50 mSv/año (Trillo).

El valor máximo de dosis (16 mSv/año), se obtuvo en la población de Jarandilla de la Vera, dosis debida en su mayor parte (87%) a la inhalación de <sup>222</sup>Rn.

Dados los valores más elevados obtenidos en el emplazamiento de la central nuclear de Almaraz y la principal contribución de la inhalación de radón existente en el interior de las viviendas (74% del valor medio de dosis estimado en la zona), se consideró adecuado ampliar el estudio de esta zona, realizando un mayor número de medidas de este isótopo en un número mayor de poblaciones, con objeto de tener una estimación más exacta de las dosis que pudieron estar recibiendo sus habitantes debido a las fuentes de radiación natural.

Con fecha 6 de abril de 2000, se firmó un acuerdo específico entre el CSN, Unesa y la Universidad de Cantabria, para la *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas. Estudio específico del Campo Arañuelo (Cáceres)* [61].

En la tabla 26 se presentan las poblaciones del entorno de la central de Almaraz seleccionadas, para la realización de las medidas de radón.

Tabla 26. Poblaciones del entorno de la central de Almaraz, consideradas en el estudio

| Sector | Población                | Habitantes* |
|--------|--------------------------|-------------|
| NW     | Serrejón                 | 525         |
|        | Toril                    | 224         |
|        | Majadas                  | 1.237       |
|        | Tejeda de Tietar         | 1.025       |
|        | Jaraiz de la Vera        | 6.768       |
|        | Torremenga               | 585         |
|        | Arroyomolinos de la Vera | 604         |
|        | Pasarón de la Vera       | 714         |
| NE     | Almaraz                  | 1.433       |
|        | Saucedilla               | 617         |
|        | Millanes                 | 253         |
|        | Casatejada               | 1.277       |
|        | Navalmoral de la Mata    | 14.874      |
|        | Peraleda de la Mata      | 1.454       |
|        | Talayuela                | 7.005       |
| SE     | Bohonal de Ibor          | 620         |
|        | Mesas de Ibor            | 202         |
|        | Peraleda de San Román    | 431         |
|        | Valdecañas de Tajo       | 140         |
|        | Campillo de la Deleitosa | 144         |
|        | Robledollano             | 453         |
|        | Fresnedoso de Ibor       | 448         |
| SW     | Deleitosa                | 953         |
|        | Romangordo               | 197         |
|        | Casas de Miravete        | 163         |
|        | Torreillas de la Tiesa   | 1.266       |
|        | Torrejón el Rubio        | 726         |

\* Padrón año 1998.

Durante el mes de abril del año 2000, se distribuyeron una serie de detectores pasivos de trazas, que estuvieron expuestos durante un período de cinco meses, procediéndose con posterioridad a su retirada y lectura.

En cada una de las poblaciones, se colocaron en general un total de 15 detectores. De un total de 380 detectores desplegados en la zona, se recuperaron el 90,78%. Adicionalmente y como parte de un programa de control de calidad, se situaron 55 detectores correspondientes al sistema de medida (Radosys), puesto a punto por el equipo investigador, estos dosímetros del programa de control de calidad se situaron en las poblaciones de Torremenga, Pasarón de la Vera, Tejeda de Tietar y Jaraiz de la Vera.

Los detectores se colocaron en general en viviendas de una sola planta, generalmente en las salas de estar y en algunos casos en dormitorios.

El valor medio de la concentración de radón en este segundo proyecto 65,7 Bq/m<sup>3</sup>, fue inferior al obtenido en el primer estudio, que fue de 93,9 Bq/m<sup>3</sup>, aspecto que confirmaba, la influencia de las poblaciones situadas en la zona norte (zona de La Vera), en los valores más elevados, ya que en el primer estudio, el porcentaje de poblaciones de la zona de La Vera fue del 33%, mientras en el estudio específico fue del 19%.

El valor medio en la zona de La Vera<sup>§</sup>, 114 Bq/m<sup>3</sup>, fue casi el doble que el estimado para el resto de la zona 65,7 Bq/m<sup>3</sup>. Los valores en la zona de La Vera, reflejan las características peculiares de esta zona [62], puestas de relieve también mediante el proyecto Marna [63] y debería de considerarse como una zona de elevados niveles de radón que habría que estudiar en más detalle en un futuro, con objeto de establecer medidas adecuadas de protección radiológica [64].

Con objeto de dar una visión más exacta de la situación radiológica de la zona de La Vera, se han considerado los resultados obtenidos de concentraciones de radón en todos los estudios que se han realizado hasta el momento en la zona [13] [58] [62].

Mediante estos estudios se realizaron un total de 104 medidas, obteniéndose un valor medio de 180,5 Bq/m<sup>3</sup>. En la tabla 27 se exponen los valores medios aritméticos y los porcentajes de medidas superiores a 200 y 400 Bq/m<sup>3</sup>, de las diferentes poblaciones y de la zona.

Las dosis debidas a la inhalación de radón, se estimaron siguiendo la metodología de la ICRP en su publicación 65 [41], mediante esta estimación se vio que la dosis media que recibiría la población del Campo Arañuelo sería de 1,6 mSv/año.

<sup>§</sup> Las poblaciones estudiadas fueron Arroyomolinos de la Vera, Torremenga, Jaraiz de la Vera, Pasarón y Tejeda de Tietar.

Este valor se incrementaría hasta un valor anual de 4 mSv en la zona de La Vera, alcanzando valores puntuales en algunas casas del orden de 25 mSv/año.

Las diferencias de las dosis estarían asociadas a las características geológicas de la zona ya que se pudo apreciar la buena correlación existente entre la presencia en las viviendas de niveles de radón elevados y la prevalencia en los suelos de rocas ácidas

formadas por cuarzos y feldespatos. Entre estas rocas destacan las pegmatitas que además de los componentes indicados contienen otros minerales como la uraninita, monacita o autunita, de naturaleza radiactiva.

En la tabla 28, se exponen los resultados de las dosis efectivas estimadas en el entorno de las centrales nucleares.

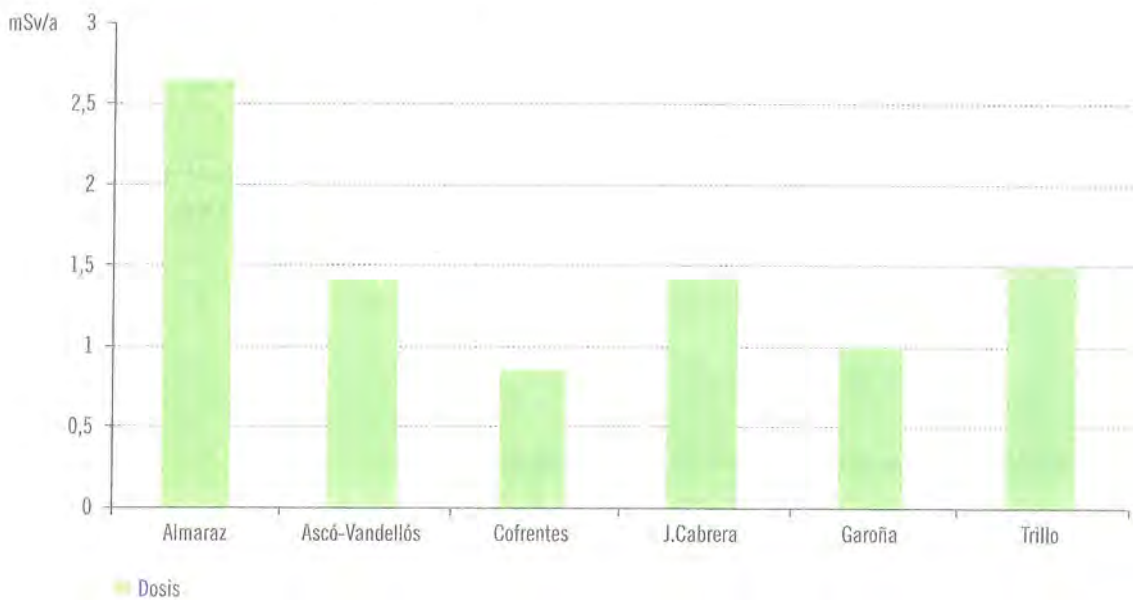
Tabla 27. Resultados de las medidas de concentraciones de radón. Zona y poblaciones de La Vera

| Población                | Valor medio Bq/m³ | Porcentaje > 200 | Porcentaje > 400 |
|--------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Arroyomolinos de la Vera | 301 (152-497)     | 75               | 25               |
| Jaraiz de la Vera        | 130 (20-530)      | 20               | 15               |
| Jarandilla de la Vera    | 196 (15-1.253)    | 36               | 12               |
| Pasarón de la Vera       | 233 (42-708)      | 27               | 20               |
| Tejeda de Tietar         | 151 (40-637)      | 21               | 7                |
| Torremenga               | 142 (51-347)      | 25               | 0                |
| Zona                     | 180,5 (15-1.253)  | 27               | 12               |

Tabla 28. Valores de dosis en el entorno de las diferentes centrales nucleares

| Zona                  | Dosis efectivas mSv/año |                     |                     |                  |       |
|-----------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------|
|                       | Rad. Cósmica            | Rad. Ext. Terrestre | Rad. Int. Terrestre | Inhalación Radón | Total |
| Almaraz               | 0,29                    | 0,11                | 0,65                | 1,60             | 2,65  |
| Ascó-Vandellós        | 0,28                    | 0,05                | 0,24                | 0,84             | 1,41  |
| Cofrentes             | 0,31                    | 0,04                | 0,29                | 0,32             | 0,86  |
| José Cabrera          | 0,32                    | 0,04                | 0,22                | 0,85             | 1,43  |
| Santa María de Garoña | 0,30                    | 0,04                | 0,20                | 0,46             | 1,00  |
| Trillo                | 0,33                    | 0,05                | 0,27                | 0,85             | 1,50  |

Figura 6. Dosis medias de radiación natural. Centrales nucleares



### 3.3. Estudio en el entorno de otras instalaciones del ciclo

Este nuevo estudio, con la finalidad de conocer las dosis de radiación que debido a las fuentes de origen natural, reciben los habitantes del entorno de las distintas instalaciones del ciclo de combustible existentes en nuestro país, se planteó como una continuación de la línea de investigación iniciada con el proyecto relativo a las centrales nucleares [57] [61].

Para la realización de este nuevo proyecto, se firmó un nuevo acuerdo específico de colaboración [65] entre el CSN y la Universidad de Cantabria, cuyo objetivo era la *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las instalaciones del ciclo del combustible*.

Las actividades llevadas a cabo para alcanzar este nuevo objetivo fueron las siguientes [66] [67]:

- Obtención de muestras suelos y realización de los análisis pertinentes para determinar las concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ .
- Medida de los niveles de radiación  $\gamma$  en el exterior e interior de las viviendas seleccionadas en las diferentes poblaciones elegidas.
- Medida de los niveles de radón en el interior de las viviendas seleccionadas en las distintas poblaciones.
- Medida de las concentraciones de actividad en las aguas de bebida en poblaciones seleccionadas.
- Estimación de las dosis recibidas por los habitantes de las diferentes zonas, por la totalidad y cada una de las vías de exposición consideradas en el proyecto.

Las actividades indicadas, se llevaron a cabo en las zonas reflejadas en la tabla 29, donde se señalan adicionalmente las instalaciones del ciclo asociadas a dichas zonas.

Tabla 29. Zonas de estudio. Instalaciones del ciclo

| Zona de estudio       | Instalaciones                                                                                                                                                                             |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Albalá del Caudillo   | Minas de uranio del denominado grupo Albalá (Ratones, Perdices, Pozo Norte, Casa del Gallo, La Carretona, El Peñascal, Broncana, La Dehesilla y Los Castillejos).                         |
| La Haba-Don Benito    | Instalación experimental de tratamiento de mineral de uranio de la Haba.                                                                                                                  |
| Alburquerque- Badajoz | Minas de uranio del denominado grupo Valderrascón (Valderrascón, Pedro Negro, La Calderilla y El Sabio).                                                                                  |
| Juzbado-Vitigudino    | Fábrica de elementos combustibles de Juzbado.<br>Prospecciones mineras Vitigudino.                                                                                                        |
| Andújar-Cardena       | Fábrica de concentrados de uranio de Andújar.<br>Minas de uranio de los denominados grupos Cardena (Cano, Trapero y San Valentín) y La Virgen (La Virgen, Navalasno, Montealegre I y II). |
| Cabril-Peñarroya      | Instalación de almacenamiento de residuos de Sierra Albarrana.                                                                                                                            |

### Concentración de radionucleidos naturales en suelos

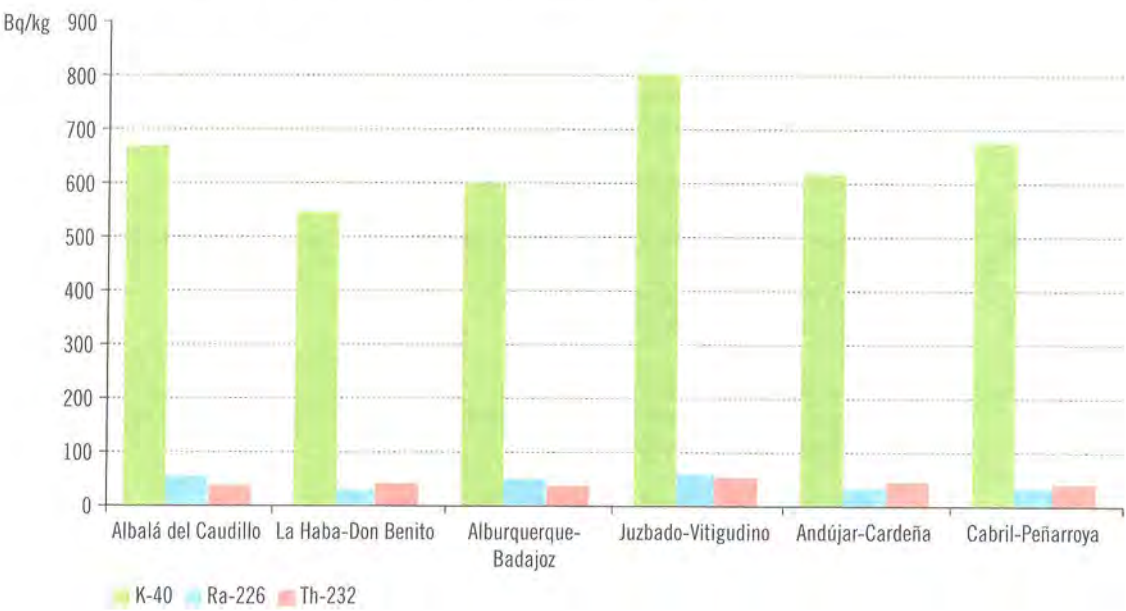
En total se recogieron 256 muestras de suelos, llevándose a cabo en todas las muestras la determinación de

las concentraciones de actividad de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ . En la tabla 30 se presentan los valores medios aritméticos de las concentraciones de actividad de los tres isótopos en cada una de las zonas de estudio, que se han representado en la figura 7.

Tabla 30. Valores medios de las concentraciones de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en suelos (Bq/kg). Instalaciones del ciclo

| Instalación          | Isótopos               |                      |                      |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
|                      | $^{40}\text{K}$        | $^{226}\text{Ra}$    | $^{232}\text{Th}$    |
| Albalá del Caudillo  | 668,6<br>(348,7-1.262) | 56,2<br>(8,9-225,1)  | 39,0<br>(4,8-94)     |
| La Haba-Don Benito   | 544<br>(151,3-1.484)   | 30,2<br>(12-68,2)    | 42,7<br>(12,2-75,3)  |
| Alburquerque-Badajoz | 601,5<br>(112-1.415)   | 50,7<br>(15,8-297,5) | 37,8<br>(13,0-95,1)  |
| Juzbado-Vitigudino   | 805<br>(292,3-1.371)   | 59,2<br>(18,9-98,2)  | 52,6<br>(10,0-190,5) |
| Andujar-Cardena      | 616,4<br>(179,6-1.177) | 34,8<br>(8,4-102)    | 47,2<br>(10,6-160,9) |
| Cabril-Peñarroya     | 677,9<br>(136-1.564)   | 33,1<br>(9,7-105,2)  | 44,53<br>(9,7-165,5) |

Figura 7. Concentraciones medias de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th en suelos. Instalaciones del ciclo



Niveles de radiación gamma

La medida de los niveles de radiación  $\gamma$ , se llevó a cabo tanto en el exterior como en el interior de las viviendas de las poblaciones seleccionadas.

Los niveles de radiación gamma en el exterior se midieron en los mismos puntos donde se recogieron las muestras de suelos, por lo que se realizaron un total de 256 medidas.

En la obtención de los niveles de radiación en el interior de las viviendas se realizó un total de 114 medidas.

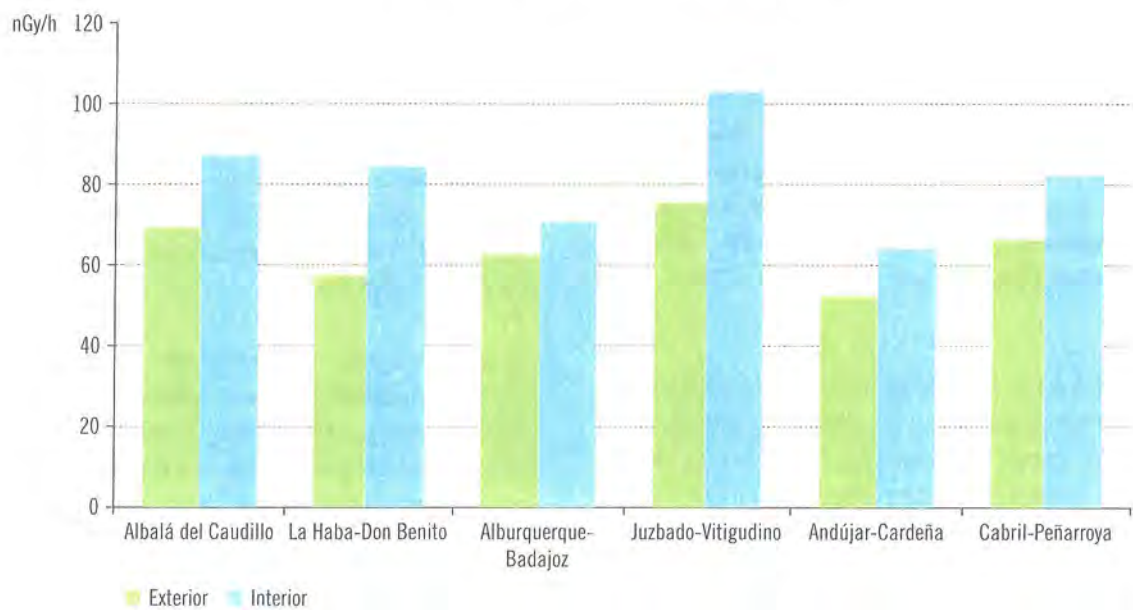
Las medidas de dosis absorbidas en aire, se llevaron a cabo de acuerdo con la metodología descrita en [34] [35], e indicada con anterioridad en este documento.

Los valores más elevados se midieron en la zona de Juzbado-Vitigudino, siendo la población de Ledesma donde los valores fueron mayores tanto en el exterior (178,5 nGy/h) como en el interior de las viviendas (212 nGy/h).

Tabla 31. Valor medio niveles de radiación gamma. Instalaciones del ciclo

| Instalación          | Niveles de radiación (nGy/h) |                       |
|----------------------|------------------------------|-----------------------|
|                      | Exterior                     | Interior              |
| Albalá del Caudillo  | 68,7<br>(45,6-126,2)         | 87,2<br>(58,9-112,2)  |
| La Haba-Don Benito   | 57<br>(12,6-113,9)           | 83,9<br>(48,8-125,6)  |
| Alburquerque-Badajoz | 62,1<br>(25,2-117,3)         | 71,0<br>(35,6-136,5)  |
| Juzbado-Vitigudino   | 75,2<br>(31,5-179,5)         | 102,9<br>(65,3-212,5) |
| Andújar-Cardeña      | 52,3<br>(12,1-117,1)         | 64,5<br>(25,0-125,6)  |
| Cabril-Peñarroya     | 65,8<br>(19,9-126,5)         | 82,3<br>(45,0-136,5)  |

Figura 8. Niveles de radiación gamma en el exterior e interior de las viviendas. Instalaciones del ciclo



Niveles de radón en el interior de las viviendas

Las medidas de radón se realizaron en la mayoría de las poblaciones, 38 en total, donde se midieron los niveles de radiación gamma en el interior. Se colocaron 235 detectores, uno por vivienda, que estuvieron expuestos durante un período de cinco meses. De los dosímetros que estuvieron expuestos, se recuperaron un 94,8%, lo que representó un total de 223 valores.

En la tabla 32 se exponen los valores obtenidos en cada una de las zonas, valores medios y rango.

De las poblaciones estudiadas destaca Cardena, donde en el 63% de las viviendas se midieron valores superiores a 200 Bq/m³.

Examen radiológico del agua de bebida

En el proyecto, se consideró el estudio radiológico de las aguas de bebida de algunas de las poblaciones de la zona. Se recogieron tres muestras por término medio en cada uno de los pueblos, aunque en algunos casos se tomaron muestras adicionales, lo que supuso un total de 162 muestras.

Tabla 32. Valores de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas Instalaciones del ciclo

| Instalación           | Concentración de radón (Bq/m³) |                  |
|-----------------------|--------------------------------|------------------|
|                       | Media aritmética (Rango)       | Media geométrica |
| Albalá del Caudillo   | 164 (31-679)                   | 111              |
| La Haba-Don Benito    | 94,5 (13-255)                  | 66               |
| Alburquerque -Badajoz | 102 (18-358)                   | 80               |
| Juzbado-Vitigudino    | 108 (11-627)                   | 71               |
| Andújar-Cardena       | 101 (14-332)                   | 70               |
| Cabril-Peñarroya      | 72 (12-218)                    | 52               |

En las muestras se realizaron las determinaciones de los índices de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  totales.

Las muestras se prepararon para su medida mediante evaporación a sequedad a partir de un volumen de 40 ml, manteniendo las correspondientes planchetas durante unos tres días en un desecador, con objeto

de eliminar la contribución de las emisiones  $\alpha$  y  $\beta$  de los descendientes de período de semidesintegración corto del radón.

Las medidas se realizaron en un contador proporcional de flujo de gas en el que se llevó a cabo la calibración empleando muestras de actividad específica conocida, con diferentes espesores másicos y de la misma geometría que las muestras a medir. Los isótopos utilizados para la calibración fueron  $^{241}\text{Am}$  y  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ .

Con un tiempo de conteo de 12 horas y teniendo en cuenta las condiciones experimentales de autoabsorción en las mismas muestras y el volumen de partida, los límites inferiores de detección «a priori» del método de medida fueron de 0,04 y 0,4 Bq/l para las concentraciones de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total respectivamente.

En la tabla 33 se exponen los valores medios de las concentraciones de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  obtenidos en cada una de las zonas del estudio.

Las zonas donde los valores de las concentraciones de actividad  $\alpha$  total fueron más elevados (superiores al nivel de investigación 0,1 Bq/l de la Guía de Seguridad n.º 7.7 (rev 1 del CSN) [47], son las denominadas Andujar-Cardena (0,31 Bq/l valor medio) y Juzbado-Vitigudino (0,19 Bq/l).

Tabla 33. Valores medios de actividad  $\alpha$  y  $\beta$  total, en agua de bebida. Instalaciones del ciclo

| Zona de estudio      | Concentración de actividad Bq/l |                  |
|----------------------|---------------------------------|------------------|
|                      | $\alpha$ -total                 | $\beta$ -total   |
| Albalá del Caudillo  | 0,06 (0,01-0,18)                | 0,2 (0,01-0,62)  |
| La Haba-Don Benito   | 0,08 (0,01-0,24)                | 0,41 (0,01-1,88) |
| Alburquerque-Badajoz | 0,08 (0,01-0,38)                | 0,13 (0,01-0,34) |
| Juzbado-Vitigudino   | 0,19 (0,01-0,58)                | 0,2 (0,03-0,65)  |
| Andújar-Cardena      | 0,31 (0,01-2,40)                | 0,44 (0,01-1,72) |
| Cabril-Peñarroya     | 0,04 (0,01-0,14)                | 0,17 (0,05-0,52) |

En la primera zona, Andújar-Cardena, el valor obtenido, se debió en gran medida a los altos valores medidos en la población de Fuencaliente (1,07 Bq/l valor medio). En esta población y en dos puntos de muestro, se obtuvieron los valores elevados, los denominados en el proyecto como Fuencaliente-salida y Fuencaliente-plaza. En este último punto se midió un valor máximo de 2,40 Bq/l. En el punto restante denominado Fuencaliente-red el valor fue muy bajo, 0,01 Bq/l.

En esta población y específicamente en el agua proveniente de los dos puntos indicados, se debería de llevar a cabo un estudio más detallado, con objeto de conocer las concentraciones de actividad de los principales radionucleidos, de acuerdo con lo indicado en la Guía de Seguridad del CSN [47] y lo recomendado por la OMS [68].

Al contrario que en la zona Andújar-Cardena, donde el valor medio estaba influido por una población, en la zona Juzbado-Vitigudino, son varias poblaciones en las que se rebasó el valor del nivel de investigación, en las medidas de la concentración de actividad  $\alpha$  total. Dichas poblaciones fueron las siguientes, Calzada de Vanduciel (0,34 Bq/l), Sanchón de la Ribera (0,30 Bq/l), Vitigudino (0,20 Bq/l), Cerralbo (0,182 Bq/l) y Ledesma (0,142 Bq/l).

En las poblaciones indicadas convendría realizar una caracterización radiológica más detallada, de manera análoga a lo indicado anteriormente para la población de Fuencaliente, con objeto de conocer la incidencia real de la ingestión de agua sobre los habitantes y su potencial carga radiológica.

En relación con las concentraciones de actividad  $\beta$  total, los valores obtenidos no sobrepasaron el nivel de investigación de la Guía de Seguridad del CSN (1 Bq/l), salvo en el caso de las poblaciones de Fuencaliente (1,03 Bq/l) y Quintana de la Serena (1,23 Bq/l), esta última en la zona de La Haba-Don Benito.

El aspecto radiológico de las aguas de la población de Fuencaliente ya ha sido expuesto anteriormente, mientras que en el caso de la población de Quintana de la Serena es previsible que la concentración de ac-

tividad  $\beta$  total, sea debida al  $^{40}\text{K}$ , dado que los valores de la concentración de actividad  $\alpha$  total no han sido excesivamente elevados (0,13 Bq/l valor medio).

#### Estimación de dosis

Considerando los valores obtenidos, se llevó a cabo una estimación de las dosis promedio que se recibirían en las diferentes zonas estudiadas.

Las dosis debidas al radón, se estimaron siguiendo los criterios recogidos en el documento número 65 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica [41] y en la estimación de la dosis efectiva por exposición externa en el interior y exterior de las viviendas se consideró la publicación EUR 14470 [69]. La estimación de la dosis por ingestión de agua potable se realizó de acuerdo con los criterios contenidos en la publicación [70].

Se consideró adicionalmente las dosis que se recibirían en promedio en cada zona debido a la radiación cósmica y que serían de 0,3 mSv/año.

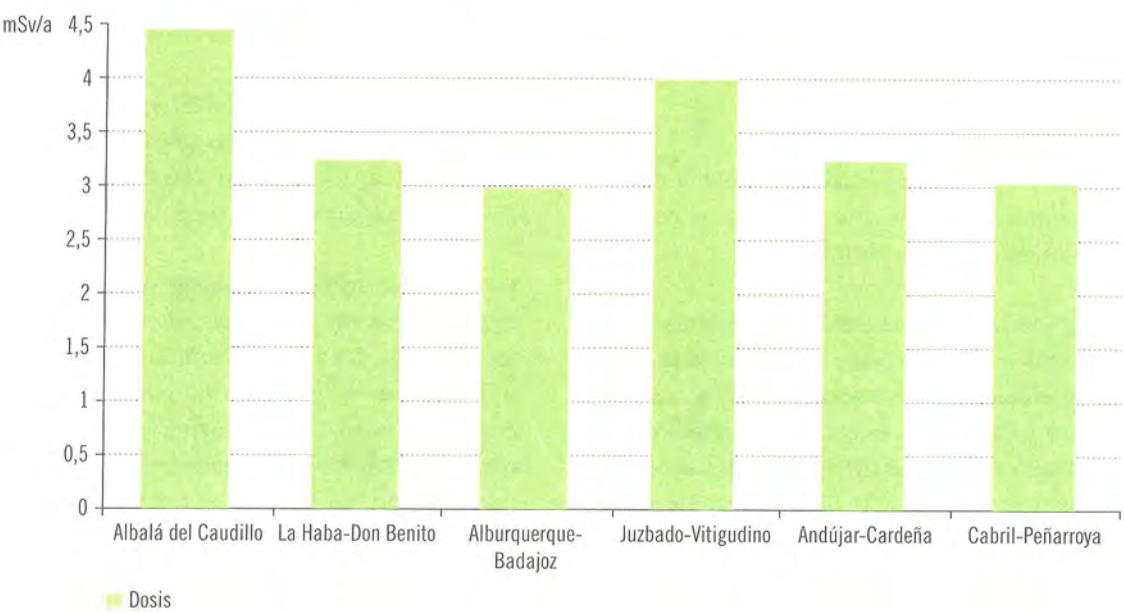
Los valores de las dosis efectivas que estarían recibiendo los habitantes de las distintas zonas, por el conjunto y cada una de las vías de exposición estudiadas, se exponen en la tabla 34.

De los datos recogidos, puede verse que los valores más elevados de dosis efectivas se obtuvieron en las zonas de Albalá del Caudillo (4,45 mSv/año) y de Juzbado-Vitigudino (4,0 mSv/año). De estas dosis la principal vía de exposición sería la inhalación de  $^{222}\text{Rn}$  y descendientes, con una contribución del 65% en el caso de la zona de Albalá y del 52,5% en el caso de la zona de Juzbado-Vitigudino.

Tabla 34. Valores de dosis en el entorno de las distintas instalaciones del ciclo

| Zona                 | Dosis efectivas mSv/año |                                  |                  |                |       |
|----------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------|----------------|-------|
|                      | Rad. Cósmica            | Rad. Terres. exterior e interior | Inhalación Radón | Ingestión agua | Total |
| Albalá del Caudillo  | 0,30                    | 0,50                             | 2,9              | 0,75           | 4,45  |
| La Haba-Don Benito   | 0,30                    | 0,50                             | 1,7              | 0,75           | 3,25  |
| Alburquerque-Badajoz | 0,30                    | 0,40                             | 1,8              | 0,50           | 3,00  |
| Juzbado-Vitigudino   | 0,30                    | 0,60                             | 2,1              | 1,00           | 4,00  |
| Andújar-Cardena      | 0,30                    | 0,40                             | 1,8              | 0,75           | 3,25  |
| Cabril-Peñarroya     | 0,30                    | 0,50                             | 1,5              | 0,75           | 3,05  |
| Conjunto zonas       | 0,30                    | 0,48                             | 1,96             | 0,75           | 3,49  |

Figura 9. Valores de dosis de radiación natural. Instalaciones del ciclo



PROGRAMA REALIZADO POR LA  
UNIVERSIDAD DE VALENCIA



2

Otro de los grupos interesados en la colaboración con el CSN, fue el laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Valencia. Que ya había realizado una serie de muestreos mediante la utilización de cartuchos de carbón activo.

La campaña de medidas de radón prevista por dicho grupo en el interior de los edificios de la Comunidad Valenciana, comprendía dos fases [71].

En la primera, el objetivo de las medidas se centraba fundamentalmente en edificios públicos.

En la segunda fase, y a la vista de los resultados obtenidos en la fase precedente, el objetivo se centraba en viviendas privadas con especial incidencia en aquellas zonas de mayor riesgo.

### 1. Desarrollo de la primera fase

Durante la fase inicial, noviembre de 1988 a mayo de 1989, se efectuaron un total de 72 medidas en 64 edificios correspondientes a 32 poblaciones de la Comunidad Valenciana. Los edificios seleccionados fueron institutos de bachillerato [72].

El muestreo se realizó mediante la utilización de cartuchos de carbón activo, consistentes en cajitas de aluminio de 10 cm de diámetro por 2,8 cm de altura, con un contenido de 70 gr de carbón activo, construidas por una empresa especializada (Núcleus) y homologadas por la EPA.

La toma de muestras se llevó a cabo siguiendo las directrices dadas por la EPA [73]. Se colocaron las trampas de carbón, en las plantas bajas de los edificios, a una altura del suelo superior a 25 cm, en locales cerrados durante al menos 12 horas antes de la toma de muestras y durante el período de muestreo (salvo las entradas y salidas normales).

El período de exposición de los cartuchos fue de aproximadamente dos días, obteniéndose la concentración de radón mediante la identificación por espectrometría gamma de los descendientes  $^{213}\text{Pb}$  y  $^{214}\text{Bi}$ . Con un tiempo de medida de 10 minutos, el LID obtenido fue de  $18,5 \text{ Bq/m}^3$ .

Adicionalmente se cumplimentaron unos cuestionarios en los que se requería información sobre el tipo de edificación, lugar de muestreo, tipo de habitación, dimensiones, materiales de construcción y hábitos de ventilación.

Los resultados obtenidos [72], estuvieron comprendidos entre  $18,5 \text{ Bq/m}^3$  y  $314 \text{ Bq/m}^3$ , con un valor medio estimado para toda la comunidad de  $27,4 \text{ Bq/m}^3$ .

La Universidad de Cantabria obtuvo para la Comunidad Valenciana, un valor medio de  $18 \text{ Bq/m}^3$ , con un rango comprendido entre el LID ( $10 \text{ Bq/m}^3$ ) y  $214,2 \text{ Bq/m}^3$ .

## 2. Desarrollo de la segunda fase

En la segunda fase se realizaron campañas de medida de radón en el interior de edificios de las tres provincias Valencia [74] [75] [76], Castellón [77] [78] y Alicante [79] [80]. Actualmente se tiene una visión bastante detallada de las concentraciones existentes en la Comunidad.

### 2.1. Medidas en la provincia de Valencia

Durante la campaña realizada entre 1990 y 1991, se procedió a la medida de las concentraciones de radón en 437 edificios distribuidos entre 52 municipios de la provincia.

Para cubrir todo el área geográfica se utilizó su división comarcal, eligiendo el número de municipios dentro de cada comarca, según el número de habitantes de la misma y considerando adicionalmente para la elección de los municipios las peculiaridades geológicas de cada comarca [75].

Dentro de cada municipio se escogieron entre seis y 10 puntos de muestreo, duplicando las medidas en un 15% de las casas, con objeto de asegurar la fiabilidad del método, encontrándose siempre resultados concordantes.

Las condiciones y método de muestreo así como el de medida, fueron los mismos que se han descrito anteriormente en el apartado 1 de este documento.

En la tabla 35, se reflejan los valores medios comarcales de las concentraciones de radón medidas en

los distintos municipios, así como el valor medio obtenido para la provincia de Valencia [75].

Tabla 35. Concentraciones de radón en la provincia de Valencia

| Comarca                   | Poblaciones                                                       | Valor medio* comarcal (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| El Rincón de Ademuz       | Casas Bajas<br>Castell Fabib                                      | 48,1                                       |
| Los Serranos              | Aras de Alpuente<br>Tuejar<br>Higueruelas<br>Gestalgar            | 39,6                                       |
| Camp del Turia            | Villamarchante<br>Serra<br>Olocau<br>Casinos                      | 68,8                                       |
| El Camp de Morvedre       | Sagunto<br>Gilet<br>Algar<br>Torres-Torres                        | 44,8                                       |
| Valencia y L'Horta        | Valencia<br>Burjassot<br>Puzol<br>Torrente<br>Chirivella<br>Silla | 30,7                                       |
| La Plana de Utiel-Requena | Venta del Moro<br>Villagordo<br>Camporrobles<br>Sinarcas          | 37,7                                       |
| La Hoya de Buñol          | Dos Aguas<br>Yatova<br>Siete Aguas                                | 32,5                                       |
| El Valle de Cofrentes     | Cofrentes<br>Teresa<br>Ayora                                      | 35,5                                       |
| La Ribera Alta            | Carcer<br>Montroy<br>Turis<br>Carlet                              | 34,8                                       |
| La Ribera Baixa           | Sollana<br>Albalat<br>Favara<br>Corbera                           | 37,4                                       |

Tabla 35. Concentraciones de radón en la provincia de Valencia (continuación)

| Comarca               | Poblaciones                                                 | Valor medio <sup>a</sup> comarcal (Bq/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| La Canal de Navarres  | Chella<br>Navarres                                          | 28,9                                                   |
| La Costera            | Canals<br>Játiva<br>Mogente<br>Fuente de Higuera<br>Vallada | 36,6                                                   |
| La Vall D'Albaida     | Ayelo de Rugat<br>Rafol<br>Ayelo de Malferit<br>Ollería     | 23,7                                                   |
| La Safor              | Simat<br>Gandia<br>Oliva<br>Tavernes                        | 39,6                                                   |
| Provincia de Valencia |                                                             | 37,0                                                   |

<sup>a</sup> Media geométrica

Los valores obtenidos fueron bajos, no mostrando una especial problemática en relación con las concentraciones encontradas. No obstante aparecieron valores esporádicos elevados en algunos edificios de algunas poblaciones. Los valores más elevados superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup> se obtuvieron en las siguientes poblaciones.

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| Casinos           | 1.630 Bq/m <sup>3</sup> |
| Siete Aguas       | 9.618                   |
| Favara            | 2.658                   |
| Higueruelas       | 763                     |
| Fuente la Higuera | 1.948                   |

Los valores detectados en Favara y en Higueruelas correspondieron a casas particulares y en el caso de las poblaciones de Casinos, Siete Aguas y Fuente la Higuera, a muestras tomadas en la iglesia, la piscina municipal y el depósito de agua respectivamente.

## 2.2. Medidas en la provincia de Castellón

Las medidas de las concentraciones de radón en la provincia de Castellón, se realizaron durante el pe-

ríodo 1992-1993, determinándose dichas concentraciones en 195 edificios distribuidos entre 27 municipios de las ocho comarcas que constituyen el área geográfica de la provincia [78].

La metodología de selección de los municipios y de su número dentro de cada comarca, se realizó de forma análoga a lo indicado para la provincia de Valencia [75], así como las condiciones y métodos de muestreo y medida.

En la tabla 36 se exponen los valores medios obtenidos en cada municipio así como los valores medios de cada comarca y el estimado para la provincia de Castellón.

Análogamente a lo indicado anteriormente en relación con los valores obtenidos en la provincia de Valencia, en la provincia de Castellón también fueron bajos, apareciendo en algunos edificios de algunas poblaciones, esporádicamente, valores elevados. Los valores mas elevados, superiores a 400 Bq/m<sup>3</sup>, se obtuvieron en las siguientes poblaciones.

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Cincotorres          | 559 Bq/m <sup>3</sup> |
| Algimia de Almonacid | 767                   |
| Villafranca del Cid  | 1.081                 |
| Adzaneta             | 1.166                 |
| Betxi                | 1.255                 |

Los valores detectados en Cincotorres y Algimia de Almonacid, corresponden a casas particulares y en el caso de las poblaciones de Villafranca del Cid, Adzaneta y Betxi, a muestras tomadas en un almacén municipal, un colegio público y en el ayuntamiento, respectivamente.

Tabla 36. Concentraciones de radón en la provincia de Castellón

| Comarca                | Poblaciones               | Valor medio población Bq/m <sup>3</sup> | Valor medio comarcal Bq/m <sup>3</sup> |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Els Ports              | Cincotorres               | 68,8                                    | 53,0                                   |
|                        | Morella                   | 46,3                                    |                                        |
| Alt Maestrat           | Catí                      | 122,5                                   | 98,5                                   |
|                        | Cullá                     | 72,6                                    |                                        |
|                        | Villafranca del Cid       | 100                                     |                                        |
| Baix Maestrat          | Alcalá de Xivert          | 53,7                                    | 35,2                                   |
|                        | Chert                     | 29,3                                    |                                        |
|                        | Rosell                    | 28,9                                    |                                        |
|                        | Traiguera                 | 39,6                                    |                                        |
| L'Alcalaten            | Adzaneta                  | 66,3                                    | 68,8                                   |
|                        | Lucena del Cid            | 81,1                                    |                                        |
|                        | Vistabella del Maestrazgo | 60,7                                    |                                        |
| La Plana Alta          | Borriol                   | 51,1                                    | 45,9                                   |
|                        | Cuevas de Vinromá         | 46,3                                    |                                        |
|                        | Sierra de Engarcerán      | 21,5                                    |                                        |
|                        | Vilafamés                 | 127,0                                   |                                        |
| La Plana Baixa         | Artana                    | 53,3                                    | 72,9                                   |
|                        | Betxi                     | 82,6                                    |                                        |
|                        | Ribesalbes                | 83,7                                    |                                        |
| Alt Palancia           | Algimia de Almonacid      | 69,2                                    | 43,0                                   |
|                        | Barracas                  | 71,9                                    |                                        |
|                        | Bejís                     | 71,1                                    |                                        |
|                        | Gatova                    | 15,9                                    |                                        |
| Alt Millares           | Cirat                     | 26,3                                    | 37,7                                   |
|                        | Cortes de Arenoso         | 44,4                                    |                                        |
|                        | Montanejos                | 35,2                                    |                                        |
|                        | Villahermosa del Cid      | 54,8                                    |                                        |
| Provincia de Castellón |                           | 52,2                                    |                                        |

## 2.2. Medidas en la provincia de Alicante

Las medidas de las concentraciones de radón en el interior de edificios, en la provincia de Alicante, se llevaron a cabo durante el período 1994-1995, en 244 edificios de 32 municipios de las nueve comarcas que constituyen la provincia [80].

La selección de los lugares de muestreo, así como las condiciones y el método de muestreo y medida, fueron análogos a los indicados para las provincias de Valencia y Castellón.

En la tabla 37, se presentan los valores medios obtenidos en cada uno de los 32 municipios, en cada una de las comarcas, así como el valor medio estimado para la provincia.

Tabla 37. Concentraciones de radón en la provincia de Alicante

| Comarca               | Poblaciones       | Valor medio* población Bq/m <sup>3</sup> | Valor medio* comarcal Bq/m <sup>3</sup> |
|-----------------------|-------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| El Comptat            | Agres             | 57,6                                     | 60,1                                    |
|                       | Alcolecha         | 63,1                                     |                                         |
| L'Alcoia              | Bañeres           | 118,3                                    | 104,1                                   |
|                       | Castalla          | 149,7                                    |                                         |
|                       | Onil              | 73,5                                     |                                         |
|                       | Tibil             | 87,6                                     |                                         |
| Alto Vinalopó         | Benejama          | 39,2                                     | 35,8                                    |
|                       | Biar              | 60,2                                     |                                         |
|                       | Salinas           | 21,0                                     |                                         |
|                       | Sax               | 45,5                                     |                                         |
| Medio Vinalopó        | Aspe              | 22,1                                     | 36,5                                    |
|                       | Aondon            | 29,2                                     |                                         |
|                       | Monforte          | 30,9                                     |                                         |
|                       | Petrer            | 46,4                                     |                                         |
|                       | Pinoso            | 34,2                                     |                                         |
|                       | Monovar           | 63,7                                     |                                         |
| La Marina Alta        | Benitachell       | 21,5                                     | 36,6                                    |
|                       | Castell           | 39,7                                     |                                         |
|                       | Vall de Gallinera | 43,3                                     |                                         |
|                       | Vall de Laguart   | 67,3                                     |                                         |
| La Marina Baja        | Benimantell       | 53,3                                     | 55,0                                    |
|                       | Altea             | 48,3                                     |                                         |
|                       | Relleu            | 69,5                                     |                                         |
| L'Alacant             | Busot             | 29,7                                     | 50,7                                    |
|                       | Jijona            | 28,0                                     |                                         |
|                       | Torremanzanas     | 228,1                                    |                                         |
| Bajo Vinalopó         | Santa Pola        | 11,1                                     | 19,1                                    |
|                       | Guardamar         | 35,9                                     |                                         |
| La Vega Baja          | Albatera          | 24,3                                     | 17,6                                    |
|                       | Redovan           | 16,5                                     |                                         |
|                       | San Fulgencio     | 13,0                                     |                                         |
|                       | San Miguel        | 16,0                                     |                                         |
| Provincia de Alicante |                   | 40,9                                     |                                         |

\* Media geométrica.

PROGRAMA REALIZADO POR EL CIEMAT  
Y LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BARCELONA



**3**

Las actividades realizadas por este grupo, pueden dividirse en dos apartados generales:

- Un primer apartado correspondiente a las medidas de radón realizadas en las viviendas de Madrid y Barcelona (Acuerdo CSN-Ciemat) [81].
- Un segundo apartado relacionado con el estudio del impacto radiológico producido por el gas radón en el interior de edificios (Acuerdo CSN-Universidad Autónoma de Barcelona) [82].

### 1. Medida de concentraciones de radón en Madrid y Barcelona

El estudio de las concentraciones de radón en el interior de viviendas de Madrid y Barcelona, se realizó mediante dos campañas de medida.

#### Primera Campaña

El programa partía de la selección, puesta a punto y calibración de un sistema de medida de radón, basado en la técnica de detección de trazas [83]. El detector elegido fue el policarbonato de bifenol, comercializado como Makrofol ED, recubierto con una capa de Mylar aluminizado, trabajo realizado en el marco de un acuerdo entre el Ciemat y la Universidad de Barcelona. Posteriormente y una vez conseguido el tipo de detector deseado, se comenzó la fase de medidas.

Con carácter preliminar se realizaron en ambas ciudades dos series de medidas en diferente épocas del año: abril-julio 1990 y noviembre 90-febrero 91.

Se colocaron un total de 337 dosímetros con la siguiente distribución [84]:

|           | Abril-julio 1990 | Noviembre 1990-Febrero 1991 |
|-----------|------------------|-----------------------------|
| Madrid    | 90               | 88                          |
| Barcelona | 86               | 73                          |

En la colocación de los dosímetros en el caso de Madrid, se siguieron criterios de tipo de suelo (arcósico o formado por un sustrato de arcilla con un contenido variable de yeso y arena) y tipo de casa (unifamiliares o bloques de pisos). En el caso de Barcelona, la distribución fue aleatoria.

En general, se colocó un dosímetro por vivienda, pero en algunos casos, viviendas unifamiliares con diferentes plantas, se situó un dosímetro en cada planta.

Junto con los dosímetros se repartió un cuestionario con objeto de obtener información de las características de la vivienda y de los hábitos de los ocupantes.

A continuación en la tabla 38, se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las dos ciudades [83] [84].

A través de los resultados obtenidos al situar los dosímetros en las viviendas unifamiliares en diferentes lugares (sótano, planta baja y otras plantas), se vio que las concentraciones de radón decrecían con la altura, por lo que se confirmaba que la fuente principal de radón provenía del suelo.

Tabla 38. Concentraciones de radón en Madrid y Barcelona. Primera campaña

| Concentraciones de radón Bq/m <sup>3</sup> | Madrid   |          |        | Barcelona |          |        |
|--------------------------------------------|----------|----------|--------|-----------|----------|--------|
|                                            | 1.ª fase | 2.ª fase | Global | 1.ª fase  | 2.ª fase | Global |
| <b>Valor medio</b>                         |          |          |        |           |          |        |
| Aritmético                                 | 57,8     | 79,2     | 68     | 30,8      | 49,6     | 40     |
| Geométrico                                 | 45       | 56,8     | 50,9   | 23,9      | 40,1     | 32     |
| Valor máximo                               | 293      | 527      | 527    | 135       | 232      | 232    |
| Valor mínimo                               | 15       | 12       | 12     | 5         | 17       | 5      |

En el caso de Madrid se observó la influencia del suelo arcósico, siendo en las viviendas situadas sobre este tipo de suelos, donde se obtuvieron los valores más elevados. Este aspecto no se observó en Barcelona debido a la homogeneidad del suelo sedimentario. En los resultados obtenidos en las dos ciudades, se vio que las concentraciones se incrementaban en invierno entre un 40 a 60%.

Como complemento de la vigilancia realizada y durante la primera fase, abril-julio 1990, se colocaron de manera aleatoria en 75 viviendas de Madrid, dosímetros de termoluminiscencia, con objeto de determinar los niveles de exposición a la radiación gamma. Se obtuvo un valor medio de 146 nGy/h, con un rango de valores comprendidos entre 91 y 242 nGy/h.

La correlación entre los niveles de dosis y las concentraciones de radón no pudo establecerse fácilmente, con excepción del valor mas elevado, que se corresponde con una localización donde se midieron niveles elevados de radón [84].

### Segunda Campaña

Esta segunda campaña, se llevó a cabo a lo largo de un año, dividido en dos periodos de seis meses: ju-

nio 1991-enero 1992 y enero-junio 1992, distribuyéndose un total de 2.000 dosímetros, 1.000 en cada ciudad, 500 en cada periodo.

El tipo de dosímetro utilizado fue el mismo que el utilizado en la primera campaña. Para la distribución de los dosímetros y con objeto de minimizar las pérdidas, se siguió el criterio de repartirlos entre el personal del Ciemat y del CSN en el caso de Madrid y entre el personal de la Universidad Autónoma de Barcelona en el caso de esta ciudad. Dada la amplitud de los diferentes colectivos y la selección aleatoria de los colaboradores, se consideró que los resultados serían representativos de las dos poblaciones.

El número de dosímetros que se midieron fueron en total 1.530, correspondiendo 859 a Madrid y 671 a Barcelona. En este cómputo están descontadas las pérdidas producidas en la recuperación y en el proceso de revelado y medida que pueden cuantificarse en un 23%.

A continuación en la tabla 39 se expone un resumen de los valores obtenidos en las dos ciudades [85], y en la tabla 40, la distribución de las viviendas según distintos intervalos de concentración.

Tabla 39. Concentraciones de radón en Madrid y Barcelona. Segunda campaña

| Concentración de radón Bq/m <sup>3</sup> | Madrid   |          |        | Barcelona |          |        |
|------------------------------------------|----------|----------|--------|-----------|----------|--------|
|                                          | 1.ª fase | 2.ª fase | Global | 1.ª fase  | 2.ª fase | Global |
| <b>Valor medio</b>                       |          |          |        |           |          |        |
| Aritmético                               | 53       | 73       | 63     | 33        | 36       | 34     |
| Geométrico                               | 39       | 52       | 45     | 27        | 30       | 28     |
| Valor máximo                             | 1.538    | 1.670    | 1.670  | 622       | 346      | 622    |
| Valor mínimo                             | 2        | 7        | 2      | 1         | 1        | 1      |

Tabla 40. Distribución de las viviendas en función de distintos intervalos de concentración

| Concentración Bq/m <sup>3</sup> | Madrid |      | Barcelona |      |
|---------------------------------|--------|------|-----------|------|
|                                 | Número | %    | Número    | %    |
| 0-100                           | 787    | 91,6 | 656       | 97,8 |
| 100-200                         | 46     | 5,4  | 12        | 1,8  |
| 200-400                         | 10     | 1,2  | 2         | 0,3  |
| 400-1.000                       | 14     | 1,6  | 1         | 0,1  |
| > 1.000                         | 2      | 0,2  | 0         | 0    |

El análisis de los resultados se llevó a cabo en base a los siguientes parámetros [85].

- Tipo de vivienda (unifamiliar y bloque de apartamentos).
- Piso donde se realizó la medida.
- Lugar de ubicación del detector en la vivienda (salón, dormitorio y otros), en el caso de Barcelona.
- Tipo de suelo en el caso de Madrid.

Las conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- Los valores de las concentraciones de radón decrecen con la altura de la vivienda respecto del suelo, tanto en Madrid como en Barcelona.
- Las viviendas de tipo unifamiliar presentaron los valores mas elevados en ambas ciudades.
- En Madrid, las viviendas situadas sobre suelos arcósicos presentaron valores superiores a las situadas sobre suelos de tipo arcilloso. El valor máximo obtenido en viviendas edificadas sobre suelo arcósico fue de 1.670 Bq/m³, mientras que en el caso de las viviendas edificadas sobre suelo arcilloso, el valor fue de 184 Bq/m³.
- En Barcelona no se encontraron diferencias entre los valores medidos en los cuartos de estar (26 Bq/m³ valor medio) y los dormitorios (28 Bq/m³ valor medio). Los valores encontrados en las habitaciones englobadas bajo la denominación de «otros» (garajes, despensas, trasteros, despachos, etc.) fueron algo mas elevados (43 Bq/m³), pero

dada su diversidad no fue posible sacar ninguna conclusión fiable.

### Estimación de dosis

En el documento 84, se presentó adicionalmente una estimación de las dosis efectivas que podrían recibir por término medio los habitantes de Madrid y Barcelona, debido a la exposición al radón y sus descendientes. Para la estimación de las dosis se consideraron las siguientes hipótesis:

Un factor de conversión concentración-dosis de 3,6 nSv/h por Bq/m³ [86].

Una permanencia de los individuos en el interior de las viviendas del 80%.

Con estas hipótesis y según los valores medios de concentración de <sup>222</sup>Rn determinados en las dos ciudades, se obtuvieron los valores de dosis que se han incluido en la tabla 41.

### 2. Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios

Con fecha 7 de octubre de 1993, se firmó entre el CSN y la Universidad Autónoma de Barcelona un acuerdo de colaboración [82] con una duración de tres años, para el estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios [87].

El proyecto, representa una continuación de los trabajos de investigación llevados a cabo en colaboración con el Ciemat y el KfK de Karlsruhe y parcialmente subvencionados por el CSN.

Tabla 41. Valores de dosis efectivas en Madrid y Barcelona. Inhalación de radón

| Media      | Madrid              |           | Barcelona           |           |
|------------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
|            | Concentración Bq/m³ | Dosis mSv | Concentración Bq/m³ | Dosis mSv |
| Aritmética | 63                  | 1,6       | 34                  | 0,9       |
| Geométrica | 45                  | 1,1       | 28                  | 0,8       |

El objetivo principal del proyecto era la modelización de los mecanismos de entrada del radón al interior de recintos cerrados, a partir de su transporte e incorporación al aire interior de distintos tipos de viviendas de Cataluña, siendo los objetivos parciales del mismo los siguientes:

- Estudio de la variación temporal de la concentración de radón en los cuatro tipos de viviendas seleccionados.
- Determinación de la concentración de radón mediante cuatro tipos de detectores pasivos de carbón activo, de plástico de centelleo y de trazas (LR-115 y Makrofol).
- Estudio del transporte del radón en suelos y materiales de construcción y de los mecanismos de entrada a recintos cerrados, con el fin de poder predecir, dados los parámetros adecuados, la concentración de radón en el interior de dichos recintos.
- Estudio del impacto radiológico ambiental, a través de la determinación de la dosis efectiva asociada al radón.

A continuación se describen brevemente las actividades realizadas por este grupo de trabajo [88] [89] según los objetivos indicados anteriormente.

### 2.1. Determinación de radón con distintos detectores pasivos

Para la realización del estudio sistemático de las variaciones temporales de la concentración de radón, fue necesario la utilización de diferentes tipos de dosímetros que permitieran medir la variación de las concentraciones en distintos intervalos de tiempo. Los tipos de dosímetros utilizados, fueron los siguientes:

- Detector Meltilex. Este tipo de detector se utiliza para tomar muestras puntuales y consta de un vial de polietileno de baja difusión de 20 ml recubierto internamente con un plástico de centelleo (Meltilex). El período de exposición es de una a cuatro horas y transcurrido el período de

exposición mínimo de una hora y dejando que el radón llegue al equilibrio con sus descendientes (4 horas como mínimo), se mide la actividad  $\alpha$  y  $\beta$ , mediante un espectrómetro de centelleo líquido de bajo fondo.

- Detector Pico-rad. Consta de un cartucho conteniendo carbón activo y gel de sílice como agente desecante, situado en la parte superior de un vial plástico de centelleo líquido de 20 ml. Después de la exposición y de añadir un líquido de centelleo apropiado que produce una desadsorción de los descendientes atrapados en el carbón activo, se mide en un espectrómetro de centelleo líquido. La duración de la exposición de estos detectores es de 24 a 48 horas.
- Detector LR-115. Este detector se expone durante períodos de tiempo comprendidos entre una y dos semanas. El detector está formado por una película de nitrato de celulosa de 12  $\mu\text{m}$  de espesor, colocada sobre una base de poliéster de 100  $\mu\text{m}$ . Después de la exposición al radón, se «revela» la película con una solución de NaOH 2,5 N a 60° durante 100 minutos.

Utilizando esas condiciones de «revelado» es posible registrar las trazas dejadas por las partículas  $\alpha$  con energías de 1 a 4 MeV [90]. Las trazas registradas se cuentan mediante un lector de chispas [91].

- Detector de Makrofol, con revelado electroquímico y lectura de trazas con un analizador de imagen. El período de exposición es de 3 a 6 meses.

El detector tipo Karlsruhe, consta de una cámara de difusión de 4 cm de diámetro y 2 cm de altura, que contiene como material de detección una lámina de 300 mm de grosor de Makrofol ED (Policarbonato), cubierta con un mylar aluminizado. La cámara se encuentra cerrada mediante un filtro de fibra de cristal, donde se depositan los descendientes del radón existentes en el aire, por lo tanto es únicamente el gas radón el que pasa al interior de la cámara. Después de la exposición al gas, las películas son reveladas químicamente durante un período de cuatro horas y electroquímica-

mente (1.000 V y 3.000 Hz) durante 1,5 horas, en células múltiples a 40 °C, utilizando una mezcla al 50% de KOH 6N y etanol. Mediante dichas condiciones de revelado, es posible registrar las trazas dejadas por las partículas  $\alpha$ , con energías de 3 a 5 MeV. La densidad de trazas se mide posteriormente, mediante un analizador de imágenes [90].

Dentro de las actividades llevadas a cabo por el grupo investigador, una de ellas fue la puesta a punto de los distintos detectores, mediante el estudio de la respuesta de los mismos y de su calibración.

El estudio de la respuesta, se llevó a cabo, en un refugio antiaéreo, construido durante la guerra civil en una zona sedimentaria, a unos 35 km de Barcelona, donde la concentración de radón se mantiene a un nivel del orden de 4 kBq/m<sup>3</sup>. Los cuatro tipos de dosímetros, se expusieron durante un período de tres días, en el interior del refugio, de la siguiente forma:

- Los detectores de Makrofol, fueron expuestos durante tres días.
- De los detectores LR-115, diez fueron expuestos durante el período total de tres días y el mismo número se expusieron cada día.
- La exposición de los viales Pico Rad, se realizó de la siguiente manera, tres cada día y dos durante dos y tres días.
- Con los viales Meltilex, se tomaron muestras puntuales cada tres horas, durante tres días.

Como conclusión se indicó que los resultados mostraron que los diferentes métodos, eran compatibles, no existiendo discrepancias significativas entre los valores diarios obtenidos con los detectores LR-115, Pico Rad y Meltilex y el valor medio obtenido con el detector de Makrofol [90].

Se señaló adicionalmente, que el Makrofol, era el detector mas fiable, para determinar la concentración media anual de radón, que el LR-115 y el Pico Rad eran útiles para seleccionar las viviendas con niveles altos de radón de forma más rápida y que el Melti-

lex permitía estudiar la evolución temporal de la concentración de radón [88].

Los dosímetros Meltilex, Makrofol y LR-511, fueron calibrados en la cámara ambiental de radón del National Radiological Protection Board (NRPB) [88] [89], previamente en julio de 1991, el grupo investigador ya había participado con el detector de Makrofol en una campaña de intercomparación realizada por la CEC para detectores pasivos [92].

## 2.2. Concentraciones de radón en viviendas

El estudio de la variación temporal de la concentración de radón en viviendas, se llevó a cabo en colaboración con el Instituto de Técnicas Energéticas, (INTE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), dentro de un proyecto subvencionado parcialmente por la CICYT en el marco del Plan Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Para cada tipo de vivienda, se realizó un estudio sistemático de las variaciones temporales de la concentración de radón y de los mecanismos de entrada. Se seleccionaron 59 viviendas distribuidas en las cuatro provincias catalanas según los siguientes porcentajes: Barcelona 62,7%, Gerona 8,5%, Lérida 13,5% y Tarragona 15,2%. Con el fin de facilitar la operación y minimizar las pérdidas de detectores, se seleccionaron las viviendas entre personas próximas al personal relacionado con el proyecto intentando abarcar los distintos tipos de viviendas y ámbitos geográficos existentes en Cataluña.

Los tipos de viviendas elegidas, se agruparon en cuatro tipos: edificios de pisos, viviendas unifamiliares adosadas y aisladas y casas rurales. La distribución de los dosímetros en función del tipo de vivienda fue la siguiente [93]: edificios de pisos (40,3%), viviendas unifamiliares (42,1%) y casas de pueblo (17,6%).

Las medidas se llevaron a cabo en dos campañas, la primera durante el período noviembre 93-febrero 94 y la segunda un año después, durante el período noviembre 94-febrero 95 con el fin de comparar los resultados obtenidos en las mismas viviendas durante el mismo período un año después [94].

Los dosímetros de Makrofol, estuvieron expuestos en cada uno de los periodos durante los tres meses y los dosímetros LR-115, estuvieron expuestos durante los primeros y los últimos diez días de cada uno de los periodos de tres meses, junto con unos cartuchos de carbón activo del laboratorio del INTE/UPC. Los resultados obtenidos en el primer periodo, fueron presentados en su momento en la XXV reunión de la Sociedad Española de Física [95].

En total se expusieron 268 detectores de Makrofol y 536 de LR115, distribuidos en 59 viviendas, los porcentajes de recuperación fueron del 88,4% (Makrofol) y 90,3% (LR115), siendo las pérdidas debidas al extravío de detectores y a los cambios de domicilio de algunos participantes en la campaña.

Los resultados obtenidos con los dos tipos de detectores mostraron una buena concordancia, y fueron del orden de los obtenidos en las campañas realizadas en Barcelona con anterioridad [84].

A partir de los resultados, se estimaron las dosis equivalentes efectivas que estarían recibiendo los habitantes de las correspondientes viviendas. Los valores obtenidos fueron bajos, mas elevados en las casas rurales (1,34 mSv/año), que en las viviendas unifamiliares (1,29 mSv/año) y en los pisos (1,01 mSv/año), concluyendo que los valores encontrados no representaban ningún riesgo para la población y que por lo tanto no deberían aplicarse medidas de mitigación.

Con anterioridad al estudio indicado, el grupo investigador en los años 1992-1993, llevó a cabo otro estudio de las concentraciones de radón existentes en la población de Calaf [96]. Esta población se encuentra en la comarca de la Alta Segarra, donde existe uranio asociado a lignitos, unos 200 gr de uranio por tonelada, que han venido extrayéndose en el entorno de dicha población.

Los objetivos del estudio fueron, determinar la concentración de radón en el interior de las viviendas, mediante detectores sólidos de trazas, con el fin de evaluar la dosis equivalente recibida por la población y tratar de relacionar los niveles de radón con el tipo de vivienda. En el estudio colaboraron activa-

mente alumnos y profesores del Instituto de Enseñanza Secundaria de Calaf [97].

Se llevaron a cabo dos campañas, en cada una de las cuales se colocaron 39 dosímetros distribuidos entre distintos tipos de viviendas. La primera campaña tuvo lugar entre los meses de diciembre de 1992 y marzo de 1993 y la segunda a continuación, entre marzo y junio, de 1993, en los mismos puntos que la primera campaña.

Junto con los dosímetros, se entregó a los habitantes un cuestionario para obtener información sobre la vivienda, el lugar de colocación de los dosímetros y los hábitos de los ocupantes.

Los dosímetros utilizados fueron un detector de trazas tipo Karlsruhe y un detector plástico circular de Makrofol.

Las medias aritméticas de los resultados obtenidos en ambas campañas fueron muy similares 89 Bq/m<sup>3</sup> en la primera campaña y 88 Bq/m<sup>3</sup> en la segunda y únicamente un 7% de los edificios mostraron concentraciones superiores al 200 Bq/m<sup>3</sup>, y se correspondían con viviendas unifamiliares construidas antes del año 1925.

Durante el periodo noviembre 1994-febrero 1995, se realizaron medidas de concentraciones de radón en la población de Teià [98], localizada a 20 km de Barcelona en una zona granítica. Las medidas se realizaron en el único colegio de la ciudad y en las viviendas de los alumnos, con el objetivo principal de determinar las dosis que estaban recibiendo por esta vía de exposición dichos alumnos. Los detectores utilizados fueron detectores de trazas de Makrofol.

En el colegio se situaron 10 dosímetros, distribuidos en 10 aulas, cinco en la planta baja y cinco en la planta primera. Se seleccionaron 15 alumnos para colaborar en el estudio colocando los dosímetros en sus viviendas, se colocaron dos dosímetros por vivienda, uno en la sala de estar y otro en un dormitorio.

Los resultados obtenidos mostraron que los valores medidos en el colegio, fueron similares a los medidos en las viviendas, sin diferencias significativas.

Los valores medios aritméticos de las concentraciones de radón, fueron los siguientes: en las viviendas del centro de la villa 52 Bq/m<sup>3</sup>, en las viviendas de la zona residencial próxima al colegio, 46 Bq/m<sup>3</sup> y en el colegio 48 Bq/m<sup>3</sup>.

No obstante a los datos obtenidos en las zonas habitada de las viviendas, en un sótano de una de ellas, localizada en el centro de la población, se detectó un valor de 198 Bq/m<sup>3</sup>, este valor fue atribuido por el grupo investigador, a las características del terreno granítico, y a la carencia de ventilación del sótano.

Los valores detectados en el colegio mostraron la influencia del terreno en los valores medios aritméticos, 61 Bq/m<sup>3</sup> en la planta baja y 46 Bq/m<sup>3</sup> en la planta alta.

### *2.3. Estudio del transporte y de los mecanismos de entrada*

Se desarrolló durante el proyecto, un modelo estacionario bidimensional, que describe la entrada del radón producido en el suelo al interior de una vivienda a través de una fisura en los cimientos de la misma, considerando dos procesos, la difusión debida a la existencia de un gradiente de concentración de radón y la convección debida al gradiente de presión existente entre el interior y la atmósfera [89].

Como conclusiones del estudio realizado se destacaron las siguientes conclusiones [93] [99]:

- El transporte del radón en el suelo está muy influenciado por el valor de la permeabilidad del mismo.
- Tanto el flujo de radón como la concentración en el interior, son sensibles a pequeños cambios de

diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la vivienda, si la permeabilidad es superior a  $1 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>. En viviendas edificadas sobre terrenos de permeabilidad similar o superior a la indicada, podrían ser efectivas medidas de sobrepresión, para paliar eventuales concentraciones de radón elevadas.

- El aumento de la porosidad del suelo, aumenta la concentración del radón en el interior de la vivienda, efecto que empieza a ser asintótico para porosidades del orden de 0,5.
- El aumento del coeficiente de difusión en el terreno, produce un aumento de la concentración en el interior de la vivienda, este coeficiente tiene un efecto muy marcado sobre las concentraciones de radón que pueden encontrarse en el interior de las viviendas.
- Se encontró una correspondencia lineal entre las concentraciones de radón existentes en el terreno y las concentraciones en el interior de las viviendas.
- Es de destacar el hecho de que se obtienen concentraciones de radón importantes en el interior de las viviendas, con anchuras de fisuras de únicamente unas micras.
- Es muy importante tener información precisa sobre el valor del coeficiente de difusión del radón en el suelo y de la permeabilidad, así como del valor de la concentración de radón existente en el terreno, ya que variaciones en estos parámetros pueden causar variaciones significativas en la concentración de radón en el interior de las viviendas.

PROGRAMA REALIZADO POR LA  
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA



4

El programa realizado por la Universidad de La Laguna, dentro de los acuerdos de colaboración firmados con el CSN [100] [101], se centraron en la determinación de las concentraciones de radón existentes en el interior de las viviendas de las diferentes islas y en algunas cuevas; adicionalmente se realizaron medidas de niveles de radiación gamma y de concentraciones de isótopos naturales en el terreno.

## 1. Medida de radón en el interior de las viviendas

A continuación se describen los programas de medida de concentraciones de radón, llevados a cabo en las distintas islas del archipiélago.

### 1.1. Resultados de la isla de Tenerife

Los resultados de las medidas llevadas a cabo en esta isla, se corresponden con una campaña realizada entre los meses de enero y abril de 1990 [102] y durante el año 1991 [103].

En cada una de las casas, se colocaron cartuchos de carbón activo, del tipo EPA, de acuerdo con la metodología indicada por dicho organismo [104].

Los muestreadores se situaron en la planta baja de las viviendas, durante un período de tres días y en siete de las casas simultáneamente dos cartuchos, con objeto de comprobar la reproducibilidad de los resultados [104]. Los cartuchos se midieron en un detector de INa(Tl), determinando la concentración de radón, mediante la identificación de los correspondientes picos del  $^{210}\text{Pb}$  y del  $^{210}\text{Bi}$ . Con un tiempo de medida de 10 minutos el LID obtenido fue de  $11 \text{ Bq/m}^3$ .

Adicionalmente, en 16 casas de Tenerife se colocaron detectores de trazas durante un período de tres meses, en los mismos lugares donde se situaron los cartuchos de carbón activo [102] [104]. El detector utilizado fue de trazas de Makrofol tipo Karlsruhe.

En la tabla 42 se han recopilado los resultados obtenidos en las diferentes poblaciones de la isla [102] [103] [105].

Los resultados, mostraron que los valores mas elevados se midieron en cinco casas de la isla y que estuvieron comprendidos entre  $258,3$  y  $869,5 \text{ Bq/m}^3$ . Estos valores coincidieron con casas poco ventiladas. Consultada una información mas detallada, en cuanto a los núcleos de población en los que fueron realizadas las medidas [105]. Se identificaron únicamente cuatro casas correspondientes a las poblaciones de San Isidro ( $258,3 \text{ Bq/m}^3$ ), Santiago del Teide ( $430,3$  y  $869,5 \text{ Bq/m}^3$ ) y La Esperanza, donde en la única casa donde se muestreó se obtuvo un valor de  $853,2 \text{ Bq/m}^3$ .

Adicionalmente en [102] y en relación con las casas ventiladas, se indicaba que los valores generalmente estuvieron comprendidos entre  $11 \text{ Bq/m}^3$  (valor del LID) y  $172 \text{ Bq/m}^3$ , existiendo dos excepciones, donde los valores fueron de  $242,7 \text{ Bq/m}^3$  y  $612 \text{ Bq/m}^3$  y que según la referencia [105], se midieron en casas de las poblaciones de La Orotava y de La Laguna.

Los valores elevados encontrados en casas pocos ventiladas se obtuvieron en viviendas localizadas en zonas basálticas, en cambio en las casas ventiladas no se encontró una relación clara entre los valores y las características geológicas. Tampoco el tipo de material utilizado en la construcción de las casas, marcó una diferencia entre los valores medidos.

El valor medio de concentración de radón obtenido, mediante los detectores de trazas, fue de  $58 \text{ Bq/m}^3$ , mientras el obtenido a través de los cartuchos de carbón fue de  $37 \text{ Bq/m}^3$  [104].

### 1.2. Resultados de la isla de Fuerteventura

Los resultados correspondientes a esta isla, están divididos en dos campañas, la primera de ellas realizada en el mismo período que la indicada anteriormente en la isla de Tenerife y en la que se utilizaron muestreadores de carbón activo [102] [103], considerándose en total 10 casas de nueve núcleos de población [105]. Una segunda campaña comenzó en noviembre de 1993, se midieron los niveles de radón en un total de 75 viviendas de 31 núcleos de población.

En esta segunda campaña se utilizaron detectores de trazas que estuvieron expuestos durante tres meses

Tabla 42. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Tenerife

| Población              | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|------------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Santa Cruz de Tenerife | 9                   | 29,1 (9,2-59,2)                         |
| Bajamar                | 2                   | 28,5 (20-37)                            |
| Candelaria             | 1                   | 13,0                                    |
| Granadilla             | 1                   | 9,6                                     |
| Adeje                  | 2                   | 33,8 (15,2-52,5)                        |
| Puerto de Guimar       | 1                   | 35,5                                    |
| La Orotava             | 3                   | 115 (37-243)                            |
| Santa Úrsula           | 1                   | 42,9                                    |
| Los Realejos           | 1                   | 172,4                                   |
| Icod                   | 2                   | 94,4 (75,6-113,2)                       |
| Guimar                 | 1                   | 28,9                                    |
| San Isidro             | 2                   | 134,9 (11,5-258,3)                      |
| Taco                   | 1                   | 52,4                                    |
| Tegueste               | 2                   | 51,3 (14,2-88,4)                        |
| Tacoronte              | 2                   | 25,3 (18,1-32,6)                        |
| San Miguel             | 2                   | 54,4 (52,9-55,9)                        |
| La Laguna              | 5                   | 227,6 (29,4-612,7)                      |
| Santiago del Teide     | 4                   | 354,7 (27,4-869,5)                      |
| Guamasa                | 2                   | 47,3 (34,4-60,3)                        |
| Las Mercedes           | 1                   | 82,3                                    |
| La Esperanza           | 1                   | 853,2                                   |
| Las Lagunetas          | 1                   | 15,5                                    |

distribuyéndose dos detectores por vivienda en diferentes habitaciones [106]. Los resultados obtenidos en

ambas campañas se presentan respectivamente en las tablas 43 y 44.

Tabla 43. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Fuerteventura. Primera campaña

| Población          | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|--------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Puerto del Rosario | 2                   | 44,0(LID-44,0)                          |
| Casillas del Ángel | 1                   | 42,6                                    |
| Tetir              | 1                   | 40,3                                    |
| Pájara             | 1                   | 24,8                                    |
| Antigua            | 1                   | LID                                     |
| Tuineje            | 1                   | 14,8                                    |
| Corralejo          | 1                   | 9,0                                     |
| Vega del Río       | 1                   | LID                                     |
| Panorama           | 1                   | 93,4                                    |

LID = Límite de detección

Tabla 44. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Fuerteventura. Segunda campaña

| Población               | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Puerto del Rosario      | 25                  | 56,4(21-135)                            |
| Buenavista              | 1                   | 99                                      |
| Tomogán                 | 1                   | 43                                      |
| Casillas del Ángel      | 1                   | 75                                      |
| Murillo                 | 1                   | 52                                      |
| Las Parcelas            | 1                   | 80                                      |
| El Matorral             | 1                   | 64                                      |
| Llanos de la Concepción | 1                   | 50                                      |
| Tetir                   | 1                   | 132                                     |
| El Charco               | 1                   | 40                                      |
| Pájara                  | 2                   | 48(46-50)                               |
| Costa Calma             | 1                   | 37                                      |

1.3. Resultados de la isla de Hierro

La única campaña realizada en la isla de Hierro, se comenzó en mayo de 1994. Se utilizaron detectores pasivos de trazas que estuvieron expuestos durante un período de tres meses, en un total de 10 viviendas

de ocho poblaciones de la isla. En cada una de las viviendas se colocaron dos detectores en dos habitaciones distintas. El valor promedio estimado para el conjunto de viviendas de la isla fue de 45,4 Bq/m<sup>3</sup> [106]. En la tabla 45 se detallan los resultados obtenidos en cada una de las poblaciones.

Tabla 45. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Hierro

| Población  | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|------------|---------------------|-----------------------------------------|
| El Golfo   | 2                   | 44,1(30,8-57,5)                         |
| El Pinar   | 2                   | 32,7(30,0-35,4)                         |
| San Andrés | 1                   | 78,6                                    |
| Sabinosa   | 1                   | 28,9                                    |
| Guarazoca  | 1                   | 44,4                                    |
| Isora      | 1                   | 50,0                                    |
| Mocanal    | 1                   | 52,4                                    |
| Valverde   | 1                   | 46,7                                    |

#### 1.4. Resultados de la isla de La Gomera

En el reparto de detectores de la isla de La Gomera, se siguió el procedimiento de tratar de cubrir el mayor número de núcleos habitados existentes. La campaña realizada en esta isla se comenzó el 30 de abril de 1994 y se utilizaron detectores pasivos de trazas, que estuvieron expuestos durante un período de tres meses, en un total de 17 viviendas de 11 poblacio-

nes. En cada una de las viviendas, se colocaron dos detectores en dos habitaciones distintas y adicionalmente, en cinco habitaciones de cinco viviendas, se hicieron dos medidas simultáneas. El valor promedio estimado para el conjunto de viviendas de la isla fue de 44,8 Bq/m<sup>3</sup>.

En la tabla 46, se exponen los resultados obtenidos en cada una de las poblaciones.

Tabla 46. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de La Gomera

| Población      | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|----------------|---------------------|-----------------------------------------|
| San Sebastián  | 5                   | 17,8 (8,1-26,6)                         |
| Valle Hermoso  | 1                   | 47,3                                    |
| La Dama        | 2                   | 74,1 (56,3-91,9)                        |
| La Calera      | 1                   | 36,1                                    |
| El Agulo       | 1                   | 34,5                                    |
| Hermigua       | 2                   | 41,2 (31,8-50,7)                        |
| Vueltas        | 1                   | 31,0                                    |
| Arure          | 1                   | 26,2                                    |
| Alojera        | 1                   | 148,4                                   |
| Valle Abajo    | 1                   | 47,2                                    |
| Playa Santiago | 1                   | 54,1                                    |

### 1.5. Resultados de la isla de La Palma

La información recibida en el CSN, sobre las concentraciones de radón medidas en el interior de viviendas de esta isla, está contenida en el documento [107],

en el que se indica que en julio del año 1993, se repartieron 179 detectores en 79 viviendas de la isla. El reparto se hizo proporcional al número de habitantes (2 detectores por cada 500 habitantes) y se recogieron el mes de octubre del mismo año.

Tabla 47. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de La Palma

| Población             | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|-----------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Barlovento            | 2                   | 35,5 (26,5-44,6)                        |
| La Cuesta             | 1                   | 19,6                                    |
| Las Cabezadas         | 1                   | 32,0                                    |
| Botazo                | 1                   | 99,0                                    |
| Breña                 | 1                   | 23,0                                    |
| El Llanito            | 1                   | 37,2                                    |
| Miranda (Breña Alta)  | 1                   | 25,2                                    |
| San Pedro             | 1                   | 20,0                                    |
| La Polvacera          | 1                   | 25,7                                    |
| San Antonio           | 1                   | 11,2                                    |
| San José              | 1                   | 21,5                                    |
| El Paso               | 4                   | 58,2 (24,9-138,8)                       |
| La Rosa               | 1                   | 37,1                                    |
| Las Manchas (El Paso) | 1                   | 22,4                                    |
| Paso de Abajo         | 1                   | 137,6                                   |
| Tacande               | 1                   | 5,5                                     |
| Tajuya                | 1                   | 51,4                                    |
| Las Indias            | 1                   | 12,5                                    |
| Los Canarios          | 1                   | 24,0                                    |
| Los Quemados          | 1                   | 12,6                                    |
| Franceses             | 1                   | 16,0                                    |
| Santo Domingo         | 1                   | 14,4                                    |
| Argual                | 2                   | 7,85 (7,5-8,2)                          |
| La Laguna             | 1                   | 25,9                                    |
| Las Manchas           | 1                   | 9,4                                     |

Tabla 47. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de La Palma (*continuación*)

| Población                   | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|-----------------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Los Llanos de Aridane       | 3                   | 43,8(22,9-84,6)                         |
| Montaña Tenisca             | 2                   | 9,65(6,5-12,8)                          |
| Retamar                     | 1                   | 13,0                                    |
| Tajuya (Los Llanos)         | 1                   | 7,2                                     |
| Todoque                     | 1                   | 47,0                                    |
| Triana                      | 1                   | 27,7(26,6-28,8)                         |
| El Pinar                    | 1                   | 69,8                                    |
| Puntagorda                  | 1                   | 15,1                                    |
| El Granel                   | 1                   | 26,0                                    |
| La Galga                    | 1                   | 19,6                                    |
| Los Sauces (Casco)          | 2                   | 23,2(19,8-26,7)                         |
| San Andrés de los Sauces    | 1                   | 14,9                                    |
| Verada de las Lomas         | 1                   | 54,1                                    |
| Cuesta del Llano de la Cruz | 1                   | 19,1                                    |
| Juan Mayor                  | 1                   | 22,3                                    |
| Miranda                     | 1                   | 30,8                                    |
| Sta Cruz de la Palma        | 12                  | 27,6(19,8-35,6)                         |
| La Costa                    | 1                   | 16,6                                    |
| Puerto de Tazacorte         | 1                   | 19,1                                    |
| San Borondón                | 1                   | 22,5                                    |
| Tazacorte                   | 3                   | 31,6(23,7-40,4)                         |
| La Punta de Tijarafe        | 1                   | 13,5                                    |
| Tijarafe                    | 1                   | 15,1                                    |
| El Pueblo                   | 1                   | 20,8                                    |
| La Sabina                   | 1                   | 26,3                                    |
| Malpais de Abajo            | 1                   | 15,3                                    |
| Monte de Breña              | 1                   | 15,3                                    |
| Monte de Luna               | 1                   | 15,8                                    |
| Tigalate                    | 1                   | 16,3                                    |

A través de los datos obtenidos en las distintas poblaciones, se ha estimado un valor medio para la isla de 28,4 Bq/m<sup>3</sup>.

### 1.6. Resultados de la isla de Lanzarote

La única campaña realizada en la isla de Lanzarote, se comenzó en abril de 1994. Se utilizaron detectores pasivos de trazas que estuvieron expuestos du-

rante un período de tres meses, en un total de 63 viviendas de 33 poblaciones de la isla. En cada una de las viviendas se colocaron dos detectores en dos habitaciones distintas. El valor promedio estimado para el conjunto de viviendas de la isla fue de 49,7 Bq/m<sup>3</sup> [106].

En la tabla 48 se presentan los valores obtenidos en las diferentes poblaciones de la isla.

Tabla 48. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Lanzarote

| Población         | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|-------------------|---------------------|-----------------------------------------|
| Arrecife          | 10                  | (28,0-63,0)                             |
| Arganda Alta      | 2                   | 57,5 (57,0-58,0)                        |
| Maneje            | 2                   | 47,0 (44,0-50,0)                        |
| El Cable          | 1                   | 93,0                                    |
| Haria             | 2                   | 52,0 (38,0-66,0)                        |
| Punta Mujeres     | 1                   | 44,0                                    |
| Mala              | 1                   | 31,0                                    |
| Maguez            | 1                   | 46,0                                    |
| Ye                | 1                   | 37,0                                    |
| San Bartolomé     | 5                   | 55,4 (35,0-68,0)                        |
| Guame             | 1                   | 53,0                                    |
| Playa Honda       | 3                   | 31,0 (21,0-41,0)                        |
| Teguiise          | 2                   | 55,0 (45,0-65,0)                        |
| Tahiche           | 3                   | 54,0 (33,0-92,0)                        |
| Guatiza           | 3                   | 65,0 (37,0-93,0)                        |
| Caleta Famara     | 1                   | 26,0                                    |
| Los Valles        | 1                   | 104,0                                   |
| Costa Teguiise    | 2                   | 43,0 (37,0-49,0)                        |
| Tao               | 1                   | 54,0                                    |
| Tias              | 2                   | 57,5 (50,0-65,0)                        |
| La Asomada        | 1                   | 25,0                                    |
| Macher            | 1                   | 55,0                                    |
| Puerto del Carmen | 1                   | 25,0                                    |

Tabla 48. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Lanzarote (continuación)

| Población     | Número de viviendas | Concentración (rango) Bq/m <sup>3</sup> |
|---------------|---------------------|-----------------------------------------|
| La Santa      | 1                   | 26,0                                    |
| Mancha Blanca | 1                   | 56,0                                    |
| La Vegueta    | 1                   | 58,0                                    |
| Yaiza         | 2                   | 34,5 (24,0-45,0)                        |
| Femez         | 1                   | 42,0                                    |
| Las Casitas   | 1                   | 49,0                                    |
| Playa Blanca  | 2                   | 45,0 (33,0-57,0)                        |
| Las Brañas    | 1                   | 65,0                                    |
| Uga           | 1                   | 51,0                                    |

### 1.6. Resultados de la isla de Gran Canaria

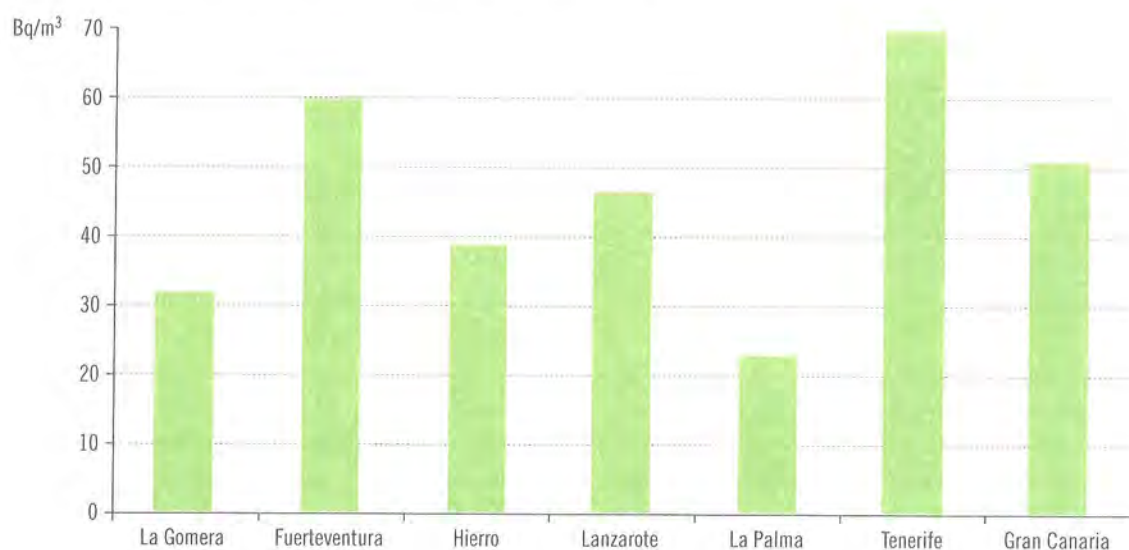
Con posterioridad al acuerdo firmado con el CSN, el laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental de la Universidad de la Laguna, realizó un estudio de las concentraciones de radón existentes en las viviendas de la isla de Gran Canaria [108].

Esta isla es la mas poblada del Archipiélago, con una extensión de 1.560 km<sup>2</sup> y es de naturaleza volcánica, pudiéndose diferenciar en su territorio, di-

versas formaciones: coladas y piroclastos basálticos o sálicos del plioceno y mioceno, además de aglomerados volcánicos y formaciones sedimentarias. Su orografía es abrupta con una altitud máxima de 1.900 metros.

El reparto de los detectores en la isla se realizó siguiendo el criterio de cubrir la mayor parte del territorio de la isla. En la capital, Las Palmas de Gran Canaria con una población de 700.000 habitantes, se midió en una vivienda por cada 10.000 habitantes

Figura 10. Concentraciones medias de radón en viviendas de las Islas Canarias



y en el resto de poblaciones, se intentó medir en una vivienda por cada 2.000 habitantes.

Se distinguió entre las viviendas mas habituales existentes en la isla, unifamiliares, semi adosadas, adosadas y multifamiliares. Los detectores se colocaron en el dormitorio principal y en el salón de las viviendas, a una altura de 1,2 m y separados de las paredes como mínimo 0,5 m, evitando la proximidad de puertas y ventanas y las corrientes de aire. Los detectores permanecieron expuestos durante el período marzo-mayo de 1995.

Los detectores utilizados fueron de Makrofol de forma circular de 50 mm de diámetro y 330  $\mu$  de grosor, colocados en el interior de un contenedor de plástico con filtro tipo Karlsruhe.

En el momento de la colocación de los detectores, se entregó un cuestionario que incluía preguntas sobre aspectos técnicos de la vivienda y hábitos de los residentes.

Los detectores una vez retirados, se transportaron al laboratorio donde se sometieron a un proceso de revelado electroquímico, determinándose el número de trazas, mediante un lector de microfichas.

La calibración del sistema de medida se llevó a cabo en el National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido, estableciéndose una sensibilidad de 0,56 trazas. $\text{cm}^2$  KBq. $\text{m}^3$ . $\text{h}^{-1}$ .

El valor medio aritmético obtenido para la isla fue 67 Bq/ $\text{m}^3$  y el valor medio geométrico 51 Bq/ $\text{m}^3$ . El rango de valores estuvo comprendido entre 18 y 433 Bq/ $\text{m}^3$ . Los valores mas elevados se obtuvieron en los sótanos (valor medio 148 Bq/ $\text{m}^3$ ), los valores intermedios en las plantas bajas (78 Bq/ $\text{m}^3$  valor medio) y los mas bajos en el resto de plantas (50 Bq/ $\text{m}^3$  valor medio).

El resultado confirma una conclusión a la que ha llegado el grupo investigador en las medidas realizadas en las islas, que el radón en el interior de viviendas de Canarias es producido esencialmente por la entrada en las viviendas del radón generado en la corteza terrestre [109].

Otro parámetro que tiene notable influencia en la concentración de radón, medida en el interior de las viviendas es la ventilación ya que los valores encontrados dependían significativamente del régimen de ventilación de las viviendas.

Se encontró influencia en los valores medidos, con el material de construcción. Mientras la concentración media correspondiente a viviendas edificadas con bloques de hormigón hueco (60 Bq/ $\text{m}^3$ ) fue muy similar al valor medio obtenido en viviendas edificadas con bloques de hormigón macizo (54 Bq/ $\text{m}^3$ ), el valor medio correspondiente a 16 viviendas edificadas con piedra y barro fue de 121 Bq/ $\text{m}^3$ .

Los valores medios aritméticos de las concentraciones de radón, obtenidos en los principales municipios en los que administrativamente se divide la isla, se presentan en la tabla 49.

Tabla 49. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Gran Canaria

| Población     | Número de viviendas | Concentración (rango) (Bq/ $\text{m}^3$ ) |
|---------------|---------------------|-------------------------------------------|
| Arucas        | 9                   | 50 (29-177)                               |
| Galdar        | 4                   | 64 (25-98)                                |
| Las Palmas    | 48                  | 42 (20-140)                               |
| San Bartolomé | 6                   | 69 (32-113)                               |
| Telde         | 7                   | 93 (30-200)                               |
| Teror         | 7                   | 210 (38-400)                              |

De los valores medidos, el grupo investigador, destaca el valor de la población de Teror, situada en el centro de la isla, cuya estructura geológica es de coladas y piroclastos sálicos del primer ciclo volcánico, diferente del resto del territorio.

La estimación de dosis realizada considerando un factor de conversión tasa de dosis-concentración de radón de 18  $\mu\text{Sv/año}$  por Bq/ $\text{m}^3$ , según ICRP-65 [41], arrojó valor medio para los habitantes de la isla de 1,2 mSv/año.

## 2. Medida de concentraciones de radón en el interior de cuevas

Las medidas de concentraciones de radón en el interior de cuevas se llevó a cabo en las islas de Lanzarote y Tenerife [107].

### Isla de Lanzarote

En la isla de Lanzarote, se realizaron medidas de concentraciones de radón en el interior de las dos cuevas volcánicas más importantes de la isla: Los Jameos del Agua y la Cueva de los Verdes, cuevas que, aparte de tener un gran interés desde el punto de vista geológico, lo tienen por ser un foco de atracción turística.

Las cuevas situadas en el término municipal de Haría, el municipio más septentrional de la isla, fueron originadas por la erupción del volcán «La Corona», que dio origen al gran tubo volcánico de Los Jameos, de una longitud de 6.100 metros.

Las cuevas donde se han medido las concentraciones de radón son los tramos más característicos de este tubo volcánico.

El tramo conocido como Jameos del Agua, muy cercano a la costa y que está parcialmente inundado por agua salada formando lagunas, presenta una altura de 25 m, siendo frecuentes la existencia de grandes salas de hasta 15 m de anchura, como la denominada «Salón de Conferencias», donde sería posible colocar hasta 500 butacas. En este «Salón» existe una ventilación suave y una temperatura uniforme aproximada de 19 °C.

Se colocaron dos detectores que estuvieron expuestos durante un período de 30 días, uno situado en el «Salón de Conferencias» y otro en una zona más abierta y ventilada cercana a la entrada, donde los valores medidos fueron respectivamente de 151 Bq/m<sup>3</sup> y 54 Bq/m<sup>3</sup>.

En el tramo conocido como La Cueva de los Verdes, que ocupa alrededor de un km, se colocaron dos detectores a una profundidad de 500 m y a una dis-

tancia de la pared de 30 cm, también durante un período de 30 días, obteniéndose unos valores de 226 y 151 Bq/m<sup>3</sup>.

### Isla de Tenerife

Las medidas llevadas a cabo en la isla de Tenerife, se realizaron dentro de las actividades para la determinación del factor de calibración del equipo de medida, que comprendía adicionalmente la intercomparación con el laboratorio de la Universidad de Gante y la exposición de los detectores en los laboratorios del National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido.

Las cuevas donde se llevaron a cabo las medidas fueron las denominadas «Los Beltranes» y «San Andrés». La cueva de «Los Beltranes» es una galería de aprovechamiento de agua subterránea ubicada en el municipio del Puerto de la Cruz, donde se situaron el 24 de febrero de 1993, durante un mes, 10 detectores en un punto de la galería situado a una distancia de la entrada de 2 km [107]. El revelado electroquímico se realizó en la Universidad de Gante por el personal del Radon Research Group, cuyo responsable era el doctor André Poffijn, y la lectura de las trazas en la Universidad de La Laguna.

También se colocaron, junto con los 10 detectores indicados, cinco detectores de trazas proporcionados por la Universidad de Cantabria, que fueron leídos en EE.UU. Adicionalmente, miembros de la Facultad de Geológicas de la Universidad de La Laguna, interesados en conocer la concentración de radón en dicha galería, colocaron otros cinco detectores que fueron enviados a EE.UU para su lectura.

El valor medio obtenido con los detectores de la Universidad de Cantabria fue de 20.300 Bq/m<sup>3</sup>, mientras que dicho valor con los detectores de la Facultad de Geológicas fue de 24.000 Bq/m<sup>3</sup>.

Los detectores de la Universidad de La Laguna, no pudieron leerse con fiabilidad suficiente, debido a las altas concentraciones de radón que dieron lugar a una saturación de la zona sensible del detector.

Pese a no poder obtener un factor de calibración con estos resultados, el trabajo permitió determinar un valor representativo de la concentración de radón existente en una galería excavada en una zona del norte de la isla, con un substrato geológico típicamente volcánico.

En el caso de la galería de «San Andrés», ubicada en el municipio de Santa Cruz de Tenerife, se realizaron dos campañas de medida, una que comenzó el 13 de diciembre de 1993 y otra el 24 de enero de 1994.

En la primera campaña, se expusieron un total de 90 detectores de trazas (18 cada día durante cinco días) a 500 m de la entrada de la galería, profundidad en la que se había estimado previamente con detectores de carbón activo, que se podría tener una concentración de radón adecuada (200-400 traz./cm<sup>2</sup>) y constante. Algunos de esos detectores se leyeron en la Universidad de Gante.

Al mismo tiempo se colocaron diez detectores tipo «pico-rad», suministrados por la Universidad de Gante, que fueron expuestos durante períodos de dos días y que fueron medidos en dicha Universidad. También se colocaron detectores de carbón activo durante tres días siendo medidos por el Instituto Vulcanológico de Tenerife.

El rango de valores de concentración de radón obtenidos con los distintos métodos, fue el siguiente:

| Detector      | Concentración Bq/m <sup>3</sup> |
|---------------|---------------------------------|
| Trazas        | 4.000-5.000                     |
| Pico-rad      | 4.200-4.900                     |
| Carbón activo | 4.003-5.288                     |

En la segunda campaña, se colocaron también a una distancia de 500 m de la entrada, 60 detectores de trazas, que se expusieron durante un período de seis días y cinco detectores de carbón activo (Instituto Vulcanológico de Tenerife), que fueron expuestos durante tres días.

El valor medio de concentración de actividad obtenido con los detectores de trazas fue de 3.800 Bq/m<sup>3</sup> ( $\pm 13\%$ ), mientras con los de carbón activo, se obtuvo un valor medio de 5.330 Bq/m<sup>3</sup>.

### 3. Otros estudios de radiación natural

Adicionalmente a las medidas de concentraciones de radón realizadas en la isla de Tenerife, se tomaron muestras de suelos en 103 puntos de dicha isla. Estos puntos eran representativos de áreas de 5 km<sup>2</sup> en las que fue dividida la isla. Las muestras se tomaron a una profundidad de 5 cm, realizándose en las mismas después del tratamiento adecuado, la determinación de las concentraciones de <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K por espectrometría gamma. En la tabla 50, se presentan los valores obtenidos en Bq/kg (s) [104].

Tabla 50. Concentraciones de <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K en suelos de la isla de Tenerife

| Valor  | Concentración Bq/kg (s) |                   |                 |
|--------|-------------------------|-------------------|-----------------|
|        | <sup>226</sup> Ra       | <sup>232</sup> Th | <sup>40</sup> K |
| Medio  | 43,6                    | 53,8              | 665,3           |
| Mínimo | 7,3                     | 11,6              | 141,6           |
| Máximo | 104,0                   | 110,5             | 1.488,6         |

También en la isla de Tenerife, se desarrolló un programa de medida de niveles de radiación  $\gamma$  en el exterior de las viviendas. Los niveles de radiación se midieron con un detector GM tipo MC-71, de acuerdo con la metodología propuesta por un grupo de trabajo del NRPB [110]. Se tomaron un total de 103 medidas, representativas de áreas de 5 km<sup>2</sup> en las cuales fue dividida la isla. El fondo inherente del detector fue determinado mediante medidas realizadas en el mar en una barca construida de material plástico, a aproximadamente 2 km de la orilla, donde la profundidad era de unos 150 m. El valor correspondiente a la radiación cósmica al nivel del mar, 32 nGy/h se obtuvo del informe UNSCEAR del año 1982 [111] y el informe UNSCEAR del año 1988 [112], se consideró a la hora de obtener los valores a diferentes alturas.

El valor medio obtenido en la isla, de nivel de radiación gamma terrestre fue de 67 nGy/h, con un rango comprendido entre 18 nGy/h y 163 nGy/h. Los valores fueron inferiores a 70 nGy/h en el 58% de los lugares de medida y en 16 puntos, los valores excedieron una tasa de 100 nGy/h. Los valores de tasas de dosis mas elevados se correspondieron con aque-

llos lugares donde se obtuvieron los valores mas elevados de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$ .

En 17 lugares se realizaron medidas adicionales con una cámara de ionización de alta presión RSS-112 (HPIC), no observándose ninguna diferencia estadística significativa entre los dos grupos de valores.



PROGRAMA REALIZADO POR LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA



Con fecha 11 de diciembre de 2000 se firmó un acuerdo entre el CSN y la Universidad Politécnica de Cataluña, para la *Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida* [113].

El proyecto, con una duración de 18 meses fue realizado por el laboratorio de Estudios del Radón del Instituto de Técnicas Energéticas de dicha Universidad, dentro de las actividades que desde hace varios años viene realizando este equipo en el campo de los estudios del radón y sus descendientes.

El objetivo general del proyecto, era la adaptación de la cámara de radón existente en los laboratorios del INTE/UPC a los requerimientos de la futura norma ISO 13466 [114].

Los objetivos parciales del proyecto fueron los enumerados a continuación [115] [116]:

- Acondicionar la cámara de radón de forma que sirva de centro de referencia en nuestro país y se

puedan llevar a cabo las calibraciones de equipos de medida de concentraciones de radón de acuerdo a los requisitos de la futura norma ISO.

- Desarrollar los procedimientos de funcionamiento de la cámara y de calibración de los equipos de medida de la concentración de radón.
- Realización de una campaña de intercomparación de los equipos de medida de 10 grupos españoles.

### 1. Adaptación de la cámara a la norma ISO 13466

Para la adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466, se llevaron a cabo una serie de actuaciones de mejora sobre distintos sistemas de dicha cámara:

- Sistema de control de la estabilidad de la concentración de radón.
- Sistema de control de la homogeneidad de la concentración de radón.

Figura 11. Vista exterior de la cámara de radón del INTE/UPC



- Sistema de control de la estabilidad de los descendientes de radón.
- Sistema de medida de la concentración de radón trazado.
- Sistema de control de la temperatura y de la humedad relativa.
- Sistema de espectrometría alfa.

Asimismo dentro del proyecto se realizaron medidas de puesta en marcha y la actualización del programa informático de control de variables.

La segunda etapa del proyecto, estuvo dirigida a la implantación de un sistema de calidad, para lo cual se desarrollaron una serie de procedimientos que se agruparon en tres apartados.

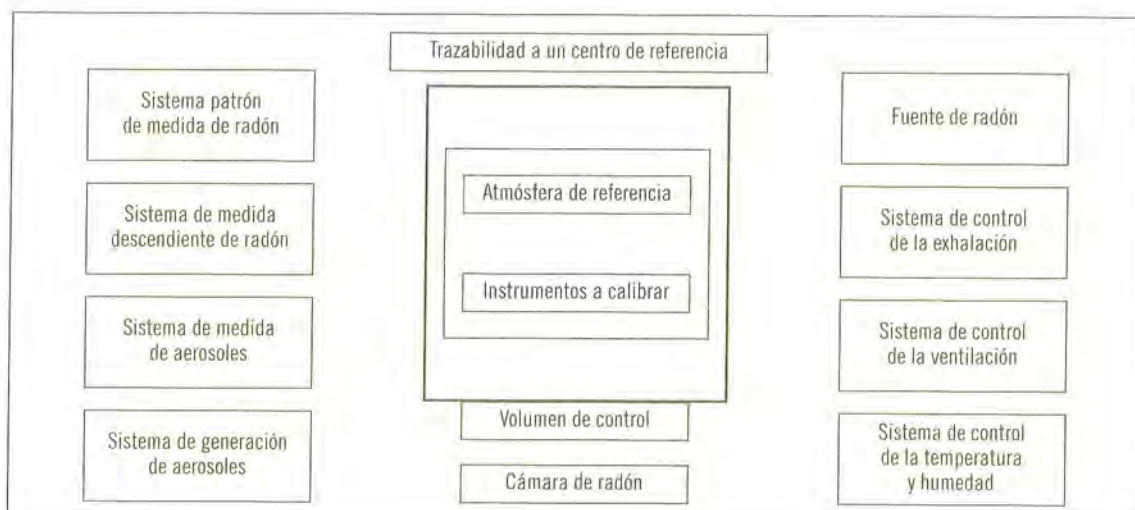
- Procedimientos de seguridad
  - Comprobación de la hermeticidad de la fuente generadora de radón.
  - Procedimiento para la medida de tasa de dosis de la fuente de kriptón
  - Procedimiento para la medida de la tasa de dosis en el laboratorio de radón y pasillo adyacente.

- Procedimientos de calibración.
  - Procedimiento para la calibración del sistema de medida de referencia de la actividad volúmica del radón.
  - Procedimiento de calibración del sistema de medida de la actividad de radón en un recipiente patrón.
  - Procedimiento para la calibración del equipo de medida de la concentración de radón ATMOS DPX.
  - Procedimiento para la calibración de sistemas de medida de radón.

## 2. Ejercicio de intercomparación de equipos de medida

El Consejo de Seguridad Nuclear junto con el Instituto de Técnicas Energéticas organizaron una campaña de intercomparación de sistemas pasivos de medida de la concentración de radón con el objetivo de contribuir a la fiabilidad de los resultados que estaban obteniendo diferentes laboratorios españoles que realizan medidas de radón. Dicha intercomparación llevada a cabo en el primer semestre del año 2002, estuvo precedida por los trabajos de adaptación de la cámara descritos anteriormente.

Figura 12. Principales componentes de una cámara de radón



Para la realización de la intercomparación se siguieron criterios técnicos de ámbito internacional Normas ISO/DIS 13466 y IEC 61577 y los criterios establecidos por la NEHA (The National Environmental Health Association) de los Estados Unidos.

La selección de los participantes se llevó a cabo por el CSN mediante contactos con los responsables de distintos laboratorios a los que se les invitó a participar, aquellos que aceptaron debieron cumplimentar previamente, un formulario donde se describían las características de los sistemas de

medida con los que participarían en la intercomparación.

A cada uno de los participantes se les envió un documento [117] sobre el programa de intercomparación, donde se indicaban los diferentes aspectos del desarrollo de la campaña, tales como la logística de la intercomparación y la metodología de evaluación de los resultados.

En la campaña participaron siete laboratorios con un total de 14 sistemas de medida. En la tabla 51, se muestra una relación de los laboratorios participantes y los sistemas de detección utilizados.

Tabla 51. Laboratorios participantes en la intercomparación de detectores pasivos de radón

| Laboratorio                                                                | Sistema de medida                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laboratorio de Dosimetría Externa.CIEMAT                                   | Electret E-perm. Configuración SST<br>Electret E-perm. Configuración LST                                                                                                                        |
| Instituto de Salud Carlos III<br>Ministerio de Sanidad                     | Carbón activo. Lectura INa                                                                                                                                                                      |
| Laboratorio de Radiactividad Ambiental<br>Universidad de Oviedo.           | Carbón activo. Lectura INa                                                                                                                                                                      |
| Laboratorio de Radiactividad Ambiental<br>Universidad de Valencia          | Carbón activo. Lectura INa                                                                                                                                                                      |
| Instituto de Técnicas Energéticas<br>Universidad Politécnica de Cataluña   | Carbón activo diseño propio. Lectura INa<br>Trazas LR-115 diseño propio. Revelado químico                                                                                                       |
| Cátedra de Física Médica<br>Universidad de Cantabria                       | Trazas CR-39 Radosys Revelado químico<br>Trazas CR-39 variante Radosys Rev. químico<br>Trazas CR-39 SSI. Rev. químico<br>Trazas CR-39 NRPB. Rev. químico<br>Trazas CR-39 Landauer. Rev. químico |
| Laboratorio Física de las Radiaciones<br>Universidad Autónoma de Barcelona | Trazas Makrofol KfK fibra de vidrio<br>Trazas Makrofol KfK fibra de vidrio + polietileno. Revelado electroquímico                                                                               |

El número inicial de detectores solicitado a cada uno de los laboratorios fue de 15 para cada sistema de medida, siendo tres de dichos detectores utilizados para la evaluación del fondo, no obstante lo indicado en la intercomparación, en dos sistemas de medida, se participó con únicamente cinco detectores, por lo que en este caso se decidió utilizar un único detector para la evaluación del fondo.

Los sistemas de medida y debido a sus características específicas se dividieron en dos grupos en función del nivel de concentración de radón a la que serían expuestos, nivel bajo (detectores de carbón activo y electrets SST) y nivel alto (detectores de trazas y electrets LST).

La exposición de bajo nivel se realizó durante un período de 70 horas y 10 minutos y se inició el 20 de abril de 2002, a las 11:30 horas. La concentración media durante el período de exposición fue de  $940 \pm 66$  Bq/m<sup>3</sup>. La exposición de nivel alto, tuvo una duración

de 143,75 horas, se inició el 24 de abril de 2002 a las 10:10 y la concentración media fue de  $5310 \pm 375$  Bq/m<sup>3</sup>. En la figura 13 se encuentran los sistemas de medida que fueron sometidos a esta exposición.

Todos los detectores fueron identificados de acuerdo con lo establecido en el programa de la intercomparación [117] mediante un número del sistema de medida del 1 al 14, seguido de un guión y un número correlativo del 1 al 15 para la identificación de cada detector.

La posición de los detectores en el interior de la cámara se realizó de manera que su distribución fuera homogénea en las distintas bandejas. En la figura 14 puede verse la colocación de los cartuchos de carbón activo y los electrets SST en el interior de la cámara para su exposición.

En todo momento se guardó la confidencialidad en la identidad de los laboratorios participantes.

Figura 13. Tipo de detectores de trazas y electrets LST

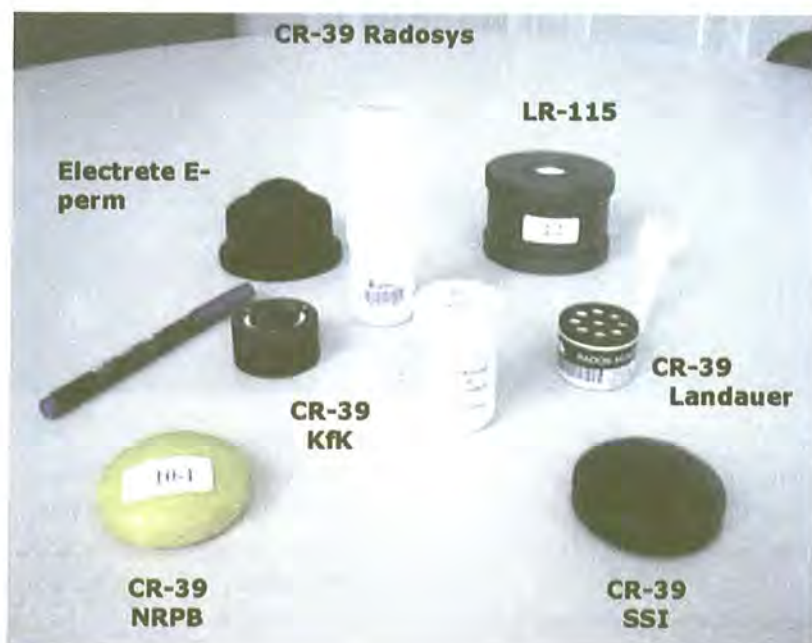


Figura 14. Exposición de cartuchos de carbón y electrets SST en el interior de la cámara de radón



En la tabla 52 se recogen las condiciones en las que se llevaron a cabo la exposición de los diferentes detectores durante la intercomparación.

Como principales conclusiones del proyecto realizado, se destacaron en su momento las siguientes [118] [119] [120]:

- Se ha conseguido que nuestro país cuente con una cámara de radón con todas las características exigibles a este tipo de instalaciones.
- La cámara tiene capacidad para la realización de calibraciones de sistemas, tanto activos como pasivos, de medida de las concentraciones de radón y de sus descendientes.
- La cámara de radón del INTE está integrada en el proyecto EUROMET *Intercomparison exercise of radon activity concentration calibration facilities*. N° 67.

Tabla 52. Condiciones de exposición de los detectores durante la intercomparación

| Condiciones                           | Exposición                   |                                |
|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
|                                       | Nivel bajo                   | Nivel alto                     |
| Tasa de exposición                    | 65.96 kBq.m <sup>-3</sup> .h | 65.96 kBq.m <sup>-3</sup> .h   |
| Período de tiempo                     | 70h. 10 m                    | 143 h. 45 m                    |
| Concentración media <sup>222</sup> Rn | 940 ± 66 Bq. m <sup>-3</sup> | 5310 ± 375 Bq. m <sup>-3</sup> |
| Temperatura                           | 20-21,2 °C                   | 20-21,2 °C                     |
| Humedad relativa                      | 42-47%                       | 42-47%                         |

- La cámara de radón del INTE dispone de un sistema de medida de la concentración de radón, con su correspondiente sistema de garantía de calidad trazada al PTB, con una incertidumbre del 5% (k = 2).
- La estabilidad de la concentración de radón en la zona de la cámara donde se exponen los detectores, no excede el 10% para los rangos de concentración medidos y la homogeneidad no excede el 5%.
- El control de la temperatura y la humedad relativa para las condiciones de referencia de 20 °C y 45% de temperatura y humedad relativa, tiene un rango de variación que es de ± 1 °C y ± 3%.
- Se dispone de un sistema que permite el control de la concentración y tamaño de las partículas en el interior de la cámara de manera que se puede mantener la concentración de descendientes del radón al nivel deseado.
- Se ha realizado por primera vez en nuestro país un ejercicio de intercomparación de medida de concentraciones de radón en la que han participado siete laboratorios con catorce sistemas de medida.
- Mediante la intercomparación realizada, se ha podido constatar un nivel aceptable de fiabilidad en las medidas realizadas por los distintos laboratorios e identificar las posibles mejoras a introducir en el proceso de medida.
- Se recomienda que los laboratorios participen en una intercomparación con periodicidad bienal, con objeto de mantener los niveles de fiabilidad requeridos en este tipo de medidas.

El proyecto fue presentado en la Jornada sobre resultados del Plan de Investigación del CSN el 12 de diciembre de 2002 [121].



OTROS PROGRAMAS DE MEDIDA DE RADÓN  
EN VIVIENDAS ESPAÑOLAS



6

Aunque no fueron realizados dentro de acuerdos de colaboración firmados con el CSN, las Universidades de Oviedo y Extremadura, llevaron a cabo en su momento, campañas de medida de radón en viviendas de sus respectivas regiones.

### 1. Estudio en el Principado de Asturias

Este estudio realizado por el Laboratorio de Energía Nuclear de la Universidad de Oviedo [122], se centró en las cuatro principales ciudades del Principado, Oviedo, Gijón, Avilés y Mieres.

Las viviendas elegidas fueron bloques de apartamentos y la selección se realizó mediante una encuesta entre estudiantes de la Universidad de Oviedo. Se solicitó la colaboración de 300 alumnos, respondiendo aproximadamente 150 que mediante una selección posterior quedaron reducidos a 106 que fueron los que participaron al final.

Se tomaron medidas en un total de 106 viviendas, mediante la utilización de cartuchos de carbón activo. Se expusieron un total de 1016 cartuchos, que posteriormente fueron medidos en un detector de centelleo sólido NaI(Tl). Las concentraciones de radón se determinaron a través de los fotopicos del  $^{214}\text{Pb}$  (295 y 352 KeV) y del  $^{214}\text{Bi}$ . (609 KeV).

En cada vivienda se realizó un total de once medidas durante un año.

Adicionalmente en la ciudad de Oviedo, se llevaron a cabo medidas de radón en el exterior. Estas medidas se realizaron mediante el método de los dos filtros [123], obteniéndose un valor medio geométrico de  $5 \text{ Bq/m}^3$ .

En la tabla 53 se han recopilado el valor medio y los valores mínimo y máximo detectados en cada una de las cuatro ciudades.

Las diferencias obtenidas en las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  de las cuatro ciudades, fueron atribuidas al tipo de suelo existente en cada ciudad, aspecto que según el grupo investigador, justificaba los valores mas bajos medidos en las ciudades de Oviedo y Avilés.

Tabla 53. Concentraciones de radón en viviendas de Asturias

| Población | Número de viviendas | Concentración* (rango) ( $\text{Bq/m}^3$ ) |
|-----------|---------------------|--------------------------------------------|
| Gijón     | 30                  | 32 (7,8-413)                               |
| Oviedo    | 40                  | 17,7 (5-67,7)                              |
| Avilés    | 26                  | 22,8 (5-89,7)                              |
| Mieres    | 10                  | 27,1 (5-197)                               |
| Total     | 106                 | 23 (5-413)                                 |

\* Valor medio geométrico.

En todas las ciudades se observó una diferencia entre los valores medidos en las plantas bajas, mas elevados, y los primeros pisos, pero no entre estos y los restantes pisos.

El valor medio de dosis que debido a la inhalación de  $^{222}\text{Rn}$ , estarían recibiendo los habitantes de las cuatro ciudades, se estimó en  $0,62 \text{ mSv/año}$  [41] [124].

### 2. Estudio en la Comunidad de Extremadura

El programa de medida de radón en viviendas de la Comunidad de Extremadura, fue realizado mediante colaboración entre el Departamento de Física de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Extremadura (Cáceres) y el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia [125].

Las medidas se llevaron a cabo en un total de 194 viviendas de 54 poblaciones, durante el período noviembre 1998-julio 2000, utilizando cartuchos de carbón activo.

Estos cartuchos se colocaron en habitaciones cerradas a una altura mínima del suelo de 50 cm y después de dos días de exposición los cartuchos fueron retirados y enviados al laboratorio de la Universidad de Valencia para su medida.

La concentración de radón, fue determinada por espectrometría gamma a través de los fotopicos de  $0,294$

y 0,352 MeV del  $^{214}\text{Pb}$  y de 0,609 MeV del  $^{214}\text{Bi}$ , mediante un detector de NaI(Tl), de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  equipado con un sistema multicanal.

El valor medio geométrico de las concentraciones de radón fue de  $90 \text{ Bq/m}^3$ , con un intervalo de valores comprendido entre 18,5 y  $7.228 \text{ Bq/m}^3$ . El valor de  $90 \text{ Bq/m}^3$  implicaría una dosis efectiva media anual para la población de  $1,6 \text{ mSv/año}$  [126].

De los edificios estudiados, 64% presentaron concentraciones medias anuales de radón superiores a  $200 \text{ Bq/m}^3$  y un 22% valores superiores a  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

Los autores relacionaron los resultados encontrados con la geología de la zona, dado que las poblaciones donde se midieron concentraciones superiores a  $400 \text{ Bq/m}^3$  se encontraban en zonas con predominio de rocas ígneas, principalmente granitos con concentraciones mas elevadas de uranio [127].

En las zonas sedimentarias, se localizaron las poblaciones donde se midieron concentraciones inferiores a  $200 \text{ Bq/m}^3$ .

Otros aspectos considerados dentro del estudio realizado fueron los siguientes, la influencia de la altura del lugar de medida dentro del edificio, los materiales de construcción y la influencia de la ventilación en los valores de las concentraciones.

El estudio de la influencia de la altura se realizó considerando los resultados obtenidos en los diferentes lugares de la viviendas donde se colocaron los cartuchos, (sótano, planta baja y primera planta). No se observó la esperada disminución de los valores obtenidos entre los sótanos y las plantas bajas, pero si entre estos dos lugares y las primeras plantas.

Los valores medios fueron los siguientes:

|                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| Sótanos (55 lugares)          | $145 \pm 7 \text{ Bq/m}^3$ |
| Plantas bajas (127 lugares)   | $152 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$ |
| Primeras plantas (12 lugares) | $83 \pm 3 \text{ Bq/m}^3$  |

Dado el alto porcentaje de viviendas unifamiliares existentes en la comunidad extremeña, (el 65% de los lugares donde se realizaron medidas estuvieron localizados en la planta baja) y los relativamente elevados valores de radón encontrados en las plantas bajas de las casas pertenecientes a poblaciones localizadas sobre terrenos con predominio de rocas ígneas, se llevó a cabo un estudio mas detallado, de la influencia del material de construcción de los suelos en los valores encontrados. Los materiales considerados fueron los siguientes, cemento, baldosas cerámicas, piedra y ladrillo rojo.

Se observó que la concentración de radón en esos edificios se incrementó en proporción a la porosidad del material utilizado en la construcción del suelo, siendo menor con suelos de baldosas y mayor con suelos de cemento.

El estudio de la influencia de la ventilación en la reducción de los valores de radón, se estudió en una casa con concentraciones elevadas. En esa casa se seleccionó el sótano con una superficie de  $140 \text{ m}^2$  y se colocaron cinco cartuchos, uno en cada esquina y otro en el centro.

La primera medida se llevó a cabo manteniendo previamente el sótano cerrado durante 48 horas y con la puerta y las dos ventanas cerradas. El valor medio obtenido considerando los cinco detectores fue de  $1.600 \text{ Bq/m}^3$ . Posteriormente se repitió la medida manteniendo la puerta y ventanas abiertas durante las 48 horas previas a la medida y durante la realización de la misma, en este caso el valor medio obtenido fue de  $49 \text{ Bq/m}^3$ , lo que supuso un factor de reducción de 33.



LA PROTECCIÓN AL RADÓN EN EL CÓDIGO TÉCNICO  
DE LA EDIFICACIÓN



7

Tras la publicación del nuevo *Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes* (RD 783/2001 de 6 de julio) [128], el CSN puso en marcha un plan de actuación [45] para el desarrollo del Título VII de dicho reglamento, que contempla por primera vez la adopción de medidas de protección radiológica frente a la radiación natural.

Dentro del plan de actuación del CSN, se ha considerado también el desarrollo de normas específicas para la protección contra la exposición al radón en el interior de viviendas, como continuación del programa que el CSN viene desarrollando desde el año 1989.

En marzo de 2002, la Subdirección General de Protección Radiológica Ambiental del CSN, se puso en contacto con la Subdirección General de Arquitectura, Vivienda y Urbanismo (DGVUA) del Ministerio de Fomento, para explorar la posibilidad de desarrollar alguna disposición para reducir la exposición de la población española al radón en el interior de edificios.

La DGVUA, asesorada por el Instituto de Ciencias de la Construcción, Eduardo Torroja (IETcc), perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) estaba elaborando el nuevo Código Técnico de Edificación (CTE) y se consideró la posibilidad de incluir en los requisitos relativos a la habitabilidad de las edificaciones un apartado relativo al radón, análogo a los ya existentes en los códigos de edificación de otros países [129] [130] [131].

El CTE es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad establecidos en la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE) [132], que en su disposición final segunda autoriza al Gobierno la aprobación de un CTE, que establezca las exigencias que deben cumplir los edificios en cuanto a los requisitos indicados.

Se creó un grupo de trabajo formado por personal del Consejo de Seguridad Nuclear y el Instituto Eduardo Torroja, con el objeto de desarrollar de manera conjunta una normativa específica para la protección al radón en el interior de edificios e incorpo-

rarla al CTE. Dentro del grupo de trabajo se desarrollaron los siguientes aspectos [133] [134]:

- Contenido del apartado genérico de protección al radón en el CTE.
- Un valor de concentración de radón nivel de diseño para las nuevas construcciones.
- Una clasificación del territorio nacional en cuanto a la potencialidad de exposición al radón en el interior de las edificaciones.
- Un protocolo de medida de la concentración de radón en el interior del terreno.
- Un protocolo para la medida de radón en edificaciones recién construidas.
- Una guía con una serie de técnicas constructivas a incorporar en los edificios que se fueran a construir en aquellas zonas de mayor potencialidad de exposición al radón.

Dado que en la legislación española, no existe ningún requerimiento en cuanto a la protección al radón en edificios, se consideró a la hora de proponer la inclusión en el CTE, de un nivel objetivo de diseño, la recomendación 90-143 Euratom de la Comisión Europea, relativa a la protección del público contra la exposición al radón en interiores [15] y la información de otros países [135] [136].

En la tabla 54, se presentan los valores límite objetivo de diseño existentes en la legislación de distintos países europeos, de acuerdo con lo indicado en la publicación del SSI, Instituto Sueco de Protección Radiológica [135], con la excepción del valor de Francia, que se obtuvo de la Circular nº 99-46 de 27 de enero de 1999 de la Dirección General de la Salud [136].

Una vez analizada la documentación indicada, se propuso el siguiente texto para incluir en el CTE *El diseño y la construcción del edificio, se llevarán cabo de manera que se asegure que los ocupantes no estén expuestos a unas concentraciones de radón que pudieran implicar un riesgo para la salud.*

Tabla 54. Niveles de radón límite objetivo de diseño para nuevas viviendas en países europeos. Bq/m<sup>3</sup>

| Países pertenecientes a la Unión Europea |       | Países no pertenecientes a la Unión Europea |       |
|------------------------------------------|-------|---------------------------------------------|-------|
| País                                     | Valor | País                                        | Valor |
| Alemania                                 | 250   | Albania                                     | —     |
| Austria                                  | 200   | Bielorrusia                                 | 200   |
| Bélgica                                  | —     | Croacia                                     | —     |
| Dinamarca                                | 200   | República Checa                             | 250   |
| España                                   | —     | República Eslovaca                          | 250   |
| Finlandia                                | 200   | Eslovenia                                   | 200   |
| Francia                                  | 200   | Estonia                                     | 200   |
| Grecia                                   | 200   | Hungría                                     | —     |
| Holanda                                  | —     | Letonia                                     | 250   |
| Irlanda                                  | 200   | Lituania                                    | 200   |
| Italia                                   | —     | Noruega                                     | 200   |
| Luxemburgo                               | 150   | Polonia                                     | 200   |
| Portugal                                 | —     | Rumanía                                     | —     |
| Reino Unido                              | 200   | Rusia                                       | 200   |
| Suecia                                   | 200   | Suiza                                       | 400   |

Como valor límite de concentración objetivo de diseño, se propuso el recomendado por la Comisión 200 Bq/m<sup>3</sup>. Este valor no debería rebasarse dentro de las dependencias habitadas de los edificios, pero no obstante, al valor indicado, se debería intentar conseguir en el interior unas concentraciones de radón tan bajas como fuera posible.

La clasificación del territorio en cuanto a la potencialidad de la exposición al radón en el interior de las edificaciones, se llevó a cabo a dos niveles, uno general (nacional y provincial) y otro específico del terreno de la zona de edificación.

Para la clasificación general del país, se consideraron las características geológicas, 1.500.000 valores de ni-

veles de radiación gamma obtenidos hasta ese momento en el proyecto Marna [63] y 1.318 datos de concentraciones de <sup>40</sup>K, <sup>226</sup>Ra y <sup>232</sup>Th<sup>4</sup> en suelos representativos de todo el país. A partir de esta información, se estimaron las potenciales tasas de exhalación y las concentraciones medias anuales que podrían existir en el interior de una vivienda tipo, considerando unas condiciones estándar de la vivienda y del terreno subyacente [137] [138].

<sup>4</sup> Los valores de las concentraciones isotópicas fueron facilitadas por D. Antonio Baeza (Universidad de Extremadura), D. José Hernández-Armas (Universidad de La Laguna), D. Luis Quindós (Universidad de Cantabria) D. Carlos Villaseca (Universidad Complutense de Madrid) y D. Andrés Cuesta (Universidad de Oviedo).

Mediante esta clasificación general, se establecieron tres niveles de exposición potencial.

| Nivel | Exposición potencial al $^{222}\text{Rn}$ |
|-------|-------------------------------------------|
| 0     | Baja                                      |
| 1     | Media                                     |
| 2     | Alta                                      |

En la tabla 55, se han recopilado las principales características radiológicas de las tres zonas: valores medios de tasas de exposición a la radiación gamma, concentraciones medias de  $^{226}\text{Ra}$  en el terreno, valores medios de tasas de exhalación de radón y valores previsibles medios anuales de concentraciones de radón en el interior de las viviendas.

Se obtuvieron, un mapa general de la península, figura 15, y 46 mapas provinciales. Como ejemplo de mapa provincial, conteniendo las tres categorías de riesgo se ha incluido el de la provincia de Huesca (figura 16).

Conocida la relación existente entre geología,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{222}\text{Rn}$ , se puede indicar que las zonas de mayor riesgo potencial en el país, se encuentran en aquellas áreas con formaciones graníticas y rocas sedimentarias derivadas y las zonas de menor riesgo, en áreas con rocas básicas y formaciones sedimentarias de origen marino [139], no obstante en estas zonas de menor riesgo a priori, se pueden presentar altos contenidos de  $^{222}\text{Rn}$  en fallas abiertas y fracturas que pueden constituir «autopistas» de salida de radón.

Esta clasificación general, se comparó con los resultados obtenidos en las medidas de radón realizadas

en las viviendas y se comprobó que los porcentajes superiores al 10% de viviendas con valores por encima de  $200 \text{ Bq/m}^3$ , se obtuvieron principalmente en zonas clasificadas como categoría 2 y 1.

El segundo criterio de clasificación será aplicable directamente a las zonas de edificación, es decir al terreno donde se va a realizar la construcción. Este segundo nivel de clasificación, servirá para validar la clasificación general inicial, teniendo por lo tanto mas elementos de juicio a la hora de decidir sobre las medidas de protección a introducir en las nuevas edificaciones. Según la categoría de cada zona, se deberán realizar estudios específicos y edificarse o no de acuerdo a unos criterios de protección.

En la figura 17, se expone un diagrama, donde se presentan las actuaciones a seguir en las distintas categorías, de acuerdo con la clasificación general.

Para la clasificación específica de las correspondientes zonas de edificación, se han considerado fundamentalmente dos factores, la concentración de radón existente en el terreno subyacente y la permeabilidad de dicho terreno, que facilitará en mayor o menor medida el transporte del gas radón y su exhalación y por lo tanto su potencial entrada y acumulación en el futuro edificio, en caso de que dicha entrada no se impida mediante las correspondientes técnicas constructivas.

Los niveles de referencia para la clasificación de las correspondientes zonas de construcción, se exponen en la tabla 56 [140] [141].

Tabla 55. Características radiológicas de las distintas zonas de riesgo

| Nivel | Exposición potencial | Tasa exposición ( $\mu\text{R/h}$ ) | Conc. de $^{226}\text{Ra}$ ( $\text{Bq/kg}$ ) | Tasa exhalación $\text{Bq/m}^2.\text{s}$ | Conc. media $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq/m}^3$ ) |
|-------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 0     | Baja                 | < 7,5                               | < 37,5                                        | < 0,053                                  | < 150                                             |
| 1     | Media                | 7,5-10                              | 37,5-50                                       | 0,053-0,070                              | 150-200                                           |
| 2     | Alta                 | > 10                                | > 50                                          | > 0,070                                  | > 200                                             |

Figura 15. Categorías de exposición potencial al radón. Península

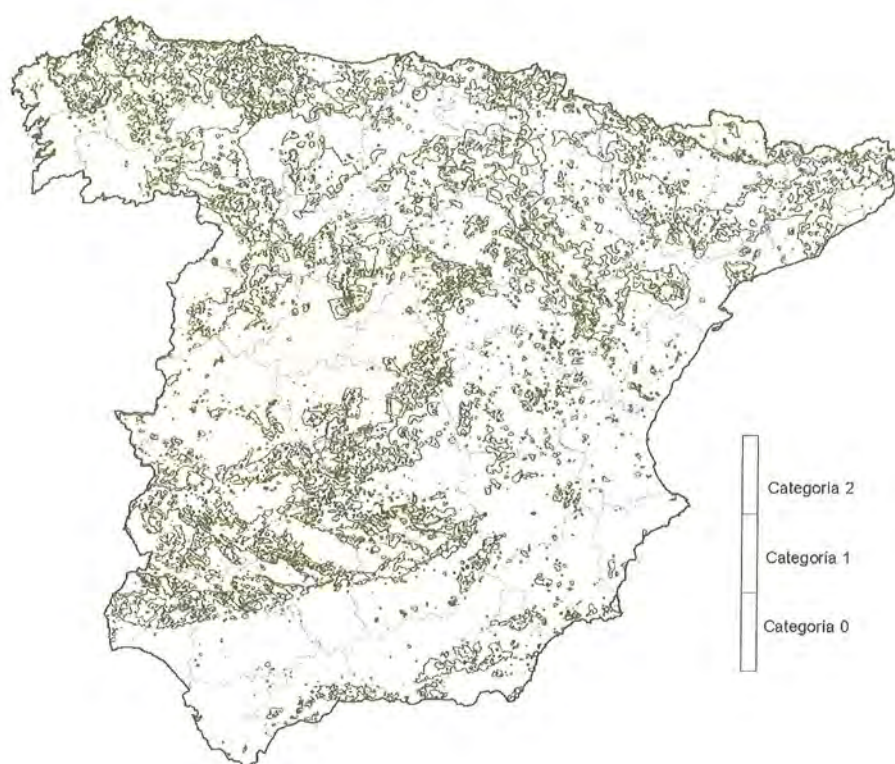


Figura 16. Categorías de exposición potencial al radón. Provincia de Huesca

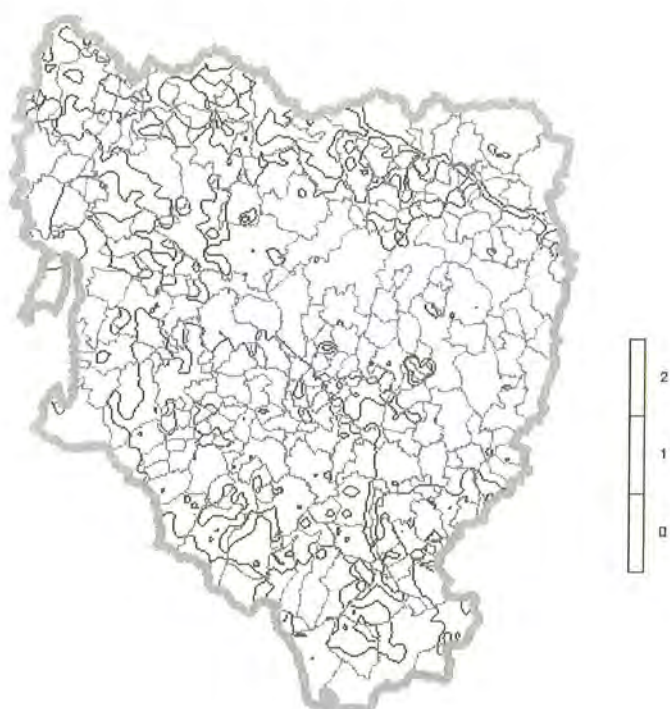
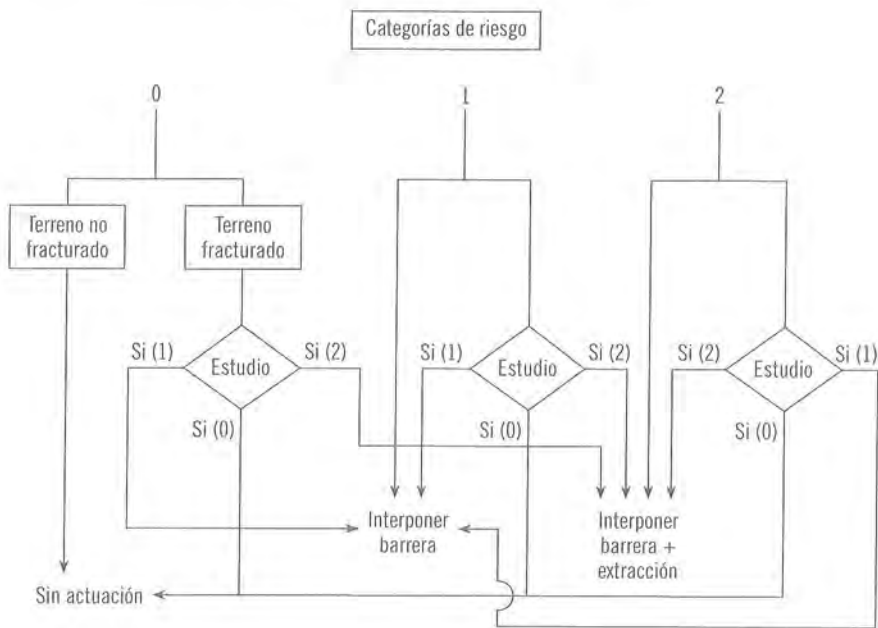


Tabla 56. Clasificación del terreno de construcción

| Exposición potencial al radón | Concentración de <sup>222</sup> Rn en el terreno            |                                                                                    |                                                              | Tipo edificación                                                   |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
|                               | Permeabilidad Baja<br>< 4 × 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> | Permeabilidad Media<br>4 × 10 <sup>-3</sup> – 4 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> | Permeabilidad Alta<br>> 4 × 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> |                                                                    |
| Baja                          | < 30.000                                                    | <20.000                                                                            | <10.000                                                      | Normal                                                             |
| Media                         | 30.000-100.000                                              | 20.000-70.000                                                                      | 10.000-30.000                                                | Con barreras de prevención de entrada de radón                     |
| Alta                          | > 100.000                                                   | >70.000                                                                            | >30.000                                                      | Con barreras de prevención y preinstalación sistema de extracción. |

Figura 17. Diagrama de actuación de acuerdo con las distintas categorías genéricas de riesgo



Protocolos de medida

Para la realización de las medidas de radón, en el interior del terreno subyacente, se desarrolló un protocolo de medida [142], en el que se describen aspectos tales como los métodos de medida, la forma de llevar a cabo las medidas, la expresión de resultados y el programa de garantía de calidad. Asimismo y siguiendo el mismo esquema, se desarrolló otro protocolo [143], con objeto de verificar los niveles de radón existentes en el interior de las edificaciones re-

cién construidas y comprobar que los valores obtenidos se encuentran dentro de concentraciones consideradas aceptables.

Técnicas de edificación

En la figura 18, se muestran las posibles vías de entrada del radón en el interior de las viviendas, siendo estas las que hay que anular mediante las correspondientes técnicas de edificación. La solución constructiva elegida vendrá dada por la categoría de

la zona donde se va a realizar la construcción y por el tipo previsto de edificación [144].

A tales efectos se han elegido dos tipos de edificaciones, edificios construidos únicamente sobre rasante, no presenta ningún espacio bajo la cota del terreno y edificio construido con parte bajo rasante, algún espacio habitable del edificio se encuentra bajo la cota del terreno.

La tabla 57 recoge las distintas actuaciones que se deberán llevar a cabo en función de la categoría de riesgo detectada y de los elementos constructivos presentes en el diseño de la edificación. Como puede verse en la tabla, se han desarrollado una serie de soluciones, donde se presentan, en un grupo de fichas, una ilustración de la solución constructiva, su aplicación y una serie de observaciones, con objeto de tener en cuenta aspectos tales como el paso de conductos, el aumento de cargas en puntos específicos de la construcción, las juntas de dilatación, la utilización de hormigones especiales para evitar fisuras, etc.

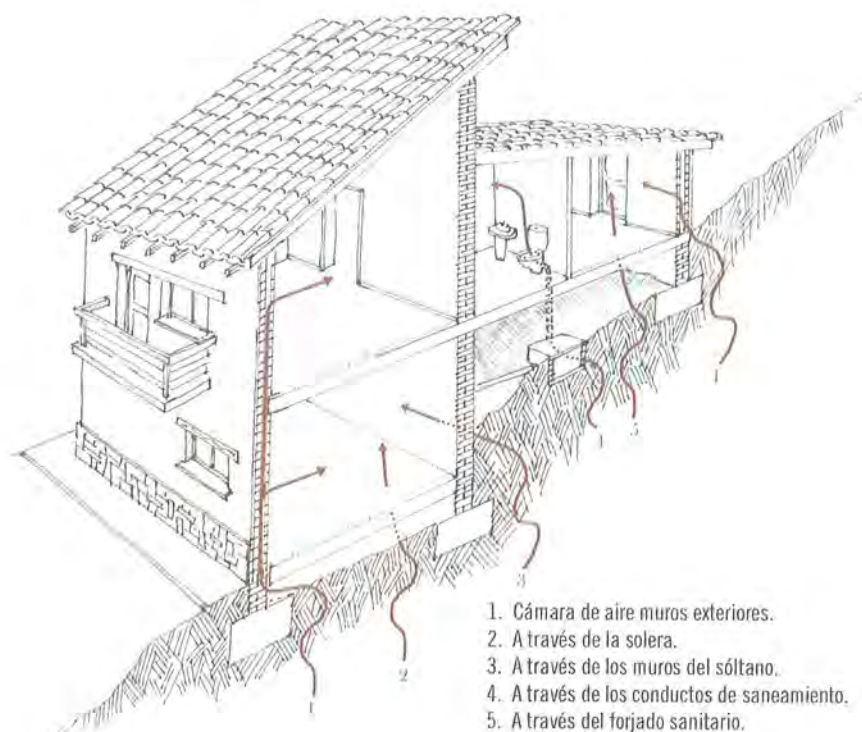
En las figuras 19 y 20, se exponen dos ejemplos de las soluciones desarrolladas, la incorporación de una

barrera contra el radón bajo la solera del edificio y la incorporación de una barrera de prevención sobre solera y un sistema de extracción que puede utilizarse de forma natural o forzada.

Las barreras para prevenir la entrada de radón en el interior de las edificaciones, son efectivas siempre que la instalación se realice de forma adecuada, están hechas de materiales que cumplen los requisitos de resistencia al paso del aire y la humedad. Generalmente se utilizan láminas de polietileno simples o reforzadas, solas o en combinación con otros materiales tales como bitumen y láminas de aluminio.

Los sistemas de extracción son generalmente muy efectivos a la hora de reducir los niveles de radón. Existen dos tipos de sistemas, los denominados activos que utilizan un aparato extractor y los denominados pasivos, en los que el movimiento del aire entre la parte inferior y superior del sistema se realiza por efecto del viento y el denominado «efecto chimenea» generado por la diferencia de temperatura del aire interior y exterior.

Figura 18. Vías de entrada de radón en las viviendas



1. Cámara de aire muros exteriores.
2. A través de la solera.
3. A través de los muros del sótano.
4. A través de los conductos de saneamiento.
5. A través del forjado sanitario.

Tabla 57. Sistemas de protección al radón en función de la categoría de riesgo y el tipo de edificación

| Tipo de edificio                                       | Elemento constructivo | Categoría de riesgo |                                                                                                                        |                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        |                       | 0                   | 1                                                                                                                      | 2                                                                                                                                              |
| 1. Edificio construido únicamente <b>sobre rasante</b> | Solera                | Sin actuación       | 1.S.1.1. Barrera <b>bajo</b> solera<br>1.S.1.2. Barrera <b>sobre</b> solera <sup>1</sup>                               | 1.S.2.1. Barrera <b>bajo</b> solera más extracción<br>1.S.2.2. Barrera <b>sobre</b> solera más extracción                                      |
|                                                        | Forjado sanitario     | Sin actuación       | 1.F.1.1. Barrera <b>bajo</b> forjado sanitario<br>1.F.1.2. Barrera <b>sobre</b> forjado sanitario                      | 1.F.2.1. Barrera <b>sobre</b> forjado más extracción<br>1.F.2.2. Barrera <b>sobre</b> forjado más ventilación.                                 |
| 2. Edificio construido con parte <b>bajo rasante</b>   | Solera                | Sin actuación       | 2.S.1.1. Barrera <b>bajo</b> solera = 1.S.1.1<br>2.S.1.2. Barrera <b>sobre</b> solera = 1.S.1.2                        | 2.S.2.1. Barrera <b>bajo</b> solera más extracción = 1.S.2.1.<br>2.S.2.2. Barrera <b>sobre</b> solera más extracción = 1.S.2.2.                |
|                                                        | Forjado sanitario     | Sin actuación       | 2.F.1.1. Barrera <b>bajo</b> forjado sanitario = 1.F.1.1<br>2.F.1.2. Barrera <b>sobre</b> forjado sanitario = 1.F.1.2. | 2.F.2.1. Barrera <b>sobre</b> forjado más extracción = 1.F.2.1<br>2.F.2.2. Barrera <b>sobre</b> forjado sanitario mas ventilación periscópica. |
|                                                        | Muro de sótano        | Sin actuación       | 2.M.1.1. Barrera en cara exterior de muro de sótano                                                                    | 2.M.2.1. Barrera en cara exterior de muro de sótano = 2.M.1.1                                                                                  |

Figura 19. Barrera bajo solera (1.S.1.1)

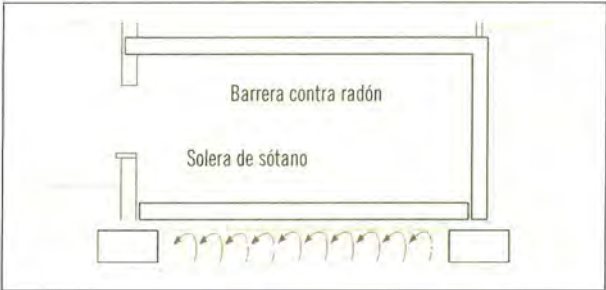


Figura 20. Barrera sobre solera más extracción (2.S.2.2)



## Referencias bibliográficas

1. *Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes*. CSN Colección. Otros Documentos 6.1998.
2. Hernando Martínez, M. L.; López Ortiz, G.; Martín Matarranz, J. L.; *Informe de la 1.ª reunión (13.11.88) convocada por el CSN sobre el radón en España* CSN/ARG/88/19.
3. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria para la *Determinación de niveles de radón en España*. 26 de diciembre de 1990.
4. Quindós, L. S.; *Niveles de radón en España. Proyecto radón*. Junio 1990.
5. Quindós, L. S.; Soto, J.; Fernández, P. L.; *Medidas de la concentración de radón en el interior de viviendas españolas*. Revista Española de Física (1), 1991.
6. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J.; *National survey on indoor radon in Spain*. Environment International vol 17, pp 449-453. 1991.
7. Quindós, L. S.; *Niveles de radón en España, primeros resultados. Proyecto Radón*. Abril 1989.
8. *Third C.E.C. intercomparison of active and passive detectors for measurement of radon and radon decay products*. Commission of European Communities. Luxembourg (1988).
9. *Estudio de las fuentes de radiación en España. Estimación de dosis a la población*. Memoria presentada por Carmen Ródenas Palomino, para optar al grado de Doctora en Físicas. Universidad de Cantabria.
10. Quindós, L. S.; Soto, J.; Fernández, P. L.; *Geología y niveles de radón en viviendas españolas*. Revista Española de Física 6, pp 35-37, 1992.
11. Quindós, L. S.; *Niveles de radón en España 1988-1990. Valores individualizados por comunidades autónomas*. Comunicación personal. Junio 1993.
12. *Niveles de radón en la Sierra de Guadarrama*. Universidad de Cantabria. Junio 1990.
13. *Niveles de radón en España. Valores individualizados por Comunidades Autónomas*. Cátedra de Física Médica. Facultad de Medicina. Universidad de Cantabria. Abril 1995.
14. *A citizen's guide to radon*. EPA-0004 U.S. Environmental Protection Agency. 1986.
15. Commission Recommendation of 21 February 1990 on *The protection of the public against indoor exposure to radon*. (90/143/EURATOM).
16. Quindós, L. S.; Soto, J.; Fernández, P. L.; *Informe resumen final al CSN con relación al acuerdo específico establecido con la Universidad de Cantabria para la determinación de los niveles de radón en España*. Noviembre 1991.
17. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Soto, J.; *Short- VS Long-term indoor radon measurements*. Health Physics Vol 61 nº 4 (October) pp 539-542. 1991.
18. Quindós, L. S.; Soto, J.; *Informe resumen final al Consejo de Seguridad Nuclear con relación al acuerdo específico establecido con la Universidad de Cantabria para el estudio de la radiactividad de origen natural en España*. Universidad de Cantabria. Diciembre de 1993.
19. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Natural radioactivity in Spanish soils*. Health Physics. Vol 66, February 1994.

20. Fernández, P. L.; Quindós, L. S.; *A new method for measuring radon exhalation*. Journal of Geophysical Research. Vol 88 pp 1519-1524. February 1993.
21. Quindós, L. S.; Newton, G. J.; *Natural radioactivity of some Spanish building materials*. The Science of the Total Environment, 68, 181-185, 1988
22. *Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials*. Report by a group of experts of the OCDE. Paris 1979.
23. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Natural radioactivity of cements and granites in Spain*. Eurosymposium on radon. Lieja. Noviembre. 1993.
24. Quindós, L. S.; Soto, J.; Fernández, P. L.; Ródenas, C.; Gomez, J.; *Informe resumen final al Consejo de Seguridad Nuclear en relación al acuerdo específico establecido con la Universidad de Cantabria para el estudio de materiales de construcción como fuentes de radón y técnicas de mitigación*. Diciembre 1995.
25. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria para el *Estudio de la radiactividad de origen natural en España*. 2 de junio de 1992.
26. Convenio de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria, para el *Estudio de los materiales de construcción como fuente de radón y técnicas de mitigación*. 17 de octubre de 1994.
27. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Results of a intercomparison of gamma spectrometry measurements of radioactivity in soils and buildings materials*. Universidad de Cantabria. 1991.
28. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Results of the second intercomparison of gamma spectrometry measurements of radioactivity in soils and buildings materials*. Universidad de Cantabria 1995.
29. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria para el *Estudio radiológico de las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama y el estudio de materiales de construcción como fuentes de radón y técnicas de mitigación*. 5 de noviembre de 1996.
30. Quindós, L. S.; *Informe resumen final al Consejo de Seguridad Nuclear con relación al Acuerdo Específico establecido con la Universidad de Cantabria referido al proyecto radón. Estudio radiológico de las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama. Estudio de materiales de construcción como fuentes de radón*. Noviembre 1998.
31. *Naturally occurring radiation in the Nordic Countries-Recommendations*. The Radiation Protection Institutes in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. 1986.
32. *Naturally occurring radiation in the Nordic Countries-Recommendations*. The Radiation Protection Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. 2000
33. Martín Matarranz, J. L.; *Informe final del proyecto, estudio radiológico de las zonas de los Arribes del Duero y la Sierra de Guadarrama y estudio de materiales de construcción como fuentes de radón y técnicas de mitigación*. CSN/PIN/ANID/9902/98. 1998.
34. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Estimate of external gamma exposure outdoors in Spain*. Radiation Protection Dosimetry. Vol 45 Nº 2. 1992.
35. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; *Exposure to natural sources of radiation in Spain*. Nuclear Tracks Radiation Measurements Vol 21, Nº 2 1993.
36. Soto, J.; *Radioactividad en aguas mineromedicinales*. Boletín Sociedad Española de Hidrología Médica. Vol V nº 3 (1990).

37. Soto, J.; Delgado, M. T.; *Niveles de  $^{222}\text{Rn}$  en el Balneario de Caldas de Besaya (Cantabria)*, Revista de Sanidad e Higiene Pública. Vol 65 (1), pp 61-64 (1991).
38. Suárez, J. A.; Pablo de, M. A.; González, J. A.; *Análisis radioquímico de radio total,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{224}\text{Ra}$* , CIEMAT 603, SIN 0081-3397, Madrid 1987.
39. Soto, J.; Fernández, P. L.; *Medida de la concentración de  $^{226}\text{Ra}$  en aguas embotelladas españolas*. Facultad de Medicina. Universidad de Cantabria.
40. Soto, J.; Fernández, P. L., *Radioactivity in Spanish spas*. The Science of the Total Environment 162, pp 187-192. 1995.
41. ICRP Publication 65. *Protection against  $^{222}\text{Rn}$  at home and at work*. September 1993.
42. Soto, J.; Gómez, J.; *Occupational doses from radon in Spanish spas*. Health Physics Vol 76 nº 4. April 1999.
43. Dueñas, C.; Fernández, M. C.; Enriquez, C.; Carretero, J.; Liger, E.; *Natural radioactivity levels in Andalusian spas*. Comunicación personal. Artículo aceptado para su publicación en la revista Water Research.
44. Baeza, A.; *Gamma and alpha spectrometry for natural radioactive nuclides in the spa waters of Extremadura (Spain)*. Journal of the Environmental Radioactivity Vol 28 nº 2 1995.
45. Martín Matarranz, J. L.; *Propuesta de plan de actuación relativa al título VII del nuevo reglamento de protección sanitaria*. Revisión Junio 2002. CSN/TGE/AEIR/0107/1453. 2001.
46. Soto, J.; Fernández, P. L.; *Radón en el agua en una región de alto nivel de radiación natural*. Boletín Sociedad Española de Hidrología Médica Vol VII nº 2 (1992).
47. Guía de Seguridad nº 7.7 (Rev 1). *Control radiológico del agua de bebida*. Consejo de Seguridad Nuclear. Enero 1994.
48. Soto, J.; Díaz Caneja, N.; *Potabilidad del agua en una región de alto nivel de radiación natural*. Revista de Sanidad e Higiene Pública nº 34. Mayo-Agosto 1992.
49. Hess, C. T.; Michel, J.; *The occurrence of radioactivity in public water supplies in United States*. Health Physics, 1985.
50. Salonen, L.; *Natural radionuclides in ground water in Finland*. Radiation Protection Dosimetry. 1988.
51. Martín Matarranz, J. L.; *Identificación de poblaciones afectadas por el radón en España*. CSN/TGE/VIRAM/9401/386. 1994.
52. Martín Matarranz, J. L.; *Identificación de poblaciones afectadas por el radón en España, Revisión 1*, CSN/TGE/VIRAM/9505/485. 1995.
53. Quindós, L. S.; Comunicación personal. Febrero 1999.
54. Soto, J.; Quindós L. S.;  *$^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$  in natural waters in two typical locations in Spain*. Radiation Protection Dosimetry. Vol 24 nº 2 1988.
55. *Resultados de los Censos de Población y viviendas 2001. Población por municipios*. Instituto Nacional de Estadística. 10 de abril de 2003.
56. Martín Matarranz, J. L.; *Propuesta de contestación al cuestionario remitido por el UNSCEAR relativo a la exposición a la radiación natural*. CSN/TGE/ANID/9704/675. 1997.
57. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria para la realización de un estudio titulado. *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas*. 6 de octubre de 1997.

58. Quindós, L. S.; Fernández, P. L.; Gómez Arozamena, J.; Ródenas, C.; *Proyecto Radón. Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas*. Informe final del proyecto. Octubre 1998.
59. Martín Matarranz, J. L.; Informe final del proyecto *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas*. CSN/PIN/ANID/9901/96. 1999.
60. Baeza, A.; Del Río, M.; Miró, C.; Paniagua, J. M.; *Natural radioactivity in soils of the province of Cáceres (Spain)*. Radiation Protection Dosimetry vol 45 nº 261-263. 1992.
61. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad (CSN), Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA) y Universidad de Cantabria, para la *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas. Estudio específico del Campo Arañuelo (Cáceres)*. 6 de abril de 2000.
62. Quindós, L. S.; Informe final. *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas. Estudio específico de Campo Arañuelo (Cáceres)*. Proyecto PR-12. Plan Coordinado de Investigación. CSN-UNESA en materia de Seguridad Nuclear y Protección radiológica. 14 de Junio de 2001.
63. Suárez Mahou, E.; Fernández Amigot, J. A.; *Proyecto MARNA mapa de radiación gamma natural*. Colección Informes Técnicos 5. CSN 2000.
64. Martín Matarranz, J. L.; Informe final del proyecto de investigación *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas. Estudio específico de Campo Arañuelo (Cáceres)*. CSN/PIN/AEIR/0107/187. 2001.
65. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Cantabria para la realización de un estudio titulado *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las instalaciones del ciclo del combustible*. 13 de Diciembre de 1999.
66. Quindós, L. S.; *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las instalaciones del ciclo del combustible. Proyecto Radón*. Universidad de Cantabria. Diciembre 2000.
67. Martín Matarranz, J. L.; *Informe final del proyecto de investigación evaluación de la dosis de radiación natural recibida por la población en el entorno de las instalaciones del ciclo de combustible*. CSN/PIN/AEIR/0104/183. 2001.
68. *Guidelines for drinking-water quality. Vol 1 Recommendations*. World Health Organization. Geneva 1993.
69. *Natural sources of ionizing radiation in Europe*. EUR 14470. Commission of European Communities. Luxembourg 1993.
70. *NRC: Committee on risk assessment of exposure to radon in drinking water*. National Research Council. Academy Press. Washington D.C. 1999.
71. *Propuesta de campaña de medida de nivel de radón en edificios de la Comunidad Valenciana*. Instituto de Física Corpuscular. Universidad de Valencia.
72. Amorós, R.; Bolta, J. M.; Senent, F.; *Niveles de gas radón en la Comunidad Valenciana. Primeros resultados*. Instituto de Física Corpuscular. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Universidad de Valencia.
73. *EERF standard operating procedures for Rn-222 measurements using charcoal canisters*. EPA 520/5-87-005. Montgomery. 1987.

74. Acuerdo específico entre el CSN y la Universidad de Valencia sobre *una campaña de medida de radón en edificios de la Comunidad Valenciana*. 1 de diciembre de 1989.
75. Amorós, R.; Bolta, J. M.; *Niveles de gas radón en la Comunidad Valenciana. Resultados de la Provincia de Valencia*. Campaña 1990/91.
76. Amorós, R.; Bolta, J. M.; Navarro, E.; Roldán, C.; *Radon levels in the Valencia Community (Spain). Results in the Province of Valencia*. Journal of Environmental Radioactivity vol 27 nº 2 1995.
77. Acuerdo específico entre el CSN y la Universidad de Valencia sobre *una campaña de medida de radón en edificios de la Comunidad Valenciana: II Fase Provincia de Castellón*. 18 de junio de 1992.
78. Amorós, R.; Bolta, J. M.; *Niveles de gas radón en la Comunidad Valenciana. Resultados de la Provincia de Castellón*. Campaña 1992-93.
79. Convenio de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de Valencia para *una campaña de medida de radón en edificios de la Comunidad Valenciana: III Fase Provincia de Alicante*. 17 de octubre de 1994.
80. Navarro, E.; *Niveles de gas radón en el interior de edificios de las comarcas de la Provincia de Alicante*. Comunicación personal.
81. Acuerdo para la colaboración entre el CSN y el Ciemat en el proyecto de investigación de *Medida de radón en interiores de viviendas de Madrid y Barcelona*. 11 de octubre de 1990.
82. Acuerdo de colaboración entre el CSN y la Universidad Autónoma de Barcelona para la *Estimación del impacto radiológico producido por el gas radón*. 7 de octubre de 1993.
83. Informe de progreso a 30 de junio de 1991 del proyecto. *Medida de radón en viviendas de Madrid y Barcelona*. CIEMAT. 1991.
84. Gutiérrez, J.; Baixeras, C.; *Indoor radon levels and dose estimation in two major spanish cities*. Trabajo presentado en el Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment. Salzburg Austria 22-28 Sept. 1991. Radiation Protection Dosimetry. Vol 45, pp 495-498 (1992).
85. *Medida de niveles de radón en el interior de viviendas de Madrid y Barcelona*. Acuerdo CSN-CIEMAT. Informe final de resultados. CIEMAT/IMA/UGIA/M5A09/01/93.
86. UNSCEAR 1993 Report. *Sources, effects and risks of ionizing radiation* United Nations, New York (1993).
87. Solicitud de subvención para el proyecto científico. *Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios*. al Consejo de Seguridad Nuclear que presenta el Grupo de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra. Noviembre 1992.
88. Informe que presenta el Grupo de Física de las Radiaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona al Consejo de Seguridad Nuclear, sobre el proyecto científico *Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios*. Bellaterra. Enero 1994.
89. Informe II que presenta el Grupo de Física de las Radiaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona al Consejo de Seguridad Nuclear, sobre el proyecto científico *Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios*. Bellaterra. Octubre 1994.
90. Baixeras, C.; Font, L.; *A comparative study of different methods for measuring radon concentrations*. 2<sup>nd</sup> International Colloquium on Gaz Geochemistry, Besançon, Francia 5-9 Julio 1993.
91. Cross, W.; Tommasino, L. A.; *A rapid reading technique for nuclear particle damage tracks in the foils*. Radiation. Effects. 5, 85-89 (1970).

92. Whysall, K.; Milles, J.; *Results of the 1991 CEC intercomparison of passive radon detectors*. NRPB Report 1993.
93. Informe final que presenta el Grupo de Física de las Radiaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona al Consejo de Seguridad Nuclear sobre el proyecto científico *Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios* Bellaterra, septiembre 1995.
94. Informe III que presenta el Grupo de Física de las Radiaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona al Consejo de Seguridad Nuclear sobre el proyecto científico. *Estudio del impacto radiológico ambiental producido por el gas radón en el interior de edificios*. Bellaterra, septiembre 1995.
95. Baixeras, C.; Font, Ll.; Fernández, F.; Domingo, C.; *Estudio del impacto radiológico ambiental del gas radón*. XXV Reunión Bienal de la Sociedad Española de Física. Santiago de Compostela, 18-23 de septiembre de 1995.
96. Baixeras, C.; Morán, A.; *Determinación de la concentración de radón en el interior de viviendas de Calaf (Barcelona)*. Radioprotección. Revista de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Número Extraordinario 1996.
97. Morán, A.; Castelltort, J.; Juvé, M.; *La investigación científica como instrumento pedagógico. Estudio del impacto radiológico ambiental del gas radón en el entorno del IES de Calaf (Barcelona)*. Resúmenes del 5º Encuentro Ibérico para la enseñanza de la Física 67-68. Santiago de Compostela 1995.
98. Baixeras, C.; Font, Ll.; Fernández, F.; Domingo, C.; *Indoor radon levels in a public school and some dwellings from the village of Teià, Catalonia (Spain)*. International Congress on Radiation Protection. April 14-19. Viena 1996.
99. Albarracín, D.; *Integración de las ecuaciones de transporte del gas radón a través de fisuras en los cimientos de viviendas* Trabajo de investigación de 3º ciclo. Programa de doctorado de Física. UAB. Bellaterra, agosto de 1995.
100. Acuerdo específico entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de la Laguna para la *Determinación de los niveles de radón en las Islas Canarias*, 26 de diciembre de 1990.
101. Acuerdo de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y la Universidad de La Laguna para la *Determinación de los niveles de radón en el interior de viviendas y cuevas naturales de Canarias*. 2 de junio de 1993.
102. Robayna, B.; Hernández-Armas, J.; Soler, V.; *Preliminary measurements of indoor radon in Canary Islands*. Comunicación personal.
103. Hernández-Armas, J.; *Memoria resumen de actividades realizadas por el grupo de trabajo constituido para la determinación de la concentración de radón en Canarias tras la firma del convenio específico entre el CSN y la Universidad de La Laguna*. 17 de septiembre de 1991.
104. Fernández-Aldecoa, J. C.; Robayna, B.; Allende, A.; *Natural radiation in Tenerife (Canary Islands)*. Radiation Protection Dosimetry, Vol 45, pp. 545-548 (1992).
105. Hernández-Armas, J.; Comunicación personal. 21 de febrero de 1995.
106. Hernández-Armas, J.; *Propuesta para la realización de medida de radón en viviendas de Canarias* 17 de enero 1995.
107. Hernández-Armas, J.; *Trabajos realizados para la determinación de niveles de radón en viviendas de las Islas Canarias y en grutas y cuevas del archipiélago. Estimación de dosis a la población*. 23 de junio de 1994.
108. Pinza Molina, C.; Hernández-Armas, J.; *Radón en viviendas de Gran Canaria*. Radioprotección. Revista de la Sociedad de Protección Radiológica. Número Extraordinario 1996.

109. Pinza Molina, C.; Domínguez Bello, M. J.; Hernández-Armas J.; *Radón en las viviendas de la isla de Lanzarote*. X Congreso Nacional de Física Médica. Salamanca 1995.
110. Green, B. M.; Lomas, P. R.; Bradley, E. J.; and Wrixon, A. D.; *Gamma radiation levels outdoors in Great Britain*. NRPB-R191. National radiological Protection Board. 1989.
111. UNSCEAR 1982. *Ionizing radiations: Sources and biological effects*. United Nations. New York. 1982.
112. UNSCEAR 1988. *Sources, effects and risks of ionizing radiation*. United Nations, New York. 1988.
113. Acuerdo específico entre la Universidad Politécnica de Cataluña y el Consejo de Seguridad Nuclear, para participar en el proyecto de investigación y desarrollo sobre *Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la Norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida* 11 de diciembre de 2000.
114. *Passive radon monitoring devices. Methods for classification and evaluation ISO/DIS 134666*. International Organization for Standardization. 1999.
115. *Proyecto de adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida*. Instituto de Técnicas Energéticas. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. Abril 2000.
116. Martín Matarranz, J. L.; *Valoración del proyecto de investigación Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida*. CSN. Informe interno 24 de mayo de 2000.
117. Vargas, A.; Ortega, X.; Martín Matarranz, J. L.; *Programa de intercomparación de sistemas pasivos de medida de la concentración de radón*. Documento UPC-CSN. Febrero 2002.
118. Ortega Aramburu, X.; Vargas Drechsler, A.; *Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO-13466 e intercomparación de sistema de medida de centros españoles*. Universidad Politécnica de Cataluña. Diciembre de 2002.
119. Martín Matarranz, J. L.; *Informe final del proyecto de investigación, Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida*. CSN/PIN/AEIR/0203/194. 2002
120. Ortega Aramburu, X.; Vargas Drechsler, A.; Martín Matarranz, J. L.; *Resultados de la intercomparación de sistemas pasivos de medida de la concentración de radón*. Documento UPC-CSN. Agosto 2002.
121. Vargas Drechsler, A.; Ortega Aramburu, X.; *Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida*. Jornada sobre resultados del Plan de Investigación del CSN. Madrid. 12 de diciembre de 2002.
122. Pérez Iglesias, J. M.; Álvarez Álvarez, M. C.; Dopico Vivero, M. T.; Garzón Ruipérez, L.; *Indoor <sup>222</sup>Rn concentrations in Central Asturias*. Health Physics. 70 (5):689-694 1996.
123. Garzón, L.; Juanco, J. M.; Pérez, J. M.; Fernández, J. M.; Arganza, B.; *The universal Rn wave*. Health Physics 51: 185-195; 1986.
124. International Commission on Radiological Protection. *Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters*. Oxford, Pergamon, ICRP. Publication 50; 1982.
125. Baeza, A.; Navarro, E.; Roldán, C.; Ferrero, J. L.; Juanes, D.; Corbacho, J. A.; Guillén, F. J.; *Indoor radon levels in buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain)*. Radiation Protection Dosimetry. Vol 103 Nº 3 pp 263-268 (2003).
126. International Commission on Radiological Protection. *Human respiratory tract model for radiological protection*. ICRP Publication 66. 1994.

127. Baeza, A.; Del Río, M.; Miró, C.; Paniagua, J.: *Natural radionuclide distribution in soils of Cáceres (Spain): Dosimetry implications*. Journal of Environmental Radioactivity. 23, 19-37 (1994).
128. Real Decreto 783/2001 de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (BOE de 26 de julio de 2001).
129. *The Building Regulations 2000*. Statutory Instrument nº 2531. Department of the Environment and the Welsh Office. London HMSO. 2000.
130. *Technical regulations under the planning and building act 1997. Regulations concerning requirements for construction works and products for construction works*. National Office of Building Technology and Administration HO-1/98. Norway
131. *Building Regulations BBR. Mandatory provisions and general recommendations*. Swedish Board of Housing Building and Planning. 2001.
132. Ley 38/1999 de 5 de noviembre de Ordenación de la Edificación. BOE de 6 de noviembre de 1999.
133. Frutos, B.; García, J. P.; Martín, J. L.; Olaya, M.; Serrano, J. I.; Suárez, E.; Fernández, J. A.; Rodrigo, F.; «*La protección al radón en el Código Técnico de la Edificación (CTE)*» Seguridad Nuclear. Revista del CSN/ Nº 27. II Trimestre 2003.
134. Frutos Vázquez, B.; García Cadierno, J. P.; Martín Matarranz, J. L.; Olaya Adán, M.; Serrano Renedo, J. I.; Suárez Mahou, E.; Fernández, J. A.; «*La protection contre l'exposition au radon dans le code technique espagnol de la construction.*» Contrôle nº 153. La revue de L'Autorité de sûreté nucléaire. DGSNR. Julio 2003.
135. Akerblom, G.; Radon legislation and national guidelines. Swedish Radiation Protection Institute. July 1999.
136. Circulaire nº 99-46 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon. Direction Générale de la Santé et Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France.
137. Cascón, M.; Suárez, E.; Fernández, J. A.; Quindós, L. S.; Villaseca, C.; García, D.; «*Predicción de la concentración de radón. Proyecto MARNA.*» Workshop Radon y Medioambiente 13 y 14 de julio. Aula de Medio Ambiente. Proyecto ERRICCA-2. Suances. Julio 2002.
138. García Cadierno, J. P.; «*Estimación de la concentración de radón en el interior de las viviendas a partir de las medidas de tasas de exposición natural (MARNA).*» CSN-SRA. Informe Interno. Enero 2003.
139. Suárez Mahou, E.; «*La radiación natural en España: Proyecto MARNA.*» Geología de España en imágenes». CSN.1997.
140. Barnett, I.; «*Radon risk mapping and geological aspects.*» Training course on radon risk and remedial actions. Commission of European Community. Swedish Radiation Protection Institute. SSI. Stockholm. September 1995.
141. Martín Neznal.; Radon V.O.S. Comunicación personal. Octubre 2002.
142. Quindós, L.; «*Protocolo para la medida de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el interior del terreno.*» Universidad de Cantabria. Octubre 2002.
143. Martín Matarranz, J. L.; «*Protocolo para la medida de radón en edificaciones recién construidas.*» CSN/TGE/AEIR/1002/1614. Octubre 2002.
144. Frutos, B.; Olaya, M.; «*Métodos para prevenir la entrada de radón en edificios de nueva construcción.*» Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción. Diciembre 2002.

## Índice de tablas

|           |                                                                                                                                                       |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.  | Valores de las concentraciones de radón en las diferentes comunidades autónomas .....                                                                 | 12 |
| Tabla 2.  | Valores de concentración de radón en poblaciones de la Sierra de Madrid .....                                                                         | 13 |
| Tabla 3.  | Porcentaje de casas en cada comunidad autónoma con valores superiores a 400 Bq/m <sup>3</sup> .....                                                   | 14 |
| Tabla 4.  | Relación de las concentraciones de radón con los materiales de construcción .....                                                                     | 14 |
| Tabla 5.  | Comparación de resultados con diferentes métodos de medida .....                                                                                      | 15 |
| Tabla 6.  | Concentraciones de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en suelos .....                                                             | 17 |
| Tabla 7.  | Concentraciones de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en materiales de construcción .....                                         | 18 |
| Tabla 8.  | Contenido de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en muestras de granitos nacionales .....                                          | 19 |
| Tabla 9.  | Contenido de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en muestras de granitos extranjeros .....                                         | 20 |
| Tabla 10. | Concentraciones de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en cementos españoles .....                                                 | 21 |
| Tabla 11. | Contenido de <sup>226</sup> Ra, <sup>232</sup> Th y <sup>40</sup> K en muestras de pizarras nacionales .....                                          | 22 |
| Tabla 12. | Valores de niveles de radiación gamma en las diferentes comunidades autónomas .....                                                                   | 23 |
| Tabla 13. | Concentración de <sup>222</sup> Rn y <sup>226</sup> Ra en aguas de diferentes balnearios .....                                                        | 24 |
| Tabla 14. | Concentraciones de <sup>222</sup> Rn en el interior de viviendas (Arribes del Duero) .....                                                            | 27 |
| Tabla 15. | Concentraciones de <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra y <sup>232</sup> Th en suelos (Arribes del Duero) .....                                         | 29 |
| Tabla 16. | Concentraciones de actividad en aguas de consumo (Arribes del Duero) .....                                                                            | 30 |
| Tabla 17. | Concentraciones de <sup>222</sup> Rn, <sup>226</sup> Ra y de actividad $\alpha$ y $\beta$ total en aguas potables (Arribes del Duero) ..              | 31 |
| Tabla 18. | Concentraciones de <sup>222</sup> Rn en el interior de viviendas (Sierra de Guadarrama) .....                                                         | 33 |
| Tabla 19. | Concentraciones de <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra y <sup>232</sup> Th en suelos (Sierra de Guadarrama) .....                                      | 34 |
| Tabla 20. | Concentraciones de <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra y <sup>232</sup> Th en suelos. Estudio nacional, Arribes del Duero y Sierra de Guadarrama ..... | 35 |
| Tabla 21. | Concentraciones de <sup>226</sup> Ra y <sup>222</sup> Rn en aguas potables. Sierra de Guadarrama (Bq/l) .....                                         | 36 |
| Tabla 22. | Concentraciones de <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra y <sup>232</sup> Th en suelos. Centrales nucleares .....                                        | 37 |
| Tabla 23. | Concentraciones de <sup>40</sup> K, <sup>226</sup> Ra y <sup>232</sup> Th en suelos (provincia de Cáceres) .....                                      | 38 |
| Tabla 24. | Valores medios de los niveles de radiación gamma. Centrales nucleares .....                                                                           | 38 |
| Tabla 25. | Valores de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas. Centrales nucleares .....                                                    | 39 |
| Tabla 26. | Poblaciones del entorno de la central de Almaraz, consideradas en el estudio .....                                                                    | 40 |
| Tabla 27. | Resultados de las medidas de las concentraciones de radón. Zona y poblaciones de La Vera .....                                                        | 41 |
| Tabla 28. | Valores de dosis en el entorno de las diferentes centrales nucleares .....                                                                            | 41 |
| Tabla 29. | Zonas de estudio. Instalaciones del ciclo .....                                                                                                       | 43 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 30. Valores medios de las concentraciones de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ y $^{232}\text{Th}$ en suelos. Instalaciones del ciclo ..... | 43 |
| Tabla 31. Valor medio de niveles de radiación gamma. Instalaciones del ciclo .....                                                                  | 44 |
| Tabla 32. Valores de las concentraciones de radón en el interior de las viviendas. Instalaciones del ciclo .....                                    | 45 |
| Tabla 33. Valores medios de actividad $\alpha$ y $\beta$ total, en agua de bebida. Instalaciones del ciclo .....                                    | 46 |
| Tabla 34. Valores de dosis en el entorno de las distintas instalaciones del ciclo .....                                                             | 47 |
| Tabla 35. Concentraciones de radón en la provincia de Valencia .....                                                                                | 51 |
| Tabla 36. Concentraciones de radón en la provincia de Castellón .....                                                                               | 53 |
| Tabla 37. Concentraciones de radón en la provincia de Alicante .....                                                                                | 54 |
| Tabla 38. Concentraciones de radón en Madrid y Barcelona. Primera campaña .....                                                                     | 56 |
| Tabla 39. Concentraciones de radón en Madrid y Barcelona. Segunda campaña .....                                                                     | 57 |
| Tabla 40. Distribución de las viviendas en función de distintos intervalos de concentración .....                                                   | 57 |
| Tabla 41. Valores de dosis efectivas en Madrid y Barcelona. Inhalación de radón .....                                                               | 58 |
| Tabla 42. Concentración de radón en viviendas de la isla de Tenerife .....                                                                          | 65 |
| Tabla 43. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Fuerteventura. Primera Campaña .....                                                  | 66 |
| Tabla 44. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Fuerteventura. Segunda Campaña .....                                                  | 66 |
| Tabla 45. Concentraciones de radón en viviendas de la isla del Hierro .....                                                                         | 67 |
| Tabla 46. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de La Gomera .....                                                                       | 67 |
| Tabla 47. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de La Palma .....                                                                        | 68 |
| Tabla 48. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Lanzarote .....                                                                       | 70 |
| Tabla 49. Concentraciones de radón en viviendas de la isla de Gran Canaria .....                                                                    | 72 |
| Tabla 50. Concentraciones de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ y $^{232}\text{Th}$ en suelos de la isla de Tenerife .....                         | 74 |
| Tabla 51. Laboratorios participantes en la intercomparación de detectores pasivos de radón .....                                                    | 80 |
| Tabla 52. Condiciones de exposición de los detectores durante la intercomparación .....                                                             | 83 |
| Tabla 53. Concentraciones de radón en viviendas de Asturias .....                                                                                   | 86 |
| Tabla 54. Niveles de radón límite objetivo de diseño para nuevas viviendas en países europeos .....                                                 | 91 |
| Tabla 55. Características radiológicas de las distintas zonas de riesgo .....                                                                       | 92 |
| Tabla 56. Clasificación del terreno de construcción .....                                                                                           | 94 |
| Tabla 57. Sistemas de protección al radón en función de la categoría de riesgo y del tipo de edificación .....                                      | 96 |

|          |                                                                                                                                                                                 |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.  | Concentraciones medidas de radón en viviendas .....                                                                                                                             | 34 |
| Fig. 2.  | Valores medios de niveles de radiación gamma .....                                                                                                                              | 35 |
| Fig. 3.  | Valores medios de concentraciones de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ y $^{232}\text{Th}$ en suelos de las zonas de los Arribes del Duero y de la Sierra de Guadarrama ..... | 36 |
| Fig. 4.  | Valores medios de concentraciones de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ y $^{232}\text{Th}$ en suelos (Central nuclear de Almaraz y provincia de Cáceres) .....                | 38 |
| Fig. 5.  | Contribución de las distintas vías a las dosis. Central nuclear de Almaraz .....                                                                                                | 39 |
| Fig. 6.  | Dosis medias de radiación natural. Centrales nucleares.....                                                                                                                     | 42 |
| Fig. 7.  | Concentraciones medias de $^{40}\text{K}$ , $^{226}\text{Ra}$ y $^{232}\text{Th}$ en suelos. Instalaciones del ciclo .....                                                      | 44 |
| Fig. 8.  | Niveles de radiación gamma en el exterior e interior de las viviendas. Instalaciones del ciclo .....                                                                            | 45 |
| Fig. 9.  | Valores de dosis de radiación natural. Instalaciones del ciclo .....                                                                                                            | 48 |
| Fig. 10. | Concentraciones medias de radón en viviendas de las Islas Canarias .....                                                                                                        | 71 |
| Fig. 11. | Vista exterior de la cámara de radón del INTE/UPC .....                                                                                                                         | 78 |
| Fig. 12. | Principales componentes de una cámara de radón .....                                                                                                                            | 79 |
| Fig. 13. | Tipos de detectores de trazas y electrets LST .....                                                                                                                             | 81 |
| Fig. 14. | Exposición de cartuchos de carbón y electrets SST en el interior de la cámara de radón .....                                                                                    | 82 |
| Fig. 15. | Categorías de exposición potencial al radón. Península .....                                                                                                                    | 93 |
| Fig. 16. | Categorías de exposición potencial al radón. Provincia de Huesca .....                                                                                                          | 93 |
| Fig. 17. | Diagrama de actuación de acuerdo con los distintas categorías genéricas de riesgo .....                                                                                         | 94 |
| Fig. 18. | Vías de entrada de radón en las viviendas .....                                                                                                                                 | 95 |
| Fig. 19. | Barrera bajo solera (1.S.1.1) .....                                                                                                                                             | 96 |
| Fig. 20. | Barrera sobre solera más extracción (2.S.2.2) .....                                                                                                                             | 96 |

