

# Facultad De Ciencias

# Puesta a punto de un sistema de lectura de trazas nucleares en detectores de radón CR-39

(Setup of a system for reading nuclear tracks in CR-39 radon detectors)

Trabajo de Fin de Grado Para acceder al

# GRADO EN FÍSICA

Autora: Adriana Herrera Díez

Director: Carlos Sainz Fernández

Marzo - 2015

Quiero dedicar este trabajo a mi familia y amigos, que me han apoyado en todo momento a lo largo de mi carrera. Y en especial, a mis padres.

Agradecer también, la ayuda recibida por parte de mi tutor Carlos Sainz y el grupo radón de la Universidad de Cantabria.

Resumen	5
Abstract6	5
Objetivos	7
1. Introducción 8	3
1.1 El radón 8	3
1.1.1 El radón, ¿de dónde procede? 9	9
1.1.2 El radón , ¿cómo se puede medir?10	)
1.1.3 El radón,¿por qué estudiarlo?12	2
1.2 Trazas nucleares 13	3
1.2.1 ¿Cómo se forman las trazas?13	3
1.2.2 ¿Cómo se analizan las trazas? 14	1
2. Instrumentación16	5
2.1 Detector CR-39	3
2.2 Software ImageTool 17	7
2.3 Sistema de revelado 17	7
2.4 Obtención de imágenes 19	9
2.5 Lectura y caracterización de la traza 20	)
2.6 Cámara de radón 24	1
3. Métodos de análisis	3
3.1 Medida del fondo 26	3
3.2 Análisis de Linealidad	7
3.3 Análisis de variabilidad 27	7
3.4 Calibración	3
3.5 Intercomparaciones 29	9
3.6 Cálculo de errores 30	)

4. Resultados	31
4.1 Medida del fondo	31
4.2 Análisis de Linealidad	32
4.3 Análisis de variabilidad	33
4.4 Calibración	35
4.5 Intercomparaciones	35
4.5.1 HPA	36
4.5.2 NIRS	37
4.5.3 BFS	38
5. Conclusiones	40
6. Bibliografía	42



# Resumen

El estudio de la radiación que proviene del radón y de sus descendientes se ha visto incrementado en los últimos años, debido a la importancia que tiene su conocimiento para la salud pública, ya que la inhalación de este gas es la segunda causa de cáncer de pulmón en el mundo.

Este trabajo se centra en el estudio de un nuevo sistema de lectura de trazas nucleares, en el que se ha empleado un software que se utiliza para el conteo de células. Se han llevado a cabo diversos análisis para la puesta a punto del software y se han analizado los criterios que hay que tener en cuenta a la hora de realizar dichas lecturas.

Para corroborar la eficacia de este nuevo método, se han llevado a cabo una serie de ejercicios, que se emplean actualmente para analizar la eficacia de los diferentes métodos empleados en los laboratorios, que calculan y analizan la radiación por emisiones de radón. Se han utilizado datos que provienen de tres laboratorios de referencia internacionales que son HPA (Reino Unido), NIRS (Japón) y BFS (Alemania).

Finalmente, se ha medido el fondo de los detectores con un mecanismo innovador. Consiste en el conteo de las trazas que se encuentran tras una lámina de aluminio colocada sobre la mitad del detector.

# Abstract

The study of the radiation comes from the radon and its descendants has been increased over the last years due to the importance that its awareness has for public health since the inhalation of the gas is the second cause of lung cancer in the world.

This project focuses on the study of a new reading system of nuclear tracks in which it has often been used software for counting cells. Several analyzes have been carried out in order to set up the software and different criteria have been taken into account when performing such readings.

Some exercises have been employed to check the effectiveness of this new method which is currently used in order to analyse the effectiveness of different methods carried out in laboratories and which calculate and analyse the radiation by the radon emission. It has been used the data from three laboratories of international reference which are HPA (United Kingdom). NIRS (Japan) and BFS (Germany).

Finally, the background of the detectors has been measured with an innovative method. This one consists in the counting of tracks that exists behind an aluminum foil which is placed on the detector.

# Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es conseguir adaptar un programa de lectura y conteo de trazas nucleares, partiendo de un software que habitualmente se utiliza con un propósito diferente. En este caso, el software utilizado durante todo el trabajo, se emplea para la detección y conteo de células en el ámbito de la medicina. En este estudio, mediante ajustes y análisis, se ha utilizado satisfactoriamente para la lectura y conteo de trazas nucleares.

Con objeto de adaptar y validar este método para la lectura de trazas nucleares se han realizado diferentes pruebas previas a la aprobación del mismo.

En primer lugar se ha llevado a cabo la puesta a punto del software para la lectura y conteo de trazas nucleares. Por ese motivo se ha analizado si el programa responde de manera lineal, comparando los resultados con unos detectores de referencia. También se ha analizado la variabilidad del sistema, mediante la clasificación de dos parámetros, y creando finalmente un cuadro donde se realiza dicha clasificación según los criterios seleccionados.

En segundo lugar se ha calibrado el sistema en condiciones controladas de atmósfera de radón, para obtener un factor de calibración. Este factor proporciona el conocimiento de la exposición de los detectores analizados, sabiendo únicamente la densidad de trazas.

En tercer lugar se ha validado la eficacia del sistema de medida participando en ejercicios de intercomparación. En este punto se han realizado ejercicios de análisis de trazas nucleares bajo los criterios internacionales habituales.

Finalmente, se ha medido el fondo de los detectores con un sistema innovador, que consiste en colocar una placa de aluminio ocupando la mitad del detector y contabilizar el número de trazas que hay en esa zona, y posteriormente, compararlo con el valor asignado por el fabricante.

# 1. Introducción

Este trabajo consiste en encontrar un nuevo método de lectura de trazas nucleares, concretamente trazas producidas por las partículas alfa emitidas por el radón y sus descendientes de vida media corta. Por tanto tenemos que realizar un pequeño repaso de los factores que afectan a este proceso.

En este apartado vamos a explicar la importancia del estudio del radón, en concreto: qué es, de dónde procede, como se puede medir etcétera, debido a que su análisis es la principal motivación de este trabajo.

Además definiremos también el concepto de traza nuclear: cómo se forma o cómo se puede analizar. Esta información es muy útil a la hora de hacer la lectura de las mismas en las imágenes obtenidas durante el análisis.

### 1.1 El radón

El radón es un gas radiactivo de origen natural que proviene de la desintegración del <sup>238</sup>U, <sup>235</sup>U y <sup>232</sup>Th, concretamente de la desintegración del <sup>226</sup>Ra, que forma parte de la cadena de desintegración del <sup>238</sup>U.

Existen varios isótopos del gas radón. El <sup>220</sup>Rn pertenece a la familia del <sup>232</sup>Th, y es conocido también como torón, y el <sup>219</sup>Rn que pertenece a la familia del <sup>235</sup>U que se le conoce por el nombre de actinón. Ambos isótopos tienen periodos de semidesintegración de 55.6s y 4s respectivamente. En este estudio se ha analizado el <sup>222</sup>Rn que forma parte de la cadena del <sup>226</sup>Ra, el cual es procedente a su vez del <sup>238</sup>U, posee un periodo de 3.8 días y es conocido propiamente como radón.

Pertenece a la familia de los gases nobles, según la Tabla de Mendeleiev. Además posee una estructura atómica tan estable que no necesita combinarse con ningún otro elemento químico, no obstante, es extremadamente móvil pudiendo atravesar, por ejemplo, una pared.

El radón forma parte de la composición del aire atmosférico en una pequeña proporción, siendo además un gas incoloro, inodoro e insípido. También posee una alta solubilidad en agua así como en otro tipo de líquidos, sobre todo si son de origen orgánico.<sup>[1]</sup>



Figura 1. Cadena de desintegración del <sup>238</sup>U, con los descendientes del <sup>222</sup>Rn en rojo <sup>[2]</sup>

Como se observa en la *figura 1* el radón proviene de la desintegración del uranio, siendo el radio su principal precursor. Al ser elementos radiactivos, los descendientes del radón también lo son. Como consecuencia, hay que tener en cuenta que el radón es tan peligroso como lo son sus descendientes.

#### 1.1.1 El radón, ¿de dónde procede?

Se observa en la *figura 1* que el radón proviene del radio y por tanto del uranio, por esta razón y para saber el origen del radón, debemos investigar el origen del uranio. Podemos encontrar uranio en casi todas las rocas y suelos, en pequeñas proporciones. El uranio y el radio son ambos sólidos, por tanto, no pueden desplazarse si no es con la roca o suelo al que pertenecen.

Sin embargo los átomos de radón formados son gaseosos, en este caso el movimiento es sencillo tanto para él como para sus descendientes. Los principales mecanismos de transporte de este elemento son mediante difusión (variaciones de concentración) o convección (variaciones de temperatura y presión). La movilidad del radón también depende de la porosidad y tamaños de las rocas, ya que cuanto más porosa y pequeña sea la acumulación de rocas en el suelo más fácil será el acceso del gas a la superficie.

Otra característica es la permeabilidad de la superficie, que nos indica la mayor o menor dificultad que presentan los suelos al paso de los fluidos <sup>[1]</sup>. Este último parámetro, es el más importante a la hora de evaluar el escape de radón del suelo y como resultado la cantidad de gas en nuestras casas.

Por ejemplo, los suelos arcillosos tienen un alto contenido de uranio, pero también son muy impermeables, por tanto la cantidad de radón que pueda alcanzar la superficie será pequeña. Sin embargo los suelos calcáreos, que poseen rocas muy fracturadas y permeables, ayudan a que este gas circule fácilmente por ellos aunque tengan unos niveles de uranio bajos.

Los factores atmosféricos también contribuyen a la cantidad de radón que se encuentra en los suelos y casas, debido a la propiedad que tiene el radón de disolverse muy bien en agua. Por esta razón, en periodos de lluvias, el radón se concentrará en el suelo y se desplazará disuelto en el agua. Ocurre al contrario en periodos de bajas presiones, que el radón saldrá del suelo mediante un proceso convectivo proveniente de la diferencia de presiones entre el suelo y el aire.

Otro factor es la diferencia de temperaturas. Por ejemplo entre el exterior y el interior de una casa, esta diferencia de temperaturas lleva a una variación de concentración de radón a lo largo de la jornada como consecuencia de un proceso de difusión, produciéndose los máximos valores a primeras horas de la mañana.

Como conclusión, el contenido de radón en las casas depende del tipo de suelo en el que está construida, si dicho suelo es permeable o no, de la cantidad de radio que posea, de los factores atmosféricos del momento y del tipo de ventilación que se realiza en la casa.

#### 1.1.2 El radón, ¿cómo se puede medir?

La medida de concentración de radón presente en una masa de aire se basa en el conteo de las partículas alfa emitidas tanto por el radón como por sus descendientes en dicha masa. Existen diferentes instrumentos de medida que se pueden dividir en dos grupos: detectores activos o pasivos.

Los detectores pasivos no requieren de corriente eléctrica para su funcionamiento, mientras que los activos si necesitan corriente. Además, estos últimos, son capaces de trazar la concentración y fluctuación del gas radón durante los periodos de medida.

Los principales detectores pasivos son: el detector de partículas alfa (ATD), el detector de carbono activo (ACD) y la cámara de iones (EIC). Y el principal detector activo es: el monitor de radón continuo.<sup>[3]</sup>

#### i. Detector de partículas alfa.

Es una pequeña pieza de plástico encerrada dentro de una cámara de difusión, cubierta por un filtro en su interior que evita la entrada de los descendientes del radón.

Existen diferentes tipos dependiendo la composición del material: polyallyldiglycol carbonate (detectores PADC o CR-39), nitrato de celulosa (LR-115), o policarbonato (Makrofol).

Cuando las partículas alfa que son generadas por el radón y sus descendientes entran en contacto con el material, producen daños microscópicos, llamados trazas. Un ataque químico o electro químico hace que el grabado del detector agrande el tamaño de la traza, haciéndola observable al microscopio y pudiendo, por tanto, contabilizarse tanto manual como automáticamente.

El número de trazas por unidad de superficie es directamente proporcional a la concentración de radón en Bqh/m<sup>3</sup>. Un factor de calibración, obtenido por exposiciones controladas a una concentración conocida, permite la conversión desde densidad de trazas a concentración de radón.

Este tipo de detectores suelen emplearse para exposiciones con intervalos de tiempo entre un mes y un año. Son instrumentos insensibles a la humedad, temperatura y radiación beta y gamma.

#### ii. Detector de carbono activo.

Es un dispositivo pasivo de periodo corto de medida de radón, cuyas medidas se realizan en lugares interiores. Este método únicamente proporciona una buena estimación de la media de concentración de radón sobre el tiempo de exposición, si los cambios en la concentración del gas son pequeños.

Se fundamenta en la adsorción del radón mediante la propiedad de absorción que tiene el carbono activo. Después de la exposición, el detector se cierra herméticamente y tras un periodo de tres horas se analiza. El intervalo de espera se realiza para que tanto el radón como sus descendientes lleguen a un equilibro secular, es decir, que todos los elementos tengan la misma actividad. Este proceso puede ser estudiado por espectrometría gamma o mediante técnicas de conteo de centelleo líquido.

#### iii. Cámara de iones.

Es un dispositivo pasivo, que funciona como detector de integración, para medir la concentración promedio del gas radón durante el periodo de medición.

El radón, pero no sus descendientes, entra en la cámara por difusión pasiva a través de una entrada filtrada. La radiación emitida por el radón y por sus descendientes formados en el interior, forman dentro de la cámara, ionizaciones con el aire del interior del volumen. Los iones negativos son recogidos por un electrete positivo colocado al fondo de la cámara. La descarga de los electretes durante un intervalo de tiempo conocido es una medida de tiempo de integración de ionización durante el intervalo, que se relaciona a su vez con la concentración de radón. La descarga del electrete en voltios junto con la duración del intervalo y un factor de calibración, da la concentración de radón en las unidades deseadas.

Existen dos clases de detectores de este tipo, unos de periodo de medida corto (entre 2 y 15 días) y otros de periodo de medida larga (de 3 a 12 meses).

#### iv. Monitores de radón continuos.

Hay muchos tipos de monitores en continuo, difieren en el tipo de sensor empleado. Puede ser celdas de centelleo, cámaras de ionización y detectores en estado sólido.

Estos aparatos funcionan recogiendo el aire para posteriormente analizarlo, usando una pequeña bomba, o por difusión dentro de una cámara. Tienen un circuito eléctrico que permite el cálculo de la integración de la concentración de radón para períodos específicos, producen informes resumidos y pueden grabar los resultados en la resolución temporal deseada.

### 1.1.3 El radón, ¿por qué estudiarlo?

Los efectos del radón en la salud pública, han sido investigados durante décadas. Sus comienzos de las investigaciones se centraron en los mineros que estaban expuestos a altas concentraciones de radón, sin embargo, alrededor de los años 80, se empezaron a estudiar las dosis de radón que se encontraban en las casas, debido al suelo y los materiales de construcción, ya que este elemento tiende a concentrase en espacios cerrados.

La filtración del gas a través de los suelos es una de las fuentes más importantes de radiación natural, por esta razón, el radón es uno de los mayores contribuidores a las dosis de radiación ionizantes naturales recibidas por la población. Según estudios epidemiológicos, el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón en la población después del tabaco<sup>. [3]</sup>

Algunos estudios realizados en Europa, Norteamérica y Asia muestran que el riesgo de contraer cáncer de pulmón crece proporcionalmente con la exposición al radón, pero se desconoce el umbral por debajo del cual la exposición a este gas no tiene riesgo.

El proceso que sigue el radón en nuestro cuerpo es el siguiente: el gas es inhalado, y las partículas alfa densamente ionizadas son emitidas por los descendientes del radón de vida corta (218Po y 214Po) y éstas pueden interactuar con el tejido biológico en los pulmones y dañar el ADN. El riesgo viene porque una sola partícula alfa puede causar un daño importante en una célula y crear alguna mutación en el ADN. Por eso se desconoce el umbral mínimo de exposición, ya que el daño puede venir de una sola partícula alfa.

#### 1.2 Trazas nucleares

Se denomina traza nuclear en sólido, al paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de los materiales, que crean patrones finos de daño intenso, a escala atómica <sup>[4]</sup>. Estos daños producidos por las partículas son huellas estables que quedan registradas en los detectores y por tanto se pueden observar y estudiar tras un revelado químico.

### 1.2.1 ¿Cómo se forman las trazas?

Existen distintos modelos atómicos para explicar el proceso que tiene lugar en la formación de trazas nucleares a nivel atómico. Entre ellos destacan, punta de explosión iónica, pérdida total de energía y perdida de energía restringida.<sup>[5]</sup>

*Punta de explosión iónica*. Este modelo explica que la formación de la traza viene dada a partir de los desplazamientos atómicos en el material detector que son producidos por ionizaciones primarias.

*Pérdida total de energía.* Este modelo explica que la formación de la trazas se produce a partir de la pérdida de energía total producida por las ionizaciones secundarias en la vecindad de la trayectoria de la partícula.

*Pérdida de energía restringida.* Este modelo explica que la formación de trazas viene de la pérdida parcial de energía producida por las ionizaciones secundarias.

### 1.2.2 ¿Cómo analizar las trazas?

La interacción de las partículas alfa, producidas por el radón y sus descendientes, con un detector produce la ruptura interna de su estructura molecular a lo largo de su trayectoria. Esta acción no se puede observar sin un revelado químico del detector. Este revelado nos muestra la zona dañada por la partícula, lo que se denomina traza. Su forma es parecida a un cono con su eje situado en la trayectoria de la partícula y puede observarse visualmente a nivel microscópico.<sup>[5]</sup>



Figura 2. Trazas nucleares con diferentes ángulos de incidencia, con su proyección correspondiente.<sup>[5]</sup>

En la *figura 2* se representan gráficamente los *"conos"* que forman las partículas al incidir en el detector. Los principales parámetros que representan estas figuras son:

 $\boldsymbol{\delta}$  ángulo del cono de la traza

h espesor del detector eliminado por la disolución en un tiempo t

O ángulo de incidencia de la partícula

**D** y **d** son eje mayor y menor de la traza, respectivamente.

Como observamos en la *figura 2*, dependiendo del ángulo de incidencia obtenemos una proyección u otra. La proyección sobre el plano del cono es el resultado que se obtiene tras el revelado químico del detector y, por tanto, el material de estudio que tenemos para la lectura de trazas. Por ese motivo uno de los parámetros geométricos a estudiar para analizar el tipo de trazas es la redondez. Cuanto mayor sea la redondez, o sea, más redonda sea la traza, más perpendicular ha incidido la partícula sobre el detector.

Los parámetros que se han utilizado para analizar las trazas han sido la escala de grises y la redondez de la proyección de la traza.

La elección de la **escala de grises** consiste en eliminar todo aquello de la imagen que pudiese influir en el contorno de las trazas y por tanto dar lugar a unos resultados erróneos. Por esta razón, la función de este parámetro es obtener una imagen en blanco y negro, siendo en este caso el blanco las trazas y el negro el fondo.

Una vez aplicado el primer parámetro en la imagen, analizamos el siguiente parámetro que es la redondez. La **redondez** se calcula mediante la siguiente ecuación (el cálculo lo hace el programa de manera automática),

$$rdd = \frac{4\pi A_t}{p^2} \tag{1}$$

Donde *rdd* es la redondez,  $A_t$  el área de la traza y p el perímetro de la traza.

El resultado da un valor entre 0 y 1, siendo un objeto más redondo cuanto mayor sea el valor, llegando a ser un círculo perfecto en el 1. Como tanto el área, como el perímetro son aproximaciones del programa, puede ocurrir que algunas trazas resulten con una redondez superior a 1.

Después de realizar la separación del fondo de la imagen mediante la escala de grises y el análisis de la redondez, obtenemos como resultado el número total de trazas de nuestra imagen.

# 2. Instrumentación

En este apartado se habla de los diferentes materiales que se han utilizado para el desarrollo de este trabajo, así como de algunos de los procesos de obtención de datos, como el sistema de revelado y la cámara de radón.

### 2.1 Detector CR-39

Para poder medir la radiación alfa emitida por el radón y sus descendientes, que hay en una atmósfera determinada, es necesario un aparato en el cual las trayectorias que realizan las partículas, al interactuar con la superficie del detector, queden inscritas en él. Por ese motivo se utilizan detectores de partículas alfa, que en este trabajo será el detector sólido orgánico CR-39.



Figura 3. Detector CR-39

El detector CR-39 es un sólido orgánico, polialildiglicol carbonato (C12 H18 O7), que se utiliza como detector de trazas producidas por partículas alfa, ya que presenta una alta homogeneidad e isotropía, una alta transparencia y uniformidad óptica. Además es muy sensible a la radiación alfa, y muy poco sensible a la humedad, temperatura y radiación beta y gamma.<sup>[5]</sup>

#### 2.2 Software IMAGETOOL

UTHSCSA ImageTool es un procesador de imágenes gratuito para Microsoft. Este programa puede adquirir, mostrar, corregir, analizar, tratar, comprimir, guardar e imprimir tanto en escala de grises como en color imágenes de 24 bits.

Las funciones de análisis de imagen que proporciona el programa incluyen un análisis dimensional (distancia, ángulo, perímetro y área) y medida de escala de grises (el punto, línea e histograma de área con la estadística)<sup>[6]</sup>.

También tiene funciones de procesamiento de imágenes estándar como la manipulación de contraste o detección de borde de objetos.

Estas funciones han sido aplicadas para el análisis de imágenes médicas, como por ejemplo el conteo de células. Pero en este trabajo, se ha empleado para el análisis y conteo de trazas nucleares, empleando las funciones de análisis de imagen que proporciona el programa.

#### 2.3 Sistema de revelado

El detector, en este caso del tipo CR-39, es colocado en el lugar en el que se quiere analizar la concentración de radón. Puede ser radiación natural para mediciones ambientales, o bien, ser expuesto a radiaciones ionizantes en condiciones específicas para realizar, por ejemplo, una calibración.

Este tipo de detector es muy sensible a la radiación alfa, por eso es posible medir las partículas alfa que son emitidas por el radón y sus descendientes durante un periodo de tiempo sin tener que preocuparnos de la radiación beta, gamma o rayos X ya que este tipo de detector, para exposiciones no muy altas, es ciego para dichas radiaciones. Sin embargo, si hay una alta exposición a este tipo de radiaciones (beta, gamma o rayos X) es posible que interfiera en nuestra medida.

En general las marcas que obtengamos en el detector serán debidas únicamente a radiación ionizante de las partículas alfa emitidas por el radón y sus descendientes. Estas marcas quedan impresas en el detector hasta que se realice un revelado químico.

Este revelado realiza un desgaste superficial, siendo más profundo en las zonas donde las partículas han incidido, y creado una especie de *cono* a lo largo de la trayectoria de la partícula incidente, la *traza.* 

El proceso comienza cuando los detectores son colocados en los portadetectores, uno a uno, siendo un conjunto de doce detectores posibles en cada uno. Una vez ocupados todos los porta-detectores se colocan en la tapa del equipo, el que se utiliza para este proceso se llama *Radobath*.<sup>[7]</sup>



Figura 4. Imagen del dispositivo de revelado químico, con el Radobath, el conjunto de porta detectores y el lote de detectores a revelar.

• Preparación de la solución

Se prepara un baño de revelado compuesto por una solución de NaOH en agua destilada, 1 kg de NaOH en 4 litros de agua destilada, se programa para que la mezcla llegue a una temperatura dada (90±1°C). Cuando la solución está preparada y a la temperatura deseada, se introducen los detectores y se programa el tiempo deseado.

Este último paso depende del tipo de detectores con que se está midiendo, ya que el tiempo de revelado puede variar de entre tres y cuatro horas, no obstante el valor del tiempo es dado por el fabricante de los detectores.

#### • Neutralización

Finalizado el revelado se retira la mezcla y se selecciona el programa de neutralización. En este paso se emplea una disolución que contiene agua destilada y ácido acético glacial puro, 135ml de agua con 35ml de ácido. Esta última mezcla se introduce en 3.8 litros de agua destilada, una vez mezclado todo, se introduce en el equipo.

Este paso es muy importante ya que se realiza para frenar el ataque químico que han sufrido los detectores con la primera mezcla.

• Lavado

Cuando termina el proceso de neutralización, se elimina el líquido y se vuelve a introducir otros 4 litros de agua destilada para retirar todo tipo de líquido que pudiese quedar en el equipo. Se dejan los detectores durante unos minutos, mientras se realizan movimientos circulares con los detectores dentro del líquido.

Terminado el lavado de los detectores, se retiran del baño de revelado y se aclaran con agua destilada. Finalmente se dejan secar al aire cubriéndolos para evitar cualquier daño.

# 2.4 Obtención de imágenes

Los detectores se introducen en un sistema analizador de imágenes llamado Radometer, después de haber sido revelados. Este dispositivo posee un sistema óptico que permite visualizar las trazas de cada detector y contarlas de forma automática. El sistema escanea de forma automática los detectores utilizando una cámara CCD con una ampliación de 100x. El sistema separa cada detector en nueve imágenes, con un área analizado en total de 71.89mm<sup>2</sup>.<sup>[7]</sup>

El área que se analiza con este sistema es diferente al área total del detector. Esto es debido a que el detector contiene en un lado una numeración que indica de que tipo es y qué orden tiene. El sistema automáticamente no visualiza ese lado. Por esa razón el área estudiada es diferente a la real.

### 2.5 Lectura y caracterización de la traza

El análisis de los detectores es idéntico entre Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria (LaRUC) y el método a estudiar. La diferencia se centra en la lectura y caracterización de las trazas.

En este trabajo, una vez obtenidas las imágenes de los detectores, se utiliza el software, UTHSCSA ImageTool. Este programa se utiliza para el conteo de células, pero en este trabajo se ha utilizado para la determinación de trazas nucleares.

Cada imagen es analizada individualmente utilizando los mismos mecanismos y parámetros. Los parámetros principales para determinar una traza son el tono de grises y la redondez. A continuación se muestra el análisis de imagen y la selección de objetos.

• Análisis de imagen

En este primer paso se transforma la imagen original en una imagen binaria. Para ello, se transforma la imagen original (*figura 5*) en una imagen en tonos grises la cual, posteriormente, se hace binaria.



Figura 5. Imagen obtenida del Radometer de un detector cualquiera.

La binarización de la imagen se lleva a cabo a partir de un umbral seleccionado, este umbral es el mismo para todas las imágenes.

Para elegir el umbral, necesitamos analizar el histograma de la imagen original. En este histograma se contemplan tres partes, las cuales corresponden a diferentes características de la imagen.

- La zona de tonos claros, entre 200 y 255, corresponde al fondo transparente del detector y a los bordes de las trazas.
- La zona intermedia corresponde a los tonos medios, entre 70 y 200, aquí se manifiesta los objetos no transparentes y los defectos que pueda tener el detector.
- La zona de los tonos oscuros, entre 0 y 70, indica la calidad de iluminación que ha tenido el detector durante su análisis.

Para localizar las trazas en la nueva imagen binaria se ha decidido utilizar un umbral de 70-250. Donde se eliminan los tonos claros del fondo, que son los correspondientes a 250 y 255, para obtener un contorno de objetos encontrados más determinado. Los tonos más oscuros del 0 al 70 son los correspondientes a la iluminación del detector y fondo de la imagen.

Una vez realizado el umbral de grises, se obtiene una imagen que ha sustituido los tonos grises por dos valores correspondientes al blanco y negro. El blanco indica los objetos encontrados en la imagen y el negro al resto.

A partir de este punto, la imagen es binaria y ya se pueden contabilizar y clasificar los objetos encontrados en la misma.



Figura 6. Histograma e imagen binaria entre 70-250, fondo negro y objetos en blanco.

#### • Selección de objetos

Como se observa en la *figura 7*, el programa identifica toda clase de objetos encontrados con el umbral que se ha impuesto, marcando su contorno de color rojo y contándolos. Pero no todos los objetos identificados son trazas. Algunos pueden ser burbujas creadas durante el revelado químico, motas de polvo o simplemente daños externos que haya sufrido el detector durante su manipulación.

Una vez contados los objetos de la imagen, el programa realiza la clasificación de los objetos encontrados asignándoles un color diferente para cada valor de un parámetro dado (*figura 8*). Esta clasificación puede realizarse con parámetros directos como área, perímetro, eje menor etc. O indirectos como la redondez, elongación etc. En este caso la clasificación se ha hecho mediante el parámetro indirecto de la redondez.

Para analizar la redondez, el primer paso que hay que realizar es detectar y contabilizar los objetos de la imagen. El programa está diseñado para detectar objetos con un área determinada, esto ha sido modificado para que los objetos seleccionados sean de un tamaño superior a 200 pixeles. Esta decisión se ha llevado a cabo mediante pruebas de ensayo-error con el programa, hasta llegar a la conclusión que el valor de detección de trazas debería ser el que finalmente ha sido escogido.



Figura 7. Selección y conteo de objetos.

Cuando la contabilización de objetos ha finalizado, se clasifican mediante su redondez, con el criterio de la ecuación (1) usado automáticamente por el programa. En este punto se obtiene una clasificación con un intervalo impuesto de 0.1 desde 0.4 hasta 1.3. (*Figura 8*).

Como se puede observar en la *figura 8* los objetos contados no son todos trazas. Vemos que por ejemplo lo objetos rojos tienen una forma amorfa, esto es porque son motas de polvo. Otro tipo de anomalías son los objetos rosas, que se observa que son trazas pero están superpuestas, por lo tanto tampoco se contabilizan.

El análisis según el color y el análisis numérico, que nos proporciona el programa, ayudará para el análisis de variabilidad, en él se escogerá el intervalo para la elección final de trazas localizadas en la imagen.



🕮 Results				
	Value Range	Count	Mean Value	Std. Dev 🛛 🖈
Mean		17,86	0,50	0,04
Std. Dev.		23,82	0,38	0,05
4	- 0.40	9	0,27	0,08
5	0.40 - 0.50	3	0,45	0,01
6	0.50 - 0.60	3	0,57	0,05
7	0.60 - 0.70	8	0,64	0,02
8	0.70 - 0.80	25	0,76	0,03
9	0.80 - 0.90	39	0,85	0,03
10	0.90 - 1.00	36	0,94	0,02
11	1.00 - 1.10	2	1,01	0,01
12	1.10 - 1.20	0	0,00	0,00
13	1.20 - 1.30	0	0,00	0,00
14	1.30 -	0	0,00	0,00
•	·			•

Figura 8. Imagen con la clasificación del parámetro de la redondez en intervalos de 0.1.

# 2.6 Cámara de radón

La cámara de radón está formada por los siguientes elementos: un recinto cúbico herméticamente cerrado cuyas dimensiones son (1m x 1m x 1m) y unas paredes construidas de acero (imagen de la izquierda). Y en su interior, monitores de medida continua de radón junto con las fuentes radiactivas de actividad conocida (imagen de la derecha).



Figura 9. Imagen externa e interna de la cámara de radón.

Para exponer los detectores a una fuente de radiación conocida es necesario el uso de la cámara de radón, donde se introducen una serie de detectores acompañados por unos monitores de radón en continuo, radón Scout y AlphaGuard. El objetivo de introducir estos aparatos dentro de la cámara es que se usan como referencia ya que están calibrados en un laboratorio de referencia a un patrón primario, y además monitorizan en todo momento la concentración de radón que hay presente en el interior de la cámara.

Los detectores se dejan expuestos durante un tiempo de 10 días a la concentración de radón que se ha seleccionado. Como la concentración de la fuente es conocida, y tenemos una gráfica dada por los monitores que se encuentran en el interior de la cámara, podemos saber en todo momento a que exposición están expuestos nuestros detectores si integramos el área bajo la curva de la gráfica.

A continuación, en la *figura 10*, se muestra un ejemplo de la monitorización de un ensayo dentro de la cámara de radón con el monitor de tipo AlphaGuard.

Viene representada la concentración que ha estado presente en la cámara, frente al tiempo en días que ha durado el ensayo, además se ha marcado la línea de tendencia ya que la señal obtenida por el monitor tiene mucho ruido.



Monitor (ALPHA GUARD)

Figura 10. Representación gráfica de la concentración de radón presente dentro de la cámara de radón con el monitor ALPHAGUARD, con la línea de tendencia sobrepuesta en negro.

# 3. Métodos de análisis

### 3.1 Medida de fondo

Debido a que la técnica de detección de trazas es un método experimental, es necesario conocer el valor de todos los parámetros que la afectan. Uno de ellos es el fondo, que tiene dos componentes, fondo intrínseco y fondo natural. El primero está asociado al tipo de material utilizado, suele ser constante y bajo, es el que proporciona el fabricante y se verifica en el laboratorio por control de calidad. El segundo es el debido a la radiación procedente de emisiones del radón en el ambiente, y varía con el tiempo de exposición y las condiciones ambientales.

Todos los lotes de detectores vienen con un valor de fondo estándar que proviene del fabricante, aun así el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria realiza un control de calidad, calculando el fondo de un conjunto de detectores de cada lote. Éste control de calidad se realiza analizando unos detectores, que han viajado con los detectores expuestos, pero que no han sido sometidos a radiación.

En este apartado se ha querido innovar con una manera diferente de medir el fondo. En este caso se ha colocado una lámina de aluminio, la cual ocupa la mitad del detector, y se ha contabilizado el número de trazas que se han localizado en la zona ocupada por la lámina de aluminio, comparándolo después con el valor del fondo dado por el fabricante.

A continuación se muestra una de las imágenes obtenidas en el análisis de medida del fondo. A la izquierda la imagen real obtenida por el radiometer, y a la derecha la imagen ya filtrada con el software y con las trazas nucleares localizadas, según los criterios de selección escogidos.





Figura 11. Fotografías correspondiente a 1/9 del detector con aluminio. A la izquierda la imagen real y a la derecha la misma imagen con las trazas nucleares localizadas.

#### 3.2 Análisis de linealidad

Para comprobar la linealidad del método, se han comparado los resultados obtenidos con el software y los de referencia dados por el fabricante. La respuesta lineal se lleva a cabo si aumenta o disminuye el número de trazas nucleares detectadas por el software junto con el sistema de referencia.

Para llevar a cabo el análisis de linealidad se ha utilizado una serie de imágenes de detectores de referencia, este conjunto de detectores se llama "Golden slide". Es un grupo de detectores que se emplean para verificar el estado del aparato de detección de imágenes y conteo de trazas (radiometer).

Debido a que el área analizada por el radiometer es diferente al que se analiza con el software ImageTool, el análisis de linealidad se realiza con la densidad de trazas obtenida por cada método, en vez de número de trazas.

#### 3.3 Análisis de variabilidad

El análisis de variabilidad consiste en analizar el cambio que sufren los resultados obtenidos del conteo de trazas, cuando se varía algún parámetro. En este caso los dos parámetros que se han utilizado para el análisis de trazas nucleares han sido el tono de grises y la redondez.

Únicamente se ha observado la diferencia de cuentas de trazas para diferentes valores de redondez, debido a que el otro parámetro (tono de grises) debe de estar fijado previamente. El umbral de grises se ha fijado en un intervalo de 70-250, como se ha mencionado en el apartado 2.5.

Finalmente se ha obtenido un cuadro de clasificación de objetos encontrados por el software, según la redondez de cada uno. Este proceso se ha llevado a cabo mediante el análisis obtenido por el programa, donde se han sumado todos los objetos de la misma redondez encontrados por el software y además se han visualizado.

El programa muestra una imagen con la clasificación deseada, y en este caso los objetos con diferente valor de redondez son visualizados con diferentes colores (figura 8). Esto hace que se pueda identificar el valor de redondez con el objeto de la imagen, y por ejemplo poder conocer si la imagen tiene muchas anomalías o ruido.

#### 3.4 Calibración

La determinación de las trazas es fundamentalmente el trabajo de este proyecto, pero la información proporcionada únicamente por el número de trazas es insuficiente. Lo que realmente es necesario conocer es la exposición a la que ha estado sometido el detector analizado. Para ello se realiza la lectura del número de trazas de las imágenes dadas por el microscopio óptico y para poder obtener la exposición, es necesario realizar una calibración del sistema.

La calibración del sistema que hemos realizado consiste en el estudio de un número de detectores, los cuales han estado expuestos, en la cámara de radón, a una fuente radiactiva cuya concentración de radón tiene un valor conocido. Una vez han sido expuestos los detectores, se realiza el revelado químico y se introducen en el microscopio óptico (*radiometer*) para obtener las imágenes.

Cuando se han obtenido las imágenes se procede al análisis de trazas (ImageTool) utilizando los criterios obtenido del análisis de variabilidad. Tono de grises, con un umbral de 70-250, y redondez, escogiendo únicamente las trazas con redondez entre 0.9-1.1. Después se hace el cálculo de densidad de trazas, en este paso se emplea la ecuación de densidad ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{t_z}{A_a} \tag{2}$$

Donde  $t_z$  es el número de trazas, y  $A_a$  el valor del área del detector analizada, medido en mm<sup>2</sup>.

El área del detector analizada para el cálculo de la densidad, es diferente al área real del detector. Ya que el aparato del cual obtenemos las imágenes, corta la parte superior del detector donde viene la numeración del mismo. Por tanto el área del detector que es analizada tiene un valor de 71.89 mm<sup>2</sup>, en vez de, el área real que es de 100mm<sup>2</sup>.

Una vez obtenida la densidad de trazas para los detectores, se calcula el factor de calibración. Para el cálculo del factor de calibración (FC) se emplea la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{Exp}{\rho} \tag{3}$$

Donde *Exp* es la exposición medida en kBqm<sup>-3</sup>h y  $\rho$  la densidad de trazas.

Para obtener el factor de calibración se ha representado gráficamente la densidad de trazas frente al valor de las dos exposiciones de la fuente de concentración conocida. La ecuación de la gráfica una vez linealizada, es el factor de calibración de nuestro sistema.

#### 3.5 Intercomparaciones

En este apartado se han realizado unos ejercicios de intercomparación, esto quiere decir, que se han comparado los resultados obtenidos por el método, con unos laboratorios de referencia internacionales que son HPA (Reino Unido), BFS (Alemania) y NIRS (Japón). Este paso es esencial para saber si este método es válido, ya que es un proceso que tienen que realizar todos los laboratorios que analizan radiaciones.

Cada laboratorio envía sus detectores a estos laboratorios de referencia. Estos detectores se exponen en unas cámaras de radón con fuentes de radiación de patrón primario, de valor conocido para los laboratorios de referencia y desconocido para el resto. Los detectores una vez expuestos se devuelven a los laboratorios de partida y se analizan con los métodos de análisis y conteo de trazas nucleares de cada uno. Finalmente se envían los resultados a los laboratorios de referencia y según sus criterios de aprobación, aprueban o no el sistema empleado por cada laboratorio.

En este trabajo han sido analizadas las imágenes obtenidas de los ejercicios de intercomparación que ha realizado el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria y posteriormente, los resultados obtenidos con el software han sido estudiados con los criterios de aceptación del laboratorio de referencia NIRS. El criterio que nos ofrece NIRS para verificar si nuestro método es correcto para leer trazas nucleares, se detalla a continuación:

Los parámetros que nos permiten la comparación entre los valores obtenidos y los del laboratorio de referencia vienen dados por el parámetro MES que combina la exactitud de la medida (PD) y la precisión de las mismas (PER).<sup>[8]</sup> Este parámetro se define como,

$$MES [\%] = \sqrt{PD^2 + PER^2} \tag{4}$$

Donde *PD* es el parámetro que nos da la exactitud de los resultados y *PER* el porcentaje de precisión del error, que se definen de la siguiente manera,

$$PD[\%] = \frac{c_{Lab} - c_{Ref}}{c_{Ref}} x \ 100 \tag{5}$$

$$PER[\%] = \frac{u_{lab}}{c_{Ref}} x \ 100 \tag{6}$$

Siendo  $u_{lab}$  la medida de error obtenida con nuestro sistema,  $c_{Ref}$  la exposición de referencia dada y  $c_{lab}$  la exposición obtenida con nuestro método.

Teniendo en cuenta el informe internacional de intercomparación para el radón del NIRS, una incertidumbre de las medidas de radón menor al ±30% es aceptable. Aun así los laboratorios se dividen en dos categorías según el parámetro *PD*,

- Categoría I, si es menor a ±20% del valor de referencia
- Categoría II, si se encuentra fuera del rango de ±20%.

#### 3.6 Cálculo de errores

Se han realizado cinco lecturas por cada imagen, de las nueve que se obtienen de cada detector. Para calcular el error de las lecturas realizadas con el software en este trabajo, se ha empleado la ecuación del *error cuadrático medio* <sup>[9]</sup>.

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \tag{7}$$

Donde  $x_i$  corresponde a cada medida realizada,  $\bar{x}$  la media de las medidas y *n* el número de medidas realizadas. Siendo la medida de la lectura para cada detector  $\bar{x} \pm \Delta x$ 

Una vez obtenido el error cuadrático medio de todas las medidas, es necesario estudiar la propagación de errores para calcular el error de exposición.

Si la ecuación del valor de exposición es  $Exp = 58.898 \rho - 121.67$ , obtenida por el factor de calibración, el error de estas medidas es por tanto;

$$\Delta Exp = 58.898 \,\Delta \rho \tag{8}$$

Donde  $\Delta Exp$  es el error de la exposición y  $\Delta p$  es el error de la densidad de trazas.

# 4. Resultados

## 4.1 Medida del fondo

Después de analizar los detectores, con la lámina de aluminio, expuestos a una concentración de radón, se ha descubierto que el valor del fondo es superior al que se utilizaba, tanto por el fabricante como el del factor de calidad del Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria

A continuación se muestran en un diagrama de barras los resultados obtenidos del estudio de tres detectores diferentes. Donde se muestra la medida del fondo de referencia y el obtenido con la medida de densidad de trazas en el aluminio usando el software.



Figura 12. Datos y diagrama donde se representa el fondo medido en densidad de trazas encontrado en tres detectores diferentes comparado con el fondo dado por el fabricante.

En la figura anterior podemos observar que las trazas que se encuentran tras el aluminio crean un fondo superior al valor estándar que se toma de referencia.

### 4.2 Análisis de linealidad

El conjunto de detectores de referencia empleados para el análisis de linealidad (Golden slide) contiene diferentes imágenes de detectores que abarcan un intervalo amplio de exposición, que proporciona unas imágenes que varían desde pocas hasta muchas trazas.

Se ha observado que la densidad de trazas detectada por el nuevo método aumenta y disminuye con respecto a la densidad de trazas de referencia, tanto para escala de grises como para la redondez, esto quiere decir que el método es lineal para ambos parámetros.



Figura 13. Representación gráfica y resultados del análisis de linealidad del método, donde se representa la densidad de trazas contabilizadas por el software frente a las de referencia

### 4.3 Análisis de variabilidad

En la figura siguiente se muestra el número de trazas del grupo de detectores utilizados en el apartado anterior (Golden slide), pero esta vez clasificados según su redondez.

Para analizar la redondez, el programa exige previamente fijar un umbral de la tonalidad de grises. Se ha elegido un umbral de grises de 70-250 para todas las imágenes (ver apartado 2.5), y a continuación se ha realizado el análisis de variabilidad del parámetro de la redondez.



Figura 14. Datos e histograma del análisis de variabilidad.

Se observa que el máximo se encuentra en el 1, como era de esperar, y corresponde al círculo perfecto, esto quiere decir que la mayoría de las partículas colisionan perpendicularmente con la superficie del detector.

Además hay un cierto número de trazas localizadas con una redondez de 1.1 esto es debido a que el cálculo de la redondez, viene de parámetros con valores estimados (área y perímetro) y puede dar lugar a valores superiores a la unidad.

Para realizar la clasificación de las trazas se ha utilizado el histograma de la *figura 14* y la visualización de las imágenes con el programa (*figura 8*). Esto nos lleva a la clasificación según la redondez de las trazas de las imágenes.

Rango Redondez	Observación
<0.4	Anomalía; mota de polvo, defecto del detector
0.5	
0.6	Trazas solapadas
0.7	
0.8	Traza abierta con mucho ángulo
0.9	Traza abierta con poco ángulo
1.0	Traza cerrada
1.1	Traza cerrada
<u>\12</u>	Anomalía: gran defecto del detector, acumulación grande de
>1.2	trazas.

#### Figura 15. Clasificación de trazas según la redondez.

Dentro de la clasificación se han encontrado trazas abiertas, o sea que el contorno que las define no está completamente cerrado. Normalmente esto sucede cuando la partícula ha incidido sobre el detector con un cierto ángulo, cuanto más grande sea ese ángulo, más abierta es la traza.

El problema que se puede dar es que el tamaño de este tipo de trazas puede confundirse con algunas señales de ruido del sistema. Esto añade otra razón más para utilizar el parámetro de la redondez, ya que los objetos de ruido en su mayoría presentan formas irregulares.

Finalmente una vez realizados la clasificación y observado el histograma, deducimos que el criterio para la clasificación de las trazas tiene un rango de redondez de 0.9-1.1. Los objetos dentro de ese rango se considerarán traza, por el contrario los que se encuentren fuera se desecharán como anomalía o ruido.

### 4.4 Calibración

Se ha representado gráficamente la exposición a la que han estado sometidos los detectores analizados, en este caso dos exposiciones, frente a la densidad de trazas que se ha obtenido con el análisis de nuestro sistema según los criterios escogidos. La ecuación, una vez linealizado los resultados, es finalmente el factor de calibración para el sistema.



#### Factor de Calibración

Figura 16. Representación gráfica del factor de calibración.

Finalmente se ha obtenido la ecuación del factor de calibración, donde *Exp* es la exposición y  $\rho$  la densidad de trazas. Esta ecuación sirve para calcular cualquier exposición, ya que teniendo el valor de la densidad de trazas y esta ecuación, el resultado de la exposición de cualquier detector será inmediato.

$$Exp = 58.898 \times \rho - 121.67 \tag{9}$$

#### 4.5 Intercomparaciones

Se han analizado las diferentes imágenes de los detectores de referencia que ha realizado el laboratorio de la UC en sus ejercicios de intercomparación y se ha medido la densidad de trazas utilizando el software y los diferentes criterios de detección de trazas. Empleando la *ecuación 9*, se ha conseguido la exposición a la cual los detectores han sido sometidos.

Como han sido analizados los detectores de los tres laboratorios de referencia internacional, se han clasificado los resultados para cada uno de los laboratorios, con el factor de calibración obtenido y los resultados del software.

Finalmente se ha aplicado, para cada ejercicio de intercomparación, el criterio de aceptación del laboratorio de referencia internacional NIRS.

### 4.5.1 HPA (Health Protection Agency, Reino Unido)

El laboratorio de referencia de Reino Unido, da únicamente un valor de referencia para el ejercicio de intercompación <sup>[10]</sup>. En la gráfica siguiente se ha representado la densidad de trazas obtenida por el software, la línea del factor de calibración y el punto de referencia.

ρ	Exp método	Exp referencia
(trazas/mm <sup>2</sup> )	(KBqm °h)	(KBqm °h)
7.70±0.03	332±1	340



Figura 17. Representación gráfica y datos de los resultados del ejercicio de intercomparación con el laboratorio HPA.

A continuación, se han obtenido los parámetros de análisis de resultados que ofrece el informe del laboratorio NIRS, a partir de los cuales se obtiene la aceptación del sistema.

PD (%)	PER (%)	MES (%)
- 2,48	0.43	2.52

Como el PD es inferior al ±30%, el método es aceptable para esta medida. Además al ser inferior al ±20% nuestro método para este ejercicio es de categoría I.

# 4.5.2 NIRS (National Institute Radiological Science, Japón)

El laboratorio de referencia de Rusia, da dos valores de referencia para el ejercicio de intercomparación <sup>[8]</sup>. En la gráfica siguiente se han representado los valores obtenidos por el software, la línea del factor de calibración y los puntos de referencia.



Figura 18. Representación gráfica y datos de los resultados del ejercicio de intercomparación con el laboratorio NIRS

A continuación, se han obtenido los parámetros de análisis de resultados que ofrece el informe del laboratorio NIRS, a partir de los cuales se obtiene la aceptación del sistema.

PD (%)	PER (%)	MES (%)
- 33.79	1.83	33.84
5.14	0.27	5.15

Para el primer resultado, el PD es superior al ±30% por tanto el método con el software no es aceptable.

Para el segundo resultado, el PD es inferior al ±30%, por tanto es aceptable, además es inferior al ±20% por esta razón es clasificado como categoría I.

#### 4.5.3 BFS (Bundesamt für Strahlenschutz, Alemania)

El laboratorio de referencia de Alemania, da cuatro valores de referencia para el ejercicio de intercomparación <sup>[11]</sup>. En la gráfica siguiente se ha representado los valores obtenidos por el software, la línea del factor de calibración y los puntos de referencia.

ρ (trazas/mm²)	Exp método (KBqm <sup>-3</sup> h)	Exp referencia (KBqm <sup>-3</sup> h)
5.39±0.02	196±1	206
42.29±0.04	2369±3	2445
9.11±0.05	415±3	403
27.54±0.05	1501±3	1477



Figura 19. Representación gráfica y datos de los resultados del ejercicio de intercomparación con el laboratorio BFS

A continuación, se han obtenido los parámetros de análisis de resultados que ofrece el informe del laboratorio NIRS, a partir de los cuales se obtiene la aceptación del sistema.

PD (%)	PER (%)	MES (%)
-4.83	0.64	4.87
- 3,11	0.10	3.11
2.88	0.79	2.99
1,59	0.18	1.60

Para todos los resultados, el PD es inferior a ±30% incluso al ±20%, por tanto nuestros resultados para este ejercicios son aceptables y además de categoría I.

# 5. Conclusiones

Se ha logrado modificar un software, cuyo uso estaba en el ámbito de la medicina, para la lectura y conteo de trazas nucleares. Para ello se han dado diferentes pasos para la puesta a punto del sistema. Entre ellos se ha necesitado realizar una serie de análisis para obtener los criterios con los cuales poder utilizar el software para leer y contar trazas.

El análisis de linealidad, muestra la respuesta que da el software a la hora de analizar una serie de detectores de referencia con el número de trazas conocido. Se ha demostrado cómo el programa responde de manera lineal al método de conteo de trazas *figura 12* para los dos parámetros de análisis de trazas nucleares, el correspondiente al color (tonalidad de grises) y el parámetro geométrico (redondez).

Con el análisis de variabilidad se ha obtenido una clasificación de los objetos encontrados por el software y un criterio de selección, según la redondez. En esta clasificación se ha indicado lo que es cada objeto detectado dependiendo de la redondez del mismo. Esto a su vez ha servido para poder determinar el segundo criterio para el conteo de trazas, siendo el intervalo de conteo, según la redondez, de objetos encontrados de 0.9-1.1. Dentro de ese rango se considera traza, por el contrario los objetos que se encuentren fuera se desecharán como anomalía o ruido.

Una vez que se ha verificado la linealidad del sistema y se ha establecido un criterio para la lectura y conteo de trazas nucleares, el sistema ha sido calibrado para poder obtener un factor de calibración que realice la conversión de la densidad de trazas contabilizadas por el software a una valor de la exposición a que ha estado sometido el detector analizado. La calibración del sistema lleva a una ecuación que corresponde al factor de calibración Exp =  $58.898 \rho - 121.67$ .

Después de llevar a cabo la puesta a punto del sistema, se han realizado una serie de ejercicios de intercomparación y se ha empleado el criterio de aceptación que utiliza uno de los laboratorios de referencia internacional. Los resultados obtenidos con el sistema para cada ejercicio, han entrado dentro del intervalo de aprobación según el laboratorio NIRS, a excepción de un solo valor correspondiente a un número de trazas muy bajo. Esto último es debido a que el valor de la exposición al que se encuentra el detector está fuera del rango de validez del factor de calibración. Finalmente, una vez realizado la puesta a punto del sistema y la aceptación del método con los ejercicios de intercomparación, se ha medido el fondo con un método innovador. Se ha demostrado que el fondo medido tras una lámina de aluminio es mayor que el fondo estándar propuesto por el fabricante y también superior al medido por el laboratorio como control de calidad.

Como resultado de este trabajo, se ha obtenido un nuevo sistema de lectura de trazas nucleares que cumple las condiciones necesarias para ser considerado como instrumento de lectura y medida de exposición al gas radón. Y además un nuevo método de medida de fondo, utilizando láminas de aluminio.

# 6. Bibliografía

- [1] Quindós Poncela, L.S. *Radón, un gas radiactivo de origen natural en su casa.* Santander: Universidad de Cantabria
- [2] Universidad de Granada. Tema 7: Dosimetría y Protección Radiológica.

http://www.ugr.es/~amaro/radiactividad/tema7/img81.gif .

[Consulta: el 28 de diciembre de 2014]

- [3] World Health Organization (WHO) (2009), *Who handbook on indoor radon: a public health perspective.*
- [4] Espinosa, G. (1994). *Trazas nucleares en sólidos.* México: Instituto de Física, UNAM.
- [5] Suarez Navarro, M.J. (2002). Caracterización radiológica de emisores alfa en residuos radiactivos de media y baja actividad, procedentes de centrales nucleares, mediante la técnica alternativa de detección de trazas. Tesis. Universidad politécnica de Madrid.
- [6] University of Texas Health Science Center at San Antonio, Texas. UTHSCSA ImageTool program
- [7] Sainz Fernández, C. (2014), determinación de la concentración de gas radón en aire. Instrucción. Laboratorio de radiactividad ambiental, Universidad de Cantabria.
- [8] Janik, M. and Yonehara, H. (2014), Technical report on the international intercomparisons for integrating Radon (5<sup>th</sup>) & Thoron (4<sup>th</sup>) detectors with the NIRS Radon/Thoron chambers. Japan. National Institute of Radiological Sciences.
- [9] Universidad Politécnica de Madrid, Errores.

#### http://www-

app.etsit.upm.es/departamentos/fis/asignaturas/Teoria%20de%20Errores% 20con%20ejemplos.pdf

[Consulta: el 4 de marzo de 2015]

- [10] Howarth, C B. and Miles, J C H. (2008), Validation Scheme for Organisations Making Measurements of Radon in Dwellings. Oxfordshire, United Kingdom. Health Protection Agency
- [11] Foerster, E. et al. (2014) Messgeräte zur Bestimmung der Radon-222-Aktivitätskonzentration oder der Radon-222-exposition Vergleichsprüfung 2014. Fachbereich, Strahlenschutz und umwelt. Bundesamt für Strahlenschutz