

08-011

## SETTING UP OF A RADON MEASUREMENT SYSTEM FROM AN EXHALATION SIMULATION DEVICE

Noverques Medina, Aina; Juste Vidal, Belén; Sancho Fernández, María; Verdú Marín, Gumersindo; Arnal Arnal, José Miguel; García Fayos, Beatriz

Universitat Politècnica València

Radon is a radioactive gas from the uranium decay which is being considered as a carcinogenic element by the World Health Organization (WHO) since 2010. In 2013, it was published the Directive 59/2013/EURATOM which establishes new radon limit values, more restrictive, and action plans against radon in air. Since then, and due to the great concern about radon hazardous, several research centers, as well as laboratories and collaborating entities, are joining their efforts in order to develop different methodologies and protocols that allow the control and mitigation of radon gas, with the aim of reducing its concentration in air, and thus preserving population health.

Within this context, this work performs the setting up of a RadonScout detector (SARAD GmbH), portable equipment that lets to know in situ and continuously the concentration of radon in air in any location. Measurements have been taken with experimental equipment designed to keep constant environmental conditions. To check the repeatability of the measurements, the results have been compared with RAD7 (DurrIDGE) detector which has been previously used in several intercomparison and calibration procedures.

**Keywords:** radon; air; measure; RadonScout; RAD7

## PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE RADÓN A PARTIR DE UN DISPOSITIVO DE SIMULACIÓN DE EXHALACIÓN

El radón es un gas radiactivo procedente de la desintegración del uranio, considerado como un elemento cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS) desde 2010. En 2013, se publicó la Directiva 59/2013/EURATOM que establecía unos nuevos valores límite, más restrictivos, y planes de acción frente al radón en aire. Desde entonces, y dada la gran preocupación por la peligrosidad de este gas, diversos centros de investigación, así como laboratorios y entidades colaboradoras, aúnan sus esfuerzos para disponer de metodologías y protocolos que permitan el control y la mitigación del gas radón, con el fin de disminuir su concentración en el aire, y así preservar la salud de la población.

Dentro de este contexto, en este trabajo se realiza la puesta a punto del detector RadonScout (SARAD GmbH), un equipo portátil que permite conocer in situ y en continuo la concentración de radón en aire en cualquier emplazamiento. Las medidas se han llevado a cabo a partir de un equipo experimental diseñado para mantener las diferentes variables ambientales estables. Para comprobar la repetibilidad de las medidas, los resultados han sido comparados con los del detector RAD7 (DurrIDGE), con el que se ha participado en diferentes intercomparaciones y calibraciones.

**Palabras clave:** radón; aire; medida; RadonScout; RAD7

Correspondencia: María Sancho msanchof@iqn.upv.es

Acknowledgements/Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto Prometeo/2018/035 de la Generalitat Valenciana



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

En 2010 la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificó al radón como elemento cancerígeno, primera causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras y segunda, tras el tabaquismo, en personas fumadoras. La peligrosidad de este gas, que proviene de la desintegración radiactiva del uranio y del radio, reside en dos de sus descendientes: el Po-218 y el Po-214. Ambos elementos, también radiactivos, son elementos sólidos que se adhieren a las partículas presentes en el aire como los aerosoles, y se depositan en los pulmones en el proceso de inhalación. Durante su decaimiento, ambos radionucleidos emiten partículas alfa, de corto alcance, pero elevada energía, que dañan el tejido pulmonar. El radón presenta una gran afinidad por el aire y tiende a acumularse en espacios cerrados con poca ventilación. Según datos de la OMS, si en estos espacios cerrados la concentración supera los 149Bq/m<sup>3</sup> resulta perjudicial para sus ocupantes.

La preocupación por el control y mitigación de ese gas ha promovido importantes cambios en la legislación. Así, en 2013 se publicó la Directiva 59/2013/EURATOM que establecía unos valores límite, mucho más restrictivos, para la concentración de radón en aire. La concentración máxima de radón en la nueva legislación se fija en 150 Bq/m<sup>3</sup> para edificios de nueva construcción y 300 Bq/m<sup>3</sup> para edificios ya construidos. Esta directiva debía trasponerse a la legislación de los estados miembros de la unión europea antes de febrero de 2018, y actualmente se encuentra en fase de borrador en España.

Asimismo, los niveles de referencia requeridos se pueden obtener a partir de la concentración media anual de radón, necesarios para control y mitigación en espacios cerrados. Sin embargo, esta estimación anual está sujeta a altas incertidumbres asociadas tanto a la propia incertidumbre del método de medida como a la variabilidad temporal del gas radón, que incluye ciclos diarios y ciclos estacionales.

Durante los ciclos diarios, existe una fuerte dependencia de los cambios de temperatura entre el día y la noche mientras que otras variables como la velocidad del viento, las precipitaciones, la humedad o la presión atmosférica influyen en menor medida. En los períodos nocturnos, la concentración de radón es ligeramente superior que en los periodos diurnos ya que la temperatura interna del espacio es mayor que en el exterior, lo que da lugar a una depresión y a la posterior acumulación de radón. Además, en los lugares de trabajo, durante los fines de semana o días festivos, también se pueden encontrar diferencias con respecto a los niveles de radón esperados debido al efecto del edificio cerrado y a la disminución de la ventilación.

Para periodos más largos tales como ciclos estacionales anuales, existe una fuerte dependencia entre las condiciones climatológicas del punto de muestreo y su concentración de radón. Existe un factor de diferencia de 1.5 de concentración de radón entre los valores máximos en invierno y los mínimos en verano (Guía 11.4, CSN 2012). En consecuencia, las medidas tomadas durante un período de tres meses, evitando los meses de verano, darán en la mayoría de los casos una estimación conservadora del promedio anual que garantizará un nivel adecuado de protección.

Algunos de los parámetros con mayor influencia en la actividad de radón son:

- **Temperatura y variaciones diarias:** el movimiento convectivo del aire se ve modificado con la temperatura. Debido al calentamiento de la atmósfera, la concentración de gas en la superficie de la tierra es menor, mientras que cuando se produce una mayor estabilidad atmosférica durante la noche, la concentración de gas aumenta.

- **Presión atmosférica:** las variaciones en la presión tienen una influencia diferente en el espacio intersticial de los poros del suelo y el espacio aéreo en las proximidades de la superficie, por lo que se producen cambios en el gradiente de presión que modifica el flujo convectivo. Este cambio provoca una mayor exhalación de radón en momentos de bajas presiones.
- **Humedad y lluvia:** algunos estudios consideran que en los suelos con alta humedad el radón se disuelve en el agua. De esta manera, el radón y el agua son transportados por las diferentes corrientes subterráneas y la exhalación del radón a la superficie disminuye (Frutos Vázquez et al, 2010). Otros estudios consideran que después de un proceso lluvioso, la concentración de radón podría disminuir. Sin embargo, en ausencia de lluvia durante los días sucesivos, la humedad retenida por el suelo produce un aumento en la tasa de emanación de radón y, por lo tanto, de su concentración en el suelo (García-Vindas, 1999)
- **Altura sobre el suelo:** el aire es menos pesado que el gas radón (ocho veces menos), por lo que a gran altura la posibilidad de encontrar gas radón es baja.
- **Viento:** el aire puede infiltrarse a través del suelo modificando las concentraciones de radón en él.

Disponer de los detectores adecuados es imprescindible para el control del radón en cualquier emplazamiento. Su elección requiere de un análisis detallado de varias metodologías que permitan tener en cuenta las variaciones y fluctuaciones de las concentraciones de gas radón.

Es por esto que el objetivo de este estudio es la puesta en marcha de dos detectores que permiten conocer la concentración de radón en el aire mediante un sistema de medición en continuo. Dada la fuerte influencia de las variaciones climatológicas sobre los niveles de este gas, se ha diseñado un equipo experimental que permite realizar las medidas de radón en aire en condiciones estables de temperatura, humedad y presión.

## 2. Metodología

En este apartado se detalla tanto el equipo experimental diseñado para la realización de las medidas de radón en aire como las especificaciones técnicas de los detectores empleados.

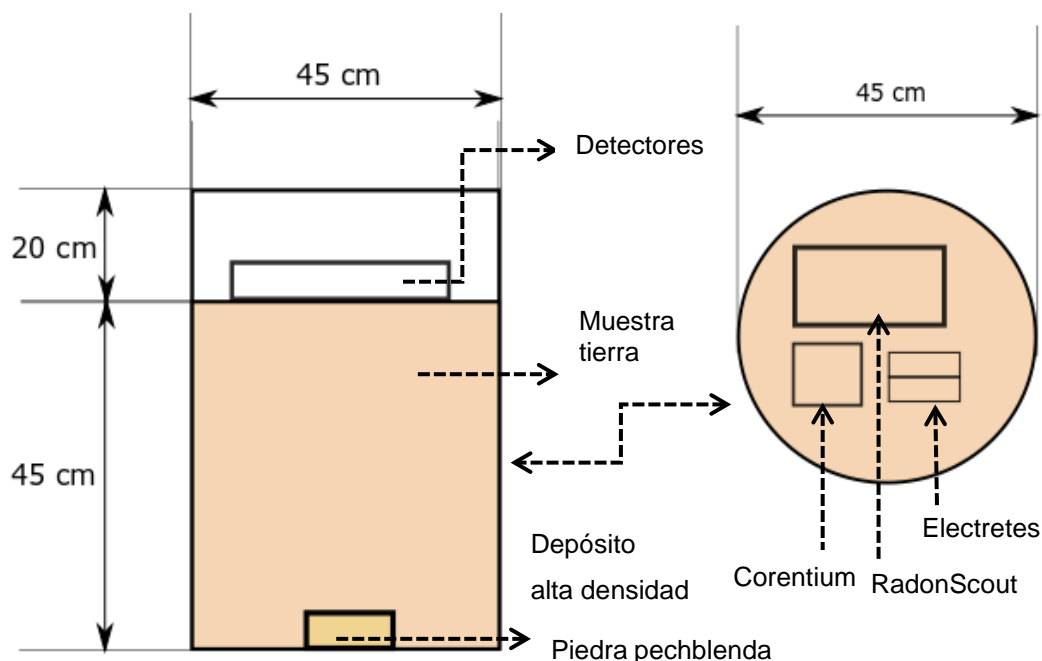
### 2.1 Diseño del equipo experimental

Tal y como se ha detallado inicialmente, el gas radón presentan una elevada variabilidad en sus niveles de concentración durante los diferentes periodos de exposición. Parámetros meteorológicos como temperatura, humedad relativa, presión o lluvias contribuyen a cambios bruscos en las concentraciones y dificultan el control de este gas. Así, algunos detectores se ven fuertemente influenciados por todas estas variables y es necesario disponer de un espacio en el cual poder realizar las mediciones en condiciones controladas y estables.

Por ello, en este trabajo, y siguiendo con estudios previos (Noverques et al, 2018), se ha desarrollado un equipo experimental que permite conocer el funcionamiento de cada detector en unas condiciones estables de humedad, temperatura y presión. Este equipo consiste en un depósito de PVC de alta densidad, impermeable al gas radón, de aproximadamente 65 cm de altura y 45 cm de diámetro, tal y como se muestra en la Figura 1. En su interior se ha depositado una piedra pechblenda, de uranio natural y se

ha recubierto con tierra libre de radón. Entre la superficie de la tierra y la tapa que cierra al depósito, existe un espacio libre de aproximadamente 20 cm.

**Figura 1: Geometría del equipo experimental de simulación de radón (Noverques, 2017)**



Este dispositivo de simulación de radón permite realizar estudios acerca de la emanación del gas, de su transporte y exhalación a la atmósfera, así como de la influencia de otras variables tales como la humedad de la tierra o su temperatura.

Para este estudio, el equipo se ha utilizado para medir la concentración de radón en aire. En la zona libre de tierra, como se muestra en la figura anterior, se depositarán los tres detectores apoyados directamente sobre la superficie. Cuando el dispositivo se cierre de forma hermética, se producirá la acumulación de gas en esta zona. En ese momento se realiza la puesta en marcha de los detectores RadonScout Plus, y Corentium Pro y los dos detectores E-PERM (electretes).

El depósito sirve también como método de control de calidad interna de los detectores empleados tanto en este trabajo como en diversas investigaciones, ya que permite analizar la reproducibilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos.

## 2.2. Detectores empleados

Existen varios métodos para medir el radón que, generalmente, se basan en la medición de sus descendientes, según si son emisores alfa, beta o gamma. Estos métodos de medición se dividen en métodos pasivos, donde se requieren análisis posteriores a la exposición, o métodos activos, cuando se almacena la concentración de radón y se obtiene una lectura directa de los niveles de radón. La mayoría de las técnicas se utilizan para conocer las concentraciones de radón en el aire y, en menor medida, el radón en el agua o el radón exhalado.

De entre la metodología disponible y según estudios previos (Noverques et al, 2018) se han seleccionado dos técnicas que cumplen con los requisitos predeterminados para la consecución del objetivo de este trabajo: RadonScout Plus (SARAD GmbH) y Corentium Pro (AirThings). Ambos son detectores activos, en continuo, que ofrecen como resultado la acumulación de radón cada cierto periodo de tiempo. Permiten comprobar las variaciones diarias y estacionales de la concentración de radón.

Asimismo, se han utilizado también los electretes, un método pasivo con el que obtiene la concentración de radón promedio durante el periodo de exposición. Este tipo de detector forma parte del control de calidad interno del laboratorio, por lo que la precisión del método está ya validada. En este caso no se observa la evolución temporal del nivel de radón como para los detectores en continuo, sino que se obtiene el valor promedio final durante el tiempo de exposición.

A continuación, se detallan los tres detectores utilizados en este estudio:

### **1. RadonScout Plus (SARAD GmbH)**

RadonScout Plus de pequeño tamaño, 175x135x55 mm (largo x ancho x alto) lo que facilita su transporte y manejo, como se muestra en la Figura 2. Dispone de una batería que ofrece una autonomía de hasta 3 meses de medida en continuo, así como la posibilidad de realizar mediciones conectado a la corriente eléctrica.

**Figura 2: RadonScout Plus (RadonScout Manual, 2017)**



El RadonScout Plus consiste en una cámara de medida equipada con un detector semiconductor de silicio de alto voltaje. La concentración de radón se mide a través de los descendientes alfa de vida corta del radón (Po-218) que se generan en su decaimiento en el interior de la cámara. Los iones del Po-218 que quedan con carga positiva son capturados por el campo eléctrico en la superficie del detector semiconductor. El número de iones recogidos es proporcional a la cantidad de radón en el interior de la cámara. Durante el proceso de decaimiento existe una desintegración detectable más, la del Po-214, también emisor de partículas alfa.

Asimismo, los resultados ofrecidos por el RadonScout Plus disponen de una corrección integrada debida a la humedad ambiental (RadonScout Manual, 2017).

### **2. Corentium Pro**

Este detector presenta unas dimensiones de 140 x 140 x 30 mm, lo que también facilita su transporte y manejo. El método de muestreo se basa en la difusión de radón en el interior de la cámara. Dispone de fotodiodos de silicio que detectan las partículas alfa producidas en el decaimiento del radón y cuantifican su energía. Permite realizar las mediciones de radón durante periodos que varían entre un día y un año. Sin embargo, es necesario esperar 24 horas para poder descargar los primeros resultados. El detector se muestra en la Figura 3.

**Figura 3: Corentium Pro (Corentium Pro Manual, 2017)**



En este caso, las mediciones se pueden controlar a través de una aplicación de un dispositivo de telefonía móvil que permite ajustar todos los parámetros según las necesidades del usuario.

### **3. Sistema de detección E-PERM, electretes (Rad Elec. Inc.)**

El sistema de detección E-PERM está formado por una cámara que permite la acumulación de radón en su interior y un electrete enroscado a la misma.

El electrete es un disco de Teflón con carga positiva, alojado en un soporte de plástico eléctricamente conductor. A medida que el radón y sus descendientes se descomponen dentro de una cámara se produce la liberación de partículas alfa y beta. Estas partículas chocan con las moléculas de aire provocando el efecto llamado ionización. La molécula de aire resultante en este choque se queda con carga positiva o negativa. Los iones cargados negativamente son atraídos por la superficie del electrete, cargado positivamente, y se produce la reducción del voltaje. En función de la descarga de potencial durante un periodo de tiempo conocido, se obtiene la concentración de radón en el ambiente (E-PERM System Manual, 2007).

Existen dos tipos de electretes según la concentración de radón a medir: electretes de corto plazo (ST-Short Term) y electretes de largo plazo (LT-Long Term). Los electretes de corto plazo presentan una mayor sensibilidad y son utilizados para largos periodos de exposición y concentraciones elevadas de radón. El tipo de cámara también varía en función de la actividad de radón a medir (cámara tipo S y cámara tipo L). Con el sistema de detección E-PERM se ha participado en diversas intercomparaciones y calibraciones externas que permiten verificar la validez de los resultados obtenidos. Asimismo, las mediciones se han realizado por duplicado, siguiendo con los requisitos establecidos para el control de calidad interno del laboratorio. (Noverques, 2018).

Para este estudio, se han utilizado dos cámaras tipo LLT (cámara L conectada a electrete tipo LT) como se muestra en la Figura 4.

**Figura 4: Sistema de detección E-PERM, LLT**



### 2.3. Condiciones de medida

Los dos detectores objeto de estudio se han expuesto en diferentes periodos en el depósito de simulación de radón. Inicialmente, y durante 3 días, se realizó una prueba para verificar el manejo del instrumental y definir la ubicación de los detectores en el interior del depósito de simulación. La geometría y colocación exacta de los detectores permitiría demostrar la reproducibilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos. Asimismo, se demostraría que el depósito es un dispositivo óptimo para la simulación de radón. Estos resultados no se incluyen en apartados posteriores ya que era una puesta en marcha de todo el montaje experimental.

Las siguientes medidas se realizaron durante 1, 3 y 7 días para observar la evolución temporal del gas radón en aire en el interior del depósito para unas mismas condiciones de trabajo.

El protocolo de medida se inicia con la colocación de los detectores sobre la superficie del depósito, su encendido y el posterior cierre del depósito. Durante el periodo de exposición, el equipo de simulación de radón debe permanecer alejado de puertas y/o ventanas, evitando cambios bruscos en las condiciones ambientales.

### 4. Resultados

En este apartado se detallan los resultados obtenidos en la puesta en marcha de los detectores RadonScout Plus y Corentium Pro a partir del dispositivo experimental diseñado para la simulación de un sistema de exhalación de radón. Para cada detector se ha considerado también la temperatura (°C) y la humedad relativa (%). Asimismo, se ha calculado la diferencia relativa entre ambos métodos a partir de la concentración de radón en aire integrada durante cada periodo de exposición, es decir, la concentración promedio. La expresión utilizada es:

$$\text{Diferencia relativa métodos (\%)} = \frac{[Rn]_{RadonScout} - [Rn]_{CorentiumPro}}{[Rn]_{RadonScout}} \quad (1)$$

Siendo:  $[Rn]_{RadonScout}$  la concentración de radón en aire promedio para cada periodo de exposición ( $B/m^3$ ) medida con el detector RadonScout y  $[Rn]_{CorentiumPro}$  la concentración de radón en aire promedio para cada periodo de exposición ( $B/m^3$ ) medida con el detector Corentium Pro.

Los valores promedio de concentración de radón en aire para cada periodo de exposición se muestran en la Tabla 1. Como se observa en dicha tabla, cuando mayor es el periodo de exposición, mayor es la concentración de radón en el interior del depósito. En él, el radón que emana de la piedra pechblenda es transportado a través de la tierra y exhala fuera de la superficie. Dado que el tanque se encuentra cerrado herméticamente, el radón no escapa ni se difunde en el aire por lo que se acumula en el interior y la concentración aumenta.

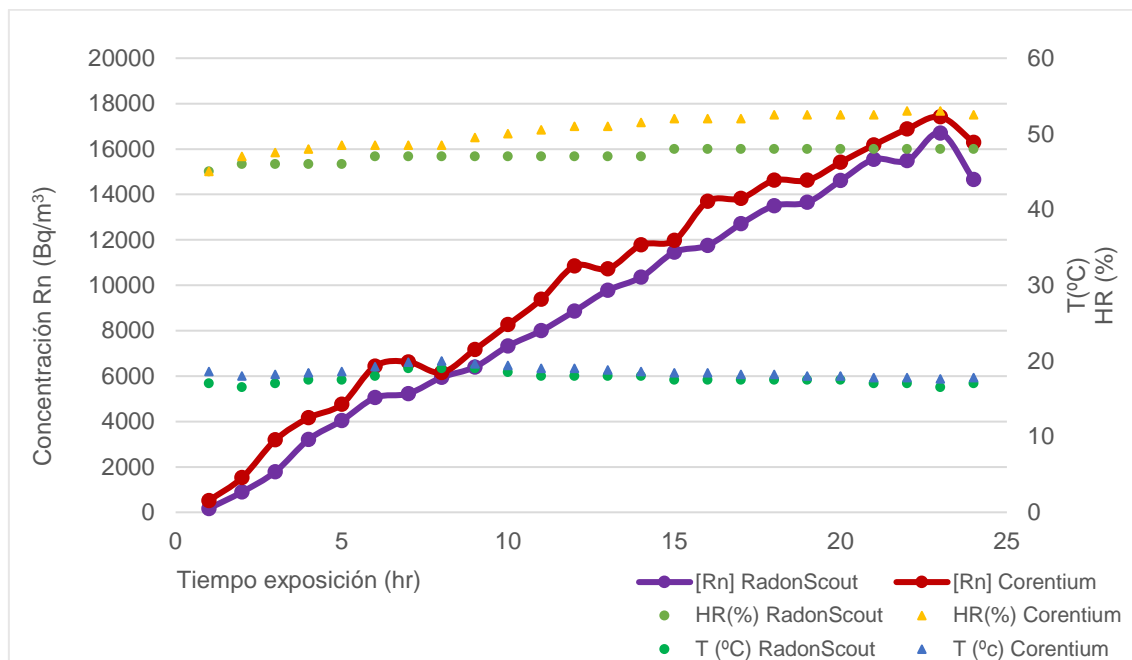
La última de las columnas, muestra el error asociado a las diferencias de los resultados obtenidos en cada método utilizado. Para periodos cortos (1 día), este error se sitúa casi en el 12% mientras que, para tiempos de exposición mayores (3 y 7 días), la diferencia entre ambos métodos es prácticamente despreciable. Para los valores obtenidos en la segunda exposición de 7 días, el error entre ambos métodos casi alcanza el 5%. Esto es debido a que el detector CorentiumPro detectó durante las mediciones, fuertes vibraciones debidas a la actividad del personal en el interior del laboratorio y, por tanto, la concentración de radón en aire medida es ligeramente inferior a lo esperado.

**Tabla 1: Concentración de radón obtenida en el dispositivo de simulación mediante los dos detectores**

Periodo de exposición	Corentium Pro			RadonScout Plus			Dif. Relativa métodos (%)
	Temp. (°C)	HR (%)	Concentración promedio de Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Temp. (°C)	HR (%)	Concentración promedio de Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	
1 día	17.6	45	10102 ± 600	17.6	41	9043 ± 90	11.7
3 días	17.8	45	21170 ± 1270	17.9	46	20862 ± 208	1.47
7 días	18.9	45	31210 ± 1872	19.8	58	31380 ± 313	0.54
7 días	18.8	42	30053 ± 1870	19	57	31567 ± 315	4.79
7 días	18.2	51	33982 ± 2038	18.2	57	34971 ± 350	2.82

Para analizar cómo evoluciona la concentración de radón en función del periodo de exposición, los valores obtenidos se han representado en función del tiempo. Se muestran tanto el nivel de concentración de radón en aire para ambos detectores como las temperaturas (°C) y humedades relativas (%) medidas. En la Figura 5 se observa el incremento de la concentración de radón en el interior equipo de simulación para el periodo de 1 día (24hr) mediante los detectores RadonScout Plus y Corentium Pro.

**Figura 5: Obtención de la concentración de radón para 1 día**



Como se observa en la figura anterior, los valores de temperatura (°C) y humedad relativa (HR, %) en el interior del depósito se mantiene estables durante todo el periodo de exposición para ambos detectores, lo que facilita su puesta en marcha. El ligero incremento de la humedad se debe a que el depósito permanece cerrado, sin ventilación durante todo el proceso de medición.

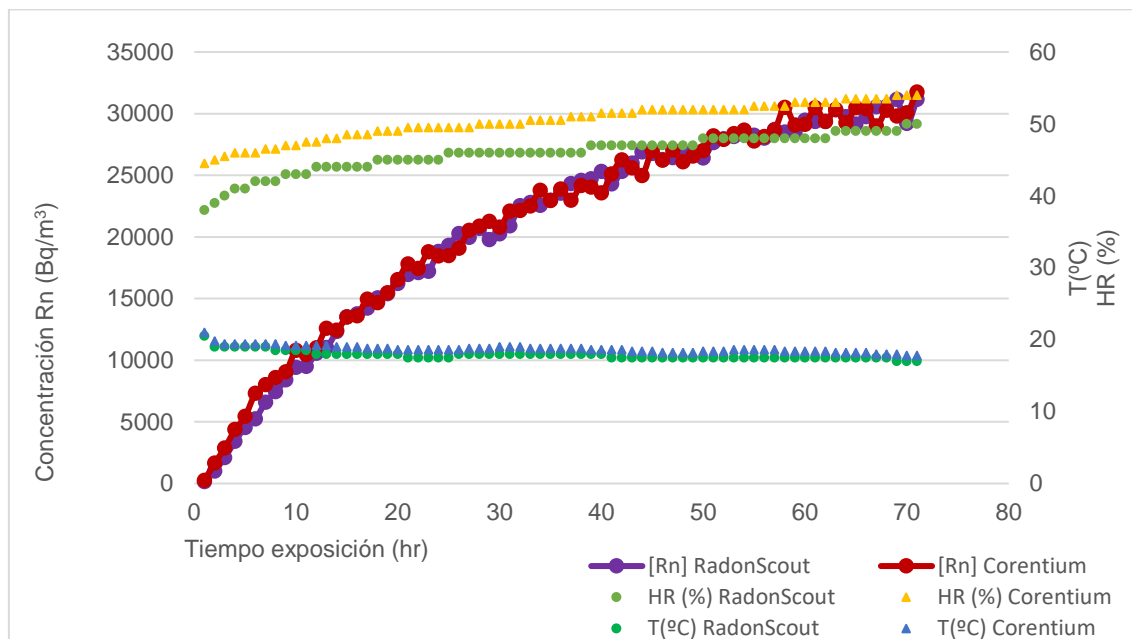


La concentración de radón en aire, como se muestra en la Figura 5, aumenta durante las 24 horas de exposición. Sin embargo, aunque ambos detectores presentan la misma tendencia creciente, el detector Corentium presenta valores ligeramente superiores a RadonScout y con alguna perturbación debido a la sensibilidad del dispositivo.

En ninguno de los casos la concentración de radón en aire en el interior del depósito llega a su valor límite máximo. Por lo tanto, se requieren mayores periodos de exposición para que, según la geometría del depósito utilizada, se alcance la saturación de radón en el aire y la concentración alcance dicho valor máximo.

En la Figura 6 se muestran los resultados aumentando el periodo de exposición a 3 días.

**Figura 6: Concentración de radón durante 3 días de exposición**

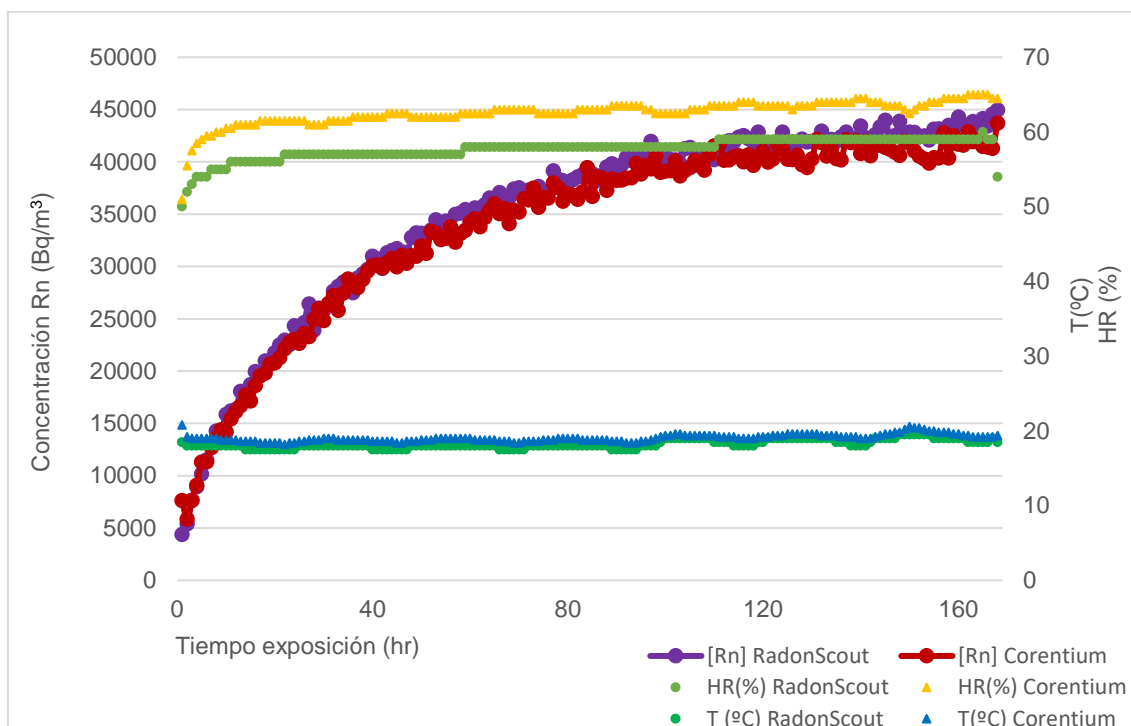


Como se observa en la Figura 6, el valor de temperatura se mantiene estable entorno a los 20°C para ambos detectores. La humedad relativa detectada por el CorentiumPro durante 3 días de exposición es ligeramente superior, aunque en ambos casos se sitúa en torno al 50%, valores típicos para la ciudad de Valencia. En cuanto a la concentración de radón en el aire acumulado en el depósito, esta sigue aumentando y se empieza a vislumbrar un principio de saturación del aire, cerca de 30.000 Bq/m<sup>3</sup>. La diferencia entre ambos detectores tal y como se aprecia en la gráfica, es prácticamente nula, un 1.47% según los cálculos de la Tabla 1.

Para conocer el valor límite que alcanzaría la concentración de radón en aire, el tiempo de exposición se ha seguido aumentando hasta los 7 días. Los resultados se muestran en la Figura 7.

Tal y como se ha comentado en los dos casos anteriores, tanto la temperatura como la humedad relativa se mantienen estables para ambos detectores, siendo ligeramente superior la HR (%) medida por el Corentium Pro. Los valores de humedad relativa se sitúan por encima del 55% de media, debido en parte a un cambio en las condiciones climatológicas del interior del laboratorio durante el periodo de exposición.

**Figura 7: Concentración de radón durante 7 días de exposición**



Se observa en la Figura 7 que la concentración de radón en aire en el interior del depósito empieza a estabilizarse, es decir, se alcanza la saturación. Este valor límite se fija cerca de los 45000 Bq/m<sup>3</sup>. Para este periodo de exposición, la concentración de Rn-222 medida por el RadonScout es ligeramente superior que la obtenida mediante el Corentium Pro. Sin embargo, la diferencia entre ambos métodos como se ha detallado en la Tabla 1, no supera el 5% para el caso más desfavorable.

Una vez realizada la puesta en marcha y el verificado de los detectores, se observa que ambos ofrecen resultados similares en condiciones casi estables de temperatura y humedad. A continuación, estos detectores se comparan con el sistema de detección E-PERM (electretes), utilizado en numerosas investigaciones previas y con los cuales, como se ha comentado anteriormente, se ha participado en diversas intercomparaciones y calibraciones externas.

Para el cálculo de la diferencia entre los distintos métodos, se ha tomado como valor fijo la concentración de radón en aire medida con los electretes, según las expresiones (2) y (3):

$$Diferencia\ relativa\ métodos\ (%) = \frac{[Rn]_{electretes} - [Rn]_{RadonScout}}{[Rn]_{electretes}} \quad (2)$$

$$Diferencia\ relativa\ métodos\ (%) = \frac{[Rn]_{electretes} - [Rn]_{Corentium\ Pro}}{[Rn]_{electretes}} \quad (3)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 2.

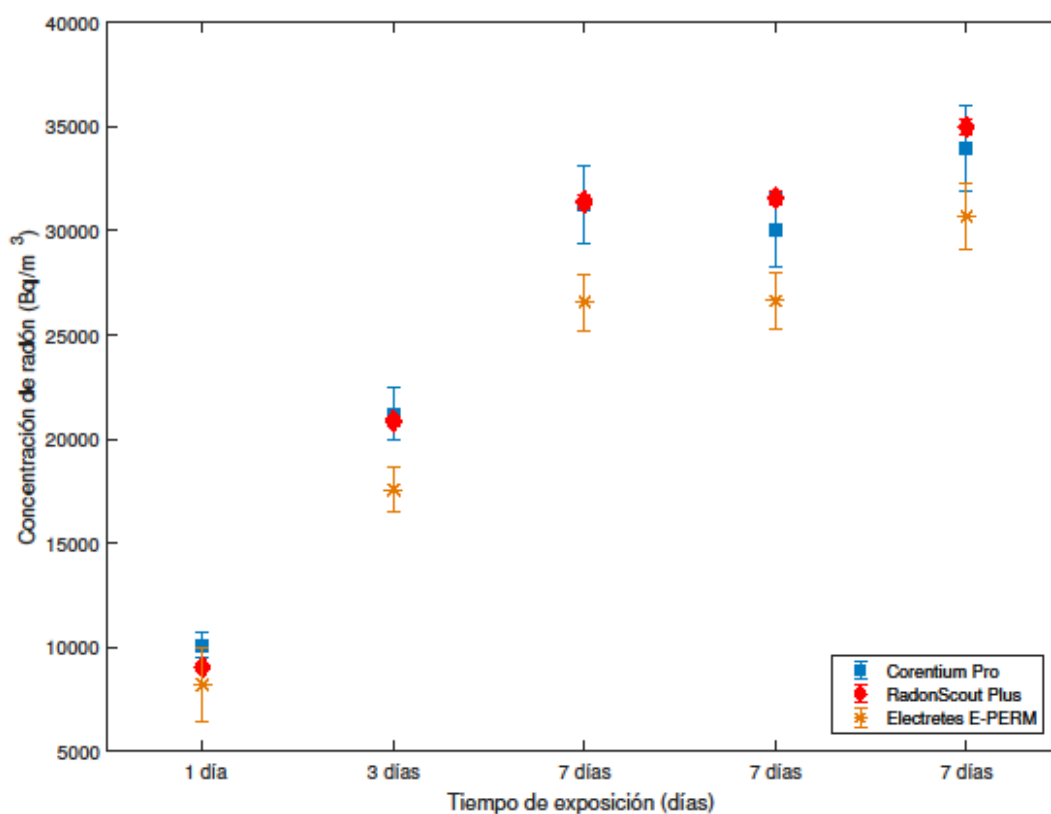
**Tabla 2: Comparación de las tres metodologías utilizadas**

Periodo de exposición	Corentium Pro [Rn] (Bq/m <sup>3</sup> )	RadonScout [Rn] (Bq/m <sup>3</sup> )	Sistema LLT [Rn] (Bq/m <sup>3</sup> )	Dif. Relativa LLT- Corentium (%)	Dif. Relativa LLT- RadonScout (%)
1	10102 ± 600	9043 ± 90	8197 ± 1815	23.23	10.31
3	21210 ± 1272	20862 ± 208	17556 ± 1071	20.58	18.83
7	31210 ± 1872	31380 ± 313	26566 ± 1357	17.48	18.82
7	30053 ± 1800	31567 ± 315	26638 ± 1364	12.82	18.50
7	33982 ± 2038	34971 ± 350	30706 ± 1561	10.67	13.89

Como se observa en la Tabla 2, la diferencia entre RadonScout y electretes, y Corentium y electretes es superior a la obtenida mediante la comparación de los dos detectores en continuo. El sistema E-PERM, para cualquier periodo de exposición mide concentraciones (en Bq/m<sup>3</sup>) inferiores a los otros dos detectores. Sin embargo, en ninguno de los casos se superan los criterios de aceptación para el cálculo de la precisión del método, fijados en un 30% para concentraciones mayores a 300 Bq/m<sup>3</sup>, que evalúa la reproducibilidad de los resultados (Noverques, 2018). Esto indica que los resultados obtenidos resultan válidos para la medida de radón en aire a partir del depósito de simulación de Rn-222 diseñado.

Los valores de concentración promedio para cada detector se han representado en el gráfico de barras de errores de la Figura 8.

**Figura 8: Gráfico de barras de error para cada valor de concentración promedio**



Como se observa en la figura anterior, el gráfico de barras de error permite identificar la variabilidad de la medida de concentración de radón en aire promedio en función de la incertidumbre asociada a cada medida. Para los detectores en continuo, las barras de error coinciden, por lo tanto, los valores obtenidos se consideran aceptados. En algunos de los casos, los resultados obtenidos por el sistema E-PERM quedarían ligeramente por debajo, no llegando a coincidir en algunos puntos. Estos valores sugieren seguir investigando y mejorando el procedimiento de medida.

## 5. Conclusiones

En este estudio se ha realizado la puesta en marcha de dos detectores en continuo para la medida de radón en aire.

El dispositivo de simulación de radón ha resultado imprescindible para esta puesta en marcha de los detectores, ya que permite realizar medidas de radón en aire sin influencia de fuertes variaciones de temperatura y humedad, dos parámetros que afectan a la variabilidad de la concentración de radón.

Asimismo, se observa que para bajos periodos de exposición (1 y 3 días) no se logra alcanzar el valor máximo para la concentración de radón en un cierto volumen de aire. Para tiempos mayores en cambio (alrededor de 7 días de exposición), y teniendo en cuenta la geometría del depósito utilizado, la concentración de radón empieza a estabilizarse.

Si se comparan los valores de concentración de radón en aire, se percibe la similitud de estos para cualquier periodo de exposición, siendo inferior el error para tiempos mayores. En algunos casos, esta diferencia no alcanza el 2%, valor aceptado en cuanto a la repetibilidad de resultados. Los resultados se han mostrado gráficamente, lo que permite comprobar y verificar la evolución del gas radón en aire de forma gráfica.

Analizando los resultados obtenidos en la comparación entre ambos detectores en continuo (RadonScout Plus y Corentium Pro) y el sistema de detección E-PERM, se observa que, pese a que este último ofrece valores de concentración de radón en aire inferiores, el error asociado se sitúa como máximo en un 18.83%. Este valor de precisión resulta aceptable según los criterios establecidos por el laboratorio. Sin embargo, se debe seguir investigando para disponer así de metodologías que ofrezcan resultados homogéneos y reproducibles.

Este trabajo supone una primera aproximación al estudio comparativo entre ambos métodos y abre un nuevo campo de estudio relacionando el tiempo de exposición con la acumulación de radón en aire en el interior de espacios cerrados.

## 6. Bibliografía

- CSN. (2012). Guía de Seguridad 11.4. Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear.
- Corentium Pro User Manual (2017). Recuperado el 7 de enero de 2019 de <https://airthings.com/es/pro/>.
- E-PERM System Manual (2007). Rad Elec, Inc. Rad Elec. INC. (2007).
- Frutos Vázquez, B., Olaya Adán, M. (2010). Protección frente a la inmisión de gas radón en edificios. Colección Informes Técnicos 24.2010. Consejo de Seguridad Nuclear.
- García-Vindas, J.R. (1999). Influencia de la precipitación sobre la concentración del radón en el suelo: simulación en laboratorio y comparación con datos de campo.
- Noverques, A., Verdú, G., Juste, B., & Sancho, M. (2019). Experimental radon exhalation measurements: Comparison of different techniques. *Radiation Physics and Chemistry*, 155, 319-322.

- Noverques Medina, A. (2017). Trabajo Final de Máster. Desarrollo de metodologías para la realización de mediciones de exhalación de Radón 222. Universitat Politècnica de València.
- Noverques Medina, A. (2018). Trabajo Final de Máster. Desarrollo de la norma UNE-EN ISO/IEC 17025 para la competencia del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la UPV en la acreditación de la medición de radón en aire. Universitat Politècnica de València.
- Europea, U. (2014). Directiva 2013-59-Euratom, del Consejo, de 5 de diciembre de 2013, por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario oficial de la Unión Europea L*, 13.
- RadonScout Plus, User Manual (2017), Sarad Company, Germany.