

Capítulo 3

Equipos y métodos utilizados

3.1. Laboratorio ESCRA

Desde marzo de 1994, el *Institut de Tècniques Energètiques* (INTE) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) dispone de un laboratorio, denominado Laboratorio ESCRA, destinado a la realización de estudios sobre los campos de radiación ionizante ambiental y su relación con diversos parámetros radiológicos y meteorológicos.

El laboratorio dispone de una estación radiológico-meteorológica provista de diversos sensores radiológicos y meteorológicos. Los sensores meteorológicos consisten en un termómetro, un higrómetro, un anemómetro, una veleta, un piranómetro, un pluviómetro, y un barómetro aneroide. Las variables radiológicas medidas en la actualidad son: 1) tasa de dosis ambiental, para lo que se emplea una cámara de ionización, un detector Geiger-Müller, y un contador proporcional; 2) concentración de emisores alfa, emisores beta, y la concentración de radón del aire exterior; 3) concentración de descendientes del radón en el agua de lluvia y otros radionucleidos emisores de radiación gamma de vida corta, mediante un equipo diseñado y construido para la realización de esta tesis que se describe más adelante; 4) dosis acumulada, mediante dosímetros TLD.

La estación dispone además de equipos destinados a la adquisición y tratamiento de los datos recogidos por los sensores.

En este apartado se describe el funcionamiento de la estación y de los equipos empleados para la obtención de los datos radiológicos y meteorológicos del entorno del Campus Nord de la UPC en la ciudad de Barcelona.

3.1.1. Descripción de la estación meteorológico-radiológica del laboratorio ESCRA. Estación ESCRA

La estación de control de la radiación ambiental (en adelante Estación ESCRA), está situada en Barcelona, en el Campus Nord de la UPC. Sus coordenadas son x: 425800, y: 4582450 y se encuentra a 110 metros respecto del nivel del mar. En el sector norte-noroeste respecto de la estación se encuentra el macizo montañoso de Collserola con una altura media de unos 400 metros, siendo la cima más alta la montaña del Tibidabo con una altura de 512 metros. En el sector sur-sureste se encuentra el mar Mediterráneo (ver figura 3.1). La estación ESCRA está situada en la azotea de un edificio del Campus Nord de la UPC llamado módulo B4. Los edificios más cercanos se encuentran a 14 metros, no siendo rebasada en altura por ninguno de ellos.

La estación ESCRA está alojada en una caseta de 6 metros de anchura por 6 metros de longitud y 3 metros de altura. En su interior dispone de dos dependencias con una superficie útil total de 32 m², donde se ubican los equipos de tratamiento de datos. También dispone de una azotea de 36 m² de superficie a la que se accede mediante una escalera situada en el exterior de la estación. Se encuentra a 3 metros del suelo de la azotea del módulo B4 y a 114 metros del nivel del mar. La azotea se emplea para la ubicación de los sensores radiológicos y meteorológicos que se encuentran instalados en una torre metálica de acero inoxidable de 3 metros de altura.

Los datos registrados por los equipos radiológicos y meteorológicos son almacenados en continuo en soporte magnético en un formato especialmente diseñado para facilitar el posterior tratamiento informático de la información recogida.

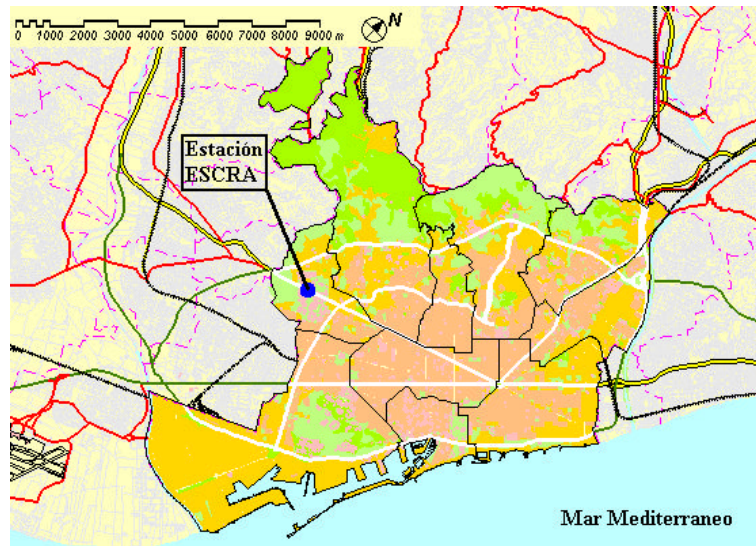


Figura 3.1: Ubicación de la Estación ESCRA en la ciudad de Barcelona

3.1.2. Equipos meteorológicos

Las variables meteorológicas que registra la estación ESCRA son la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presión atmosférica, la radiación solar, la dirección y velocidad del viento, y la tasa de lluvia. Para ello la estación dispone de un conjunto de sensores meteorológicos

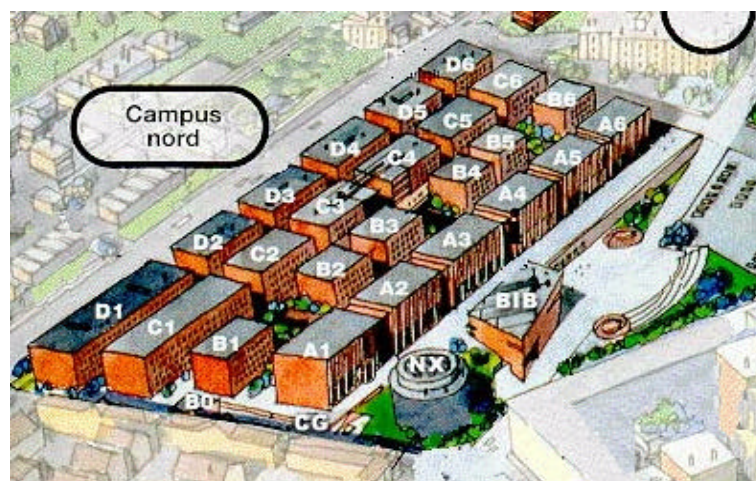


Figura 3.2: Vista del Campus Nord de la UPC en Barcelona. La estación ESCRA se encuentra en la azotea del módulo B4.

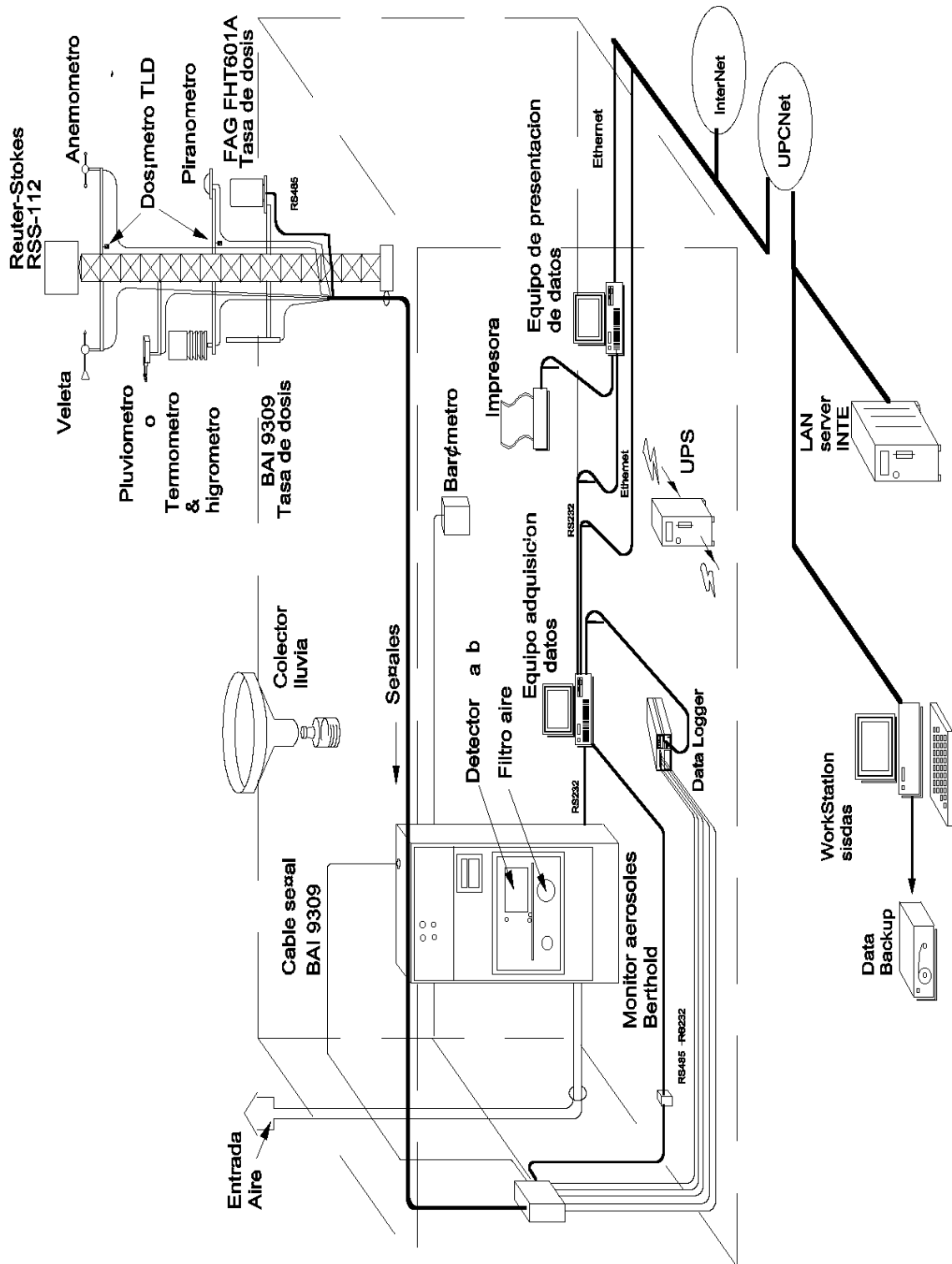


Figura 3.3: Estación ESCRA y equipos asociados.

que se encuentran en la torre meteorológica de la azotea (ver figura 3.3), excepto el sensor de presión atmosférica que se halla en el interior de la estación.

Las magnitudes meteorológicas físicas se obtienen a partir de las señales eléctricas suministradas por los equipos meteorológicos. Un dispositivo denominado *datalogger* que se describe en el apartado 3.1.8 se encarga de realizar la lectura de las señales eléctricas, y la magnitud física se obtiene mediante la expresión 3.1, donde M representa la magnitud física, E la magnitud eléctrica, y A , B , y C son constantes de proporcionalidad.

$$M(E) = AE^2 + BE + C; \quad (3.1)$$

La señal eléctrica siempre es una resistencia o una tensión. En la tabla 3.1 se muestran los valores de E y los parámetros A , B , y C .

Magnitud M	Unidades (M)	Unidades (E)	A	B	C
Temperatura	°C	Ω	0	1	0
Humedad relativa	%	Ω	0	0.988	0
Presión	hPa	Ω	0	1.074	945
Velocidad del viento	m/s	V	0	17.5	0
Dirección del viento	grados(deg)	Ω	0	0.354	0
Radiación solar	W/m ²	V	0	62472.67	0
Tasa de lluvia	mm/h	V	100	0	0

Cuadro 3.1: Parámetros para la conversión a magnitudes físicas, las magnitudes eléctricas suministradas por las sondas meteorológicas.

A continuación se describen los equipos meteorológicos utilizados en la estación ESCRA. En la tabla 3.2 se indican sus características principales, y en la figura 3.3 se indica su ubicación en la torre meteorológica y en la estación ESCRA.

Temperatura: Termómetro-higrómetro

Este equipo es de la marca Lambrecht, modelo 809 LO-100. Está integrado con un higrómetro que se describe en el siguiente punto. El método empleado para la medida de la temperatura consiste en una resistencia Pt-100. El sensor de temperatura se encuentra a 2 metros del suelo de la azotea, y a 60 cm del eje de la torre.

Humedad relativa: Termómetro-higrómetro

Este equipo es de la marca Lambrecht, modelo 809 LO-100. Tal y como se describe en el punto anterior está integrado con el termómetro. El sensor de humedad está constituido por fibras PERNIX que experimentan cambios en su longitud en función de las variaciones de humedad relativa ambiental. El sensor de humedad se encuentra en la misma posición que el sensor de temperatura, a 2 metros del suelo de la azotea, y a 60 cm del eje de la torre.

Dirección del viento: Veleta

Para la medida de la dirección del viento se utiliza una veleta de la marca Lambrecht, modelo 1466 F100. Se encuentra fijada en la parte superior de la torre meteorológica a 3 metros del suelo de la azotea de la estación, frente al anemómetro, a 60 cm del eje de la torre.

Velocidad del viento: Anemómetro

Para la medida de la velocidad del viento se emplea un anemómetro marca Lambrecht, modelo 1467 G4. El anemómetro dispone de tres brazos con una cazoleta semiesférica cada uno. Está instalado en la torre meteorológica, a una altura de 3 metros respecto el suelo de la azotea de la estación ESCRA, a la misma altura que la veleta, y a una distancia de 1.2 metros respecto de ésta última.

Radiación solar: Piranómetro

Para la medida de la radiación solar global, que incluye la radiación directa, la radiación difusa, y la radiación reflejada, se emplea un piranómetro de estrella Dirmhirm, marca Lambrecht, modelo 1610. Este sensor es sensible a la radiación electromagnética cuya longitud de onda se encuentra entre $0,3 \mu\text{m}$ y $3 \mu\text{m}$. El sensor se halla ubicado en la torre meteorológica a 1.7 metros del suelo de la azotea de la estación, y a 60 cm del eje de la torre.

Presión atmosférica: Barómetro aneroide

La presión atmosférica se mide mediante un barómetro aneroide marca Lambrecht, modelo 812 B1000. Está situado en el interior de la estación ESCRA para protegerlo de las inclemencias del tiempo.

Tasa de lluvia: Pluviómetro.

Se emplea un pluviómetro óptico marca Scientific Technology Inc., modelo ORG-105. Su principio de funcionamiento se basa en la medida de la sombra que producen las gotas de lluvia al pasar a través de un haz de radiación infrarroja. Este sensor está ubicado en la torre meteorológica, a 2.7 metros del suelo de la azotea, y a 80 cm del eje de la torre.

Las ventajas de este tipo de dispositivos frente a los pluviómetros de cazoletas basculantes consisten en: 1) el rango de medida es más amplio en los sistemas por haz de infrarrojos; 2) se mide directamente la tasa de lluvia, en lugar del tiempo transcurrido para recoger un cierto volumen de agua; 3) se conoce con gran precisión el instante de inicio y finalización del periodo de lluvia.

Equipo	Marca	Modelo	Rango Medida	Incert.
Termómetro	Lambretch	809 LO-100	-60°C a 70°C	± 0.3 %
Higrómetro	Lambretch	809 LO-100	0 % a 100 %	± 2.5 % (HR)
Anemómetro	Lambretch	1467 G4	0 a 35 m/s	± 0.7 % m/s
Veleta	Lambretch	1466 F100	0° a 360°	± 5 °
Barómetro	Lambretch	812 B1000	945 hPa a 1055 hPa	± 1.65 hPa
Pluviómetro	Lambretch	ORG-105	0.5 mm/h a 1600 mm/h	± 1 %
Piranómetro	Lambretch	1610	0 a 1400 W/m ²	± 21 W/m ²

Cuadro 3.2: Características de los sensores meteorológicos.

Incertidumbre de las medidas meteorológicas

A continuación se describe el método empleado para la determinación de la incertidumbre asociada a las variables meteorológicas registradas. Siguiendo la recomendación de la WECC (Western European Calibration Community), se asume que la letra U corresponde a una incertidumbre igual al doble de la raíz cuadrada de la varianza, σ^2 : $U = 2\sqrt{\sigma^2}$.

Dada una magnitud meteorológica física M se relaciona con su magnitud eléctrica E medida mediante la expresión 3.1. La varianza asociada a M , σ_M^2 se puede obtener a partir de la expresión 3.2.

$$\sigma_M^2 \simeq \sum \left(\frac{\partial M}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2, \quad (3.2)$$

siendo $X_i \equiv E, A, B$, ó C , y $\sigma_{X_i}^2$ su incertidumbre asociada.

Desarrollando la expresión 3.2, se obtiene 3.3

$$\sigma_M^2 \simeq \sigma_A^2 E^4 + 4A^2 E^2 \sigma_E^2 + 4AEB \sigma_E^2 + \sigma_B^2 E^2 + \sigma_E^2 B^2 + \sigma_C^2 \quad (3.3)$$

Agrupando términos en la expresión 3.3, la varianza de la magnitud física meteorológica se expresará según 3.7, donde $\sigma_{\text{conversión}}^2$ es la varianza asociada a la conversión de la magnitud eléctrica a física, y $\sigma_{\text{datalogger}}^2$ es la varianza asociada a la medida de la magnitud eléctrica mediante el *datalogger*. El valor de σ_E se obtiene a partir de la resolución suministrada por el fabricante del *datalogger* 3.1.8, empleando la expresión 3.6, y suponiendo que la distribución de probabilidad es equiprobable.

$$\sigma_{\text{conversión}}^2 = \sigma_A^2 E^4 + \sigma_B^2 E^2 + \sigma_C^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\text{datalogger}}^2 = (4A^2 E^2 + 4AEB + B^2) \sigma_E^2. \quad (3.5)$$

$$\sigma_E = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{3}}. \quad (3.6)$$

$$\sigma_M^2 \simeq \sigma_{\text{conversión}}^2 + \sigma_{\text{datalogger}}^2 \quad (3.7)$$

En la tabla 3.3 se indican los valores correspondientes a las incertidumbres asociadas a las variables meteorológicas medidas con los equipos de la estación ESCRA. Estos valores se han obtenido mediante las expresiones anteriores, los datos suministrados por el fabricante, y los parámetros de la tabla 3.1

Magnitud física M	Magnitud Eléctrica E	$\sigma_{\text{conversión}}$	σ_E	$\sigma_{\text{datalogger}}$	σ_M	U
Temperatura	R:75..130 Ω $\langle E \rangle = 100\Omega$	0.15 °C	1.409x10 ⁻⁴ Ω	3.660x10 ⁻⁴ °C	0.150 °C	0.3 °C
Humedad rel.	R:0..101.2 Ω $\langle E \rangle = 50\Omega$	1.25 % HR	1.409x10 ⁻⁴ Ω	1.392x10 ⁻⁴ % HR	1.250 % HR	2.5 % HR
Vel. Viento	V:0..2 V $\langle E \rangle = 1 V$	0.35 m/s	4.405x10 ⁻⁶ V	7.709x10 ⁻⁵ m/s	0.350 m/s	0.7 m/s
Dir. Viento	R:0..1010.4 Ω $\langle E \rangle = 500 \Omega$	2.5 °	1.126x10 ⁻³ Ω	3.986x10 ⁻⁴ °	2.50 °	5 °
Presión	R:0..102.4 Ω $\langle E \rangle = 50 \Omega$	0.825 hPa	1.409x10 ⁻⁴ Ω	1.513x10 ⁻⁴ hPa	0.825 hPa	1.65 hPa
Rad. Solar	V:0..0.0224 V $\langle E \rangle = 0,010 V$	10.5 W/m ²	6.870x10 ⁻⁸ V	4.292x10 ⁻³ W/m ²	10.50 W/m ²	21 W/m ²
Tasa lluvia	V:0..5 V $\langle E \rangle = 1 V^*$	0,5* mm/h	4.405x10 ⁻⁶ V	8.810x10 ⁻⁴ mm/h	0.50 mm/h	1 mm/h

Cuadro 3.3: Incertidumbre asociada a las variables meteorológicas registradas en la estación ESCRA. $\langle E \rangle$ corresponde al valor utilizado para el cálculo de la incertidumbre. (* valores correspondientes a una tasa de lluvia de 100 mm/h. Esta tasa representa un límite superior según la pluviometría de Barcelona.)

3.1.3. Equipos radiológicos

La estación ESCRA cuenta con diversos dispositivos para la medida de los campos de radiación ambiental. Dispone de tres sensores para medir la tasa de dosis depositada (una cámara de ionización, un contador proporcional, y un detector Geiger-Müller), sensores para la medida de la dosis acumulada (dosímetros TLD), un equipo para la medida de la concentración de radionucleidos artificiales emisores de radiación alfa y radiación beta, para la medida de la concentración de radón ambiental, y más recientemente un equipo para la medida de los descendientes del radón y otros emisores gamma en el agua de lluvia *in situ*. Todos los equipos (excepto los dosímetros TLD) están conectados a un ordenador personal al que transfieren los datos registrados periódicamente. En la figura 3.3 se puede observar la posición de los sensores radiológicos en la torre meteorológica.

A continuación vamos a describir los equipos enumerados anteriormente.

Magnitud	Cámara Ionización Tasa dosis absorbida	Contador Proporcional Tasa dosis absorbida	Detector Geiger-Müller Tasa dosis absorbida
Rango medida	10 nGy/h a 5 μ Gy/h	5 nGy/h a 5 mGy/h	3 nGy/h a 2 mGy/h
Incertidumbre	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
Rango energía	60 keV a 8 MeV	30 keV a 1.3 MeV	50 keV a 1.5 MeV
Fondo intrínseco	5 nSv/h	17 nSv/h	10 nSv/h
Temp. Operación	-25° a 55°C	-35° a 60°C	-20° a 65°C

Cuadro 3.4: Características de los equipos de medida de la tasa de dosis.

3.1.4. Equipos radiológicos: Medida de la tasa de kerma ambiental

Cámara de ionización

La cámara de ionización empleada es de la marca Reuter-Stokes, modelo RSS-112. El volumen de detección es esférico con una capacidad de 4.2 litros. El gas de llenado es argón de alta pureza, y se encuentra a una presión de 25 atmósferas. El rango de medida se sitúa entre los 10 nGy/h y los 5 μ Gy/h, con una precisión del 5%.

La sonda se conecta a un módulo de control que se encarga de comunicarse con la sonda y almacenar los datos registrados en una memoria donde se pueden almacenar hasta 128 kbytes de información, que corresponde a seis meses de datos si las medidas se realizan a intervalos de 10 minutos. Los datos almacenados en la memoria del módulo de control se pueden transferir a un ordenador personal mediante una conexión RS-232. Este equipo es portátil, ya que el módulo de control dispone de una batería que permite su funcionamiento sin conexión a la red eléctrica.

La sonda Reuter-Stokes está situada en la parte superior de la torre meteorológica, a unos 3 metros del suelo de la azotea de la estación ESCRA.

En la figura 3.4 se presenta un gráfico con la respuesta energética de la sonda dada por el fabricante.

Contador proporcional

El detector proporcional es de la marca FAG, modelo FHZ601A. El gas de llenado del volumen de detección es gas PR (mezcla de 90% de argón y 10% de metano) y se encuentra a una presión de 1000 hPa). El rango de medida va desde 5 nGy/h hasta 5 mGy/h con una precisión del 5%.

La sonda dispone de una memoria circular en la que se pueden almacenar hasta 256 datos. La sonda se conecta a un ordenador personal mediante un cable RS-232. El intercambio de información entre el ordenador y la sonda se puede realizar mediante dos protocolos distintos: Protocolo DIN 66348, o protocolo ASCII.

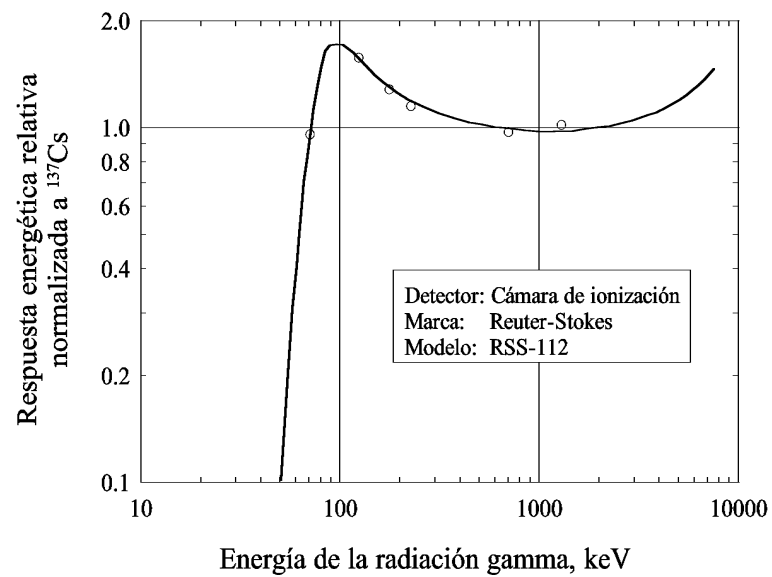


Figura 3.4: Respuesta energética de la cámara de ionización Reuter-Stokes modelo RSS-112 ubicada en la estación ESCRA.

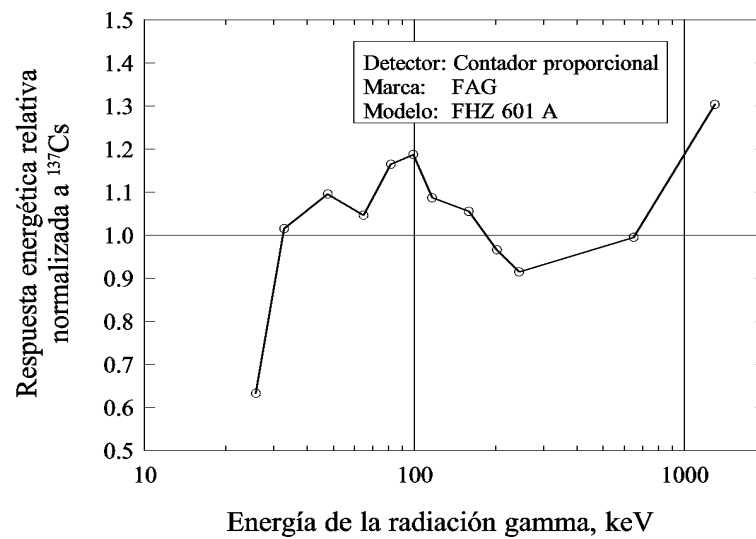


Figura 3.5: Respuesta energética del contador proporcional marca FAG, modelo FHZ601A ubicado en la estación ESCRA.

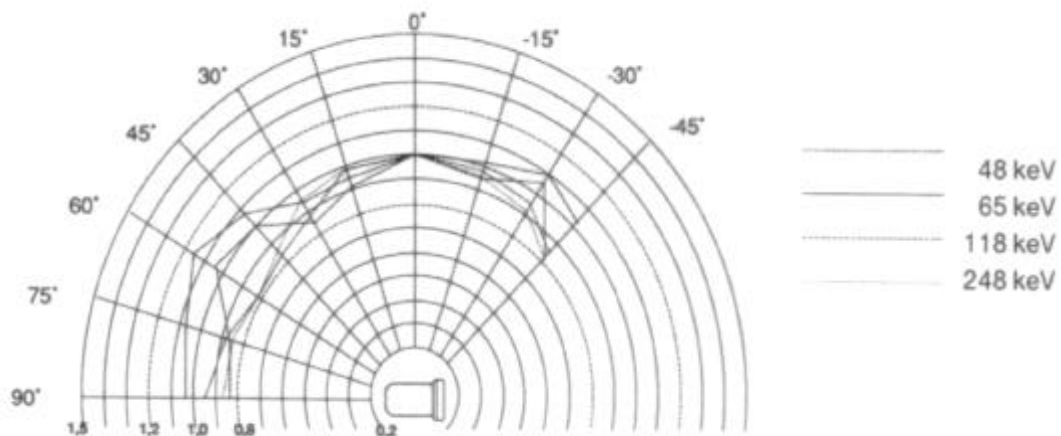


Figura 3.6: Respuesta direccional del contador proporcional marca FAG, modelo FHZ601A.

La sonda se encuentra instalada en la torre meteorológica a una altura de 150 cm del suelo de la azotea de la estación ESCRA, y a 60 cm del eje de la torre.

En las figuras 3.5 y 3.6 se presenta el gráfico de la respuesta energética y direccional de la sonda dadas por el fabricante.

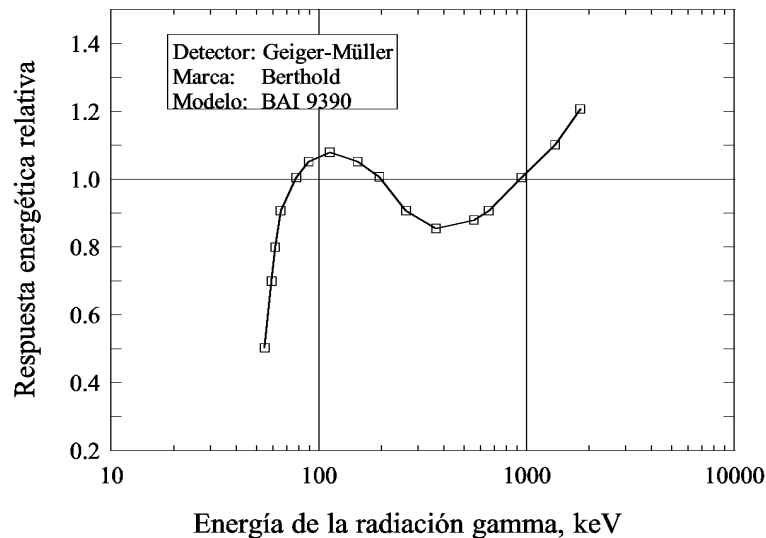


Figura 3.7: Respuesta energética del detector Berthold, BAI9390.

Detector Geiger-Müller

El detector Geiger-Müller es de la marca Berthold, modelo BAI 9390. La sonda dispone de dos detectores compensados en energía. Uno se emplea para medir tasas de dosis elevadas y el otro para medir tasas de dosis bajas. El rango de medida se sitúa entre los 3 nGy/h y 2 mGy/h, con una precisión del 10 % para tasas de dosis de 0.1 μ Gy/h.

La sonda se encuentra instalada en la torre meteorológica a una altura de 150 cm del suelo de la azotea de la estación ESCRA, y a 60 cm del eje de la torre, en el lado opuesto de la sonda FAG FHZ601A.

En las figuras 3.7 y 3.8 se presenta el gráfico de la respuesta energética y direccional de la sonda dadas por el fabricante.

3.1.5. Equipos radiológicos: Medida de la concentración de radón y emisores alfa y beta artificiales en la atmósfera.

La estación ESCRA dispone de un equipo marca Berthold, modelo LB/BAI 9100-D, destinado a la medida de la concentración de los emisores alfa y beta artificiales en la atmósfera, y para la medida de la concentración del radón ambiental (ver figura 3.9).

El equipo consiste en un detector de partículas alfa y beta constituido por un centelleador plástico recubierto por una capa de ZnS con un espesor másico de 0.5 mg/cm², que se encuentra situado frente a un filtro de fibra de vidrio. El filtro se desplaza a una velocidad de 10 mm/h y a través de él circula aire exterior con un caudal de unos 5 m³/h. El aire se recoge del exterior a una altura de 2 metros por encima de la azotea de la estación ESCRA, mediante una conducción de PVC de 4 cm de diámetro y 5.5 metros de longitud. Las partículas de polvo y aerosoles del aire se depositan en el filtro, y al enfrentarse al detector de centelleo

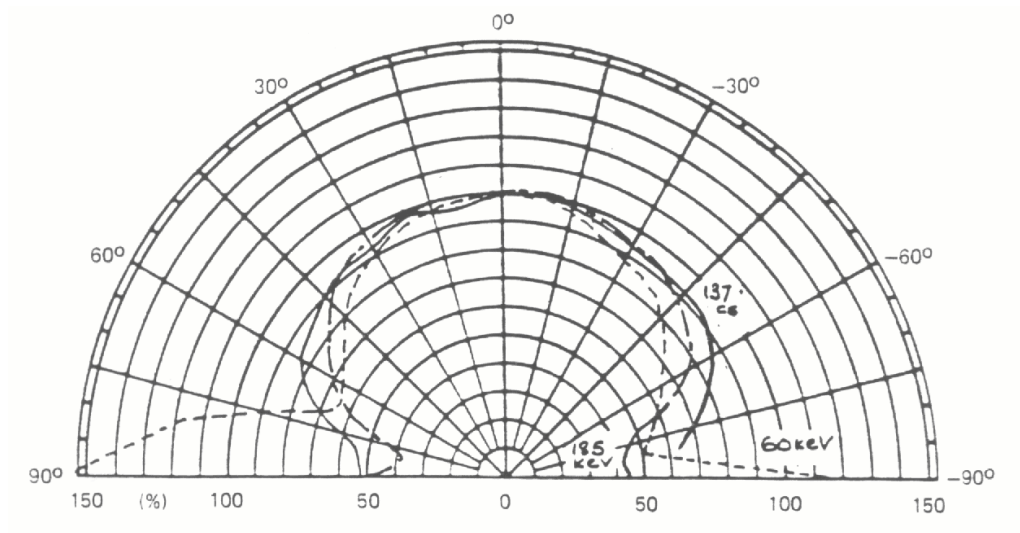


Figura 3.8: Respuesta direccional del detector Berthold, BAI9390.

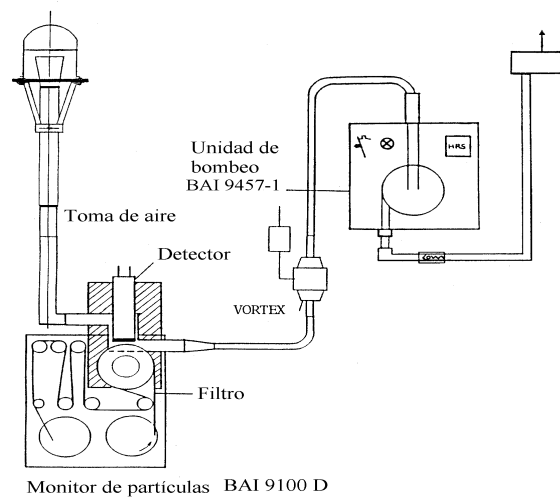


Figura 3.9: Equipo de medida de la concentración de radón y emisores alfa y beta en el aire. Marca Berthold, modelo LB/BAI 9100-D.

éste detecta las partículas β^- y β^+ emitidas por los radionucleidos depositados en el filtro, y el recubrimiento de ZnS detecta las partículas alfa.

Representemos la tasa de recuento de partículas por n_i , siendo $i = \alpha$ para partículas alfa, y $i = \beta$ para partículas beta. La tasa de recuento será igual a la suma de la tasa de recuento de partículas alfa ó beta emitidas por radionucleidos descendientes del radón (en adelante tasa de recuento natural), $n_{\text{nat},i}$, más la tasa de recuento debida a radionucleidos de origen artificial, $n_{\text{art},i}$, más la tasa de recuento debida al fondo del equipo, $n_{\text{fondo},i}$ (expresión 3.8),

$$n_i = n_{\text{nat},i} + n_{\text{art},i} + n_{\text{fondo},i}. \quad (3.8)$$

El equipo puede distinguir las partículas alfa y beta que provienen de los descendientes del radón del resto de partículas alfa y beta mediante el método de la pseudo-coincidencia diferencial alfa-beta (Método ABPD). Este método se basa en el hecho de que la desintegración beta del ^{214}Bi está inmediatamente seguida ($T_{1/2} \simeq 160\mu\text{s}$) por la desintegración alfa del ^{214}Po en la cadena de desintegración del ^{222}Rn . De esto modo es posible distinguir las emisiones beta y alfa de origen natural (descendientes del radón) de las emisiones debidas a radionucleidos de origen artificial, cuando el dispositivo de medida detecta simultaneamente una partícula alfa y una partícula beta. La tasa de recuento correspondiente a coincidencias de detección de partículas alfa y beta la denominaremos tasa de recuento de pseudo-coincidencia, n_{ps} . De esta forma la tasa de recuento natural se relaciona con la tasa de recuento de pseudo-coincidencia mediante la expresión 3.9, donde $F_{\text{ps},i}$ es un factor de proporcionalidad denominado factor de pseudo-coincidencia.

$$n_{\text{nat},i} = n_{\text{ps}} F_{\text{ps},i} \quad (3.9)$$

Procedimiento de cálculo de la concentración de los emisores alfa y beta artificiales Cuando el aire exterior circula a través del filtro de fibra de vidrio, que se desliza continuamente a una velocidad de 10 mm/h, se depositan emisores alfa y beta presentes en el aire constituidos por radionucleidos de origen natural (radón y sus descendientes), y si existen, por radionucleidos de origen artificial. La zona del filtro expuesta al aire sigue desplazándose y se enfrenta a la ventana del detector. La actividad superficial depositada en el filtro debida a radionucleidos de origen artificial emisores de radiación i , $A_{\text{s},i}$, dependerá de la distancia x recorrida por el filtro durante la exposición al aire exterior, de la anchura del filtro, a , de la velocidad de desplazamiento v , del flujo de aire F , de la anchura, L , de la ventana del detector y de la actividad volúmica del aire debido a radionucleidos de origen artificial, $A_{\text{art},i}$. Estas magnitudes se relacionan de acuerdo con la expresión 3.10,

$$A_{\text{s},i} = \frac{A_{\text{art},i} F x}{a L v}. \quad (3.10)$$

Integrando la expresión 3.10 sobre toda el área de la ventana del detector, se obtiene la actividad total para emisores de radiación i , $A_{\text{tot},i}$ depositada en la zona de filtro vista por la ventana (expresión 3.11),

$$A_{\text{tot},i} = \frac{A_{\text{art},i}FL}{2v}. \quad (3.11)$$

Multiplicando la actividad total por la eficiencia η_i (expresada en cps/Bq), se obtiene la tasa de recuento de radionucleidos artificiales $n_{\text{art},i}$,

$$n_{\text{art},i} = \eta_i \frac{A_{\text{art},i}FL}{2v}. \quad (3.12)$$

Denominando Q_i al factor de calibración expresado en $\frac{\text{Bq/m}^3}{\text{cps}}$ (ver 3.13) se obtiene la expresión 3.14 que relaciona la actividad artificial de emisores de radiación i con la tasa de recuento,

$$Q_i = \frac{2v}{\eta_i FL}, \quad (3.13)$$

$$A_{\text{art},i} = n_{\text{art},i} Q_i, \quad (3.14)$$

donde $n_{\text{art},i}$ se obtiene mediante la expresión 3.15, reagrupando los términos de la expresión 3.8,

$$n_{\text{art},i} = n_i - n_{\text{nat},i} - n_{\text{fondo},i}. \quad (3.15)$$

Cálculo de la eficiencia de detección: η_i . Se calcula periódicamente durante el proceso de calibración del equipo. Para ello se utilizan dos fuentes radiactivas superficiales. Una de ^{241}Am para la determinación de η_α , y otra de ^{36}Cl para la determinación de η_β . La expresión utilizada es 3.16, donde A_i hace referencia a la tasa de cuentas de partículas i obtenida durante la calibración, B_i es la actividad de la fuente radiactiva empleada durante la calibración, y F_{η_i} el factor de Ícare que es un factor de corrección debido a la autoabsorción del filtro (su valor generalmente es suministrado por el fabricante del filtro).

$$\eta_i = \frac{A_i}{B_i} F_{\eta_i} \equiv \eta'_i F_{\eta_i}. \quad (3.16)$$

Cálculo del factor de pseudo-coincidencia, f_{ps} y de la tasa de recuento del fondo intrínseco, $n_{\text{fondo},i}$. Ambos parámetros se determinan simultáneamente, aprovechando el radón del aire al no disponer de ninguna otra fuente de radón. Para que los resultados sean correctos, la evolución temporal de radón atmosférico debe ser más lenta que el periodo de semidesintegración del radón, torón y sus descendientes. Además, la contribución de los radisótopos de la cadena de desintegración del torón debe ser constante respecto a la contribución de los descendientes del radón o inferior ($\sim 1/50$).

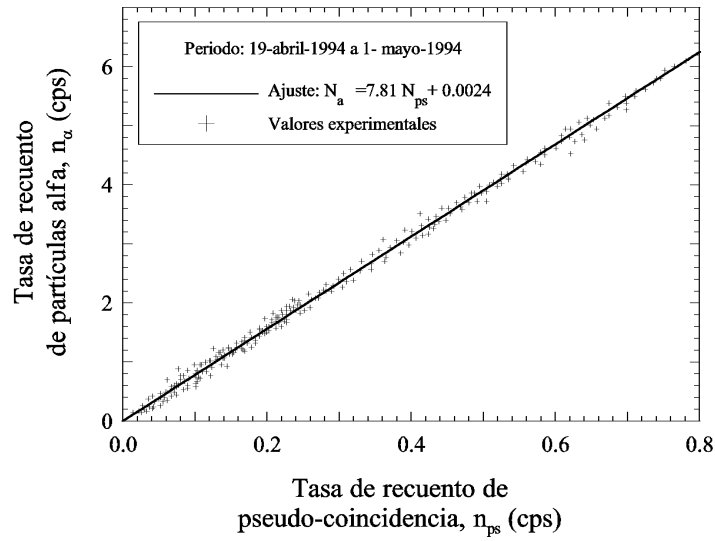


Figura 3.10: Relación entre la tasa de cuentas de pseudo-coincidencia y la tasa de cuentas de partículas alfa. Valores obtenidos en la estación ESCRA, correspondientes al periodo comprendido entre el día 19 de abril de 1994 y el día 1 de mayo de 1994.

El método empleado consiste en registrar durante un cierto periodo de tiempo las cuentas debidas a radiación alfa y beta total (n_α y n_β respectivamente), y las cuentas debidas a la pseudo-coincidencia, n_{ps} . Si durante dicho intervalo de tiempo la radiación alfa y beta ambiental sólo es debida a los descendientes del radón (situación que se produce con más frecuencia al no existir emisiones radiactivas a la atmósfera de origen artificial), las cuentas alfa y beta únicamente son debidas a la radiactividad natural y al fondo intrínseco del equipo, relacionándose mediante la expresión 3.17,

$$n_i = n_{\text{fondo},i} + n_{ps}F_{ps,i}. \quad (3.17)$$

Si realizamos una regresión lineal entre los datos obtenidos durante dicho intervalo de tiempo para la tasa de recuento total n_i y la tasa de pseudo-coincidencia n_{ps} , se puede obtener el factor de pseudo-coincidencia y el fondo intrínseco, ya que la tasa de recuento total y la tasa de pseudo-coincidencia se pueden relacionar mediante una recta (expresión 3.17).

A modo de ejemplo se presentan los valores obtenidos para una calibración realizada con fecha 18 de abril de 1994. En las figuras 3.10 y 3.11 se han representado las rectas de regresión obtenidas, y en las expresiones 3.18 y 3.19 los parámetros obtenidos,

$$n_\alpha = n_{\text{fondo},\alpha} + n_{ps}F_{ps,\alpha} = 0,0024 + 7,81n_{ps}. \quad (3.18)$$

$$n_\beta = n_{\text{fondo},\beta} + n_{ps}F_{ps,\beta} = 0,39 + 12,99n_{ps}. \quad (3.19)$$

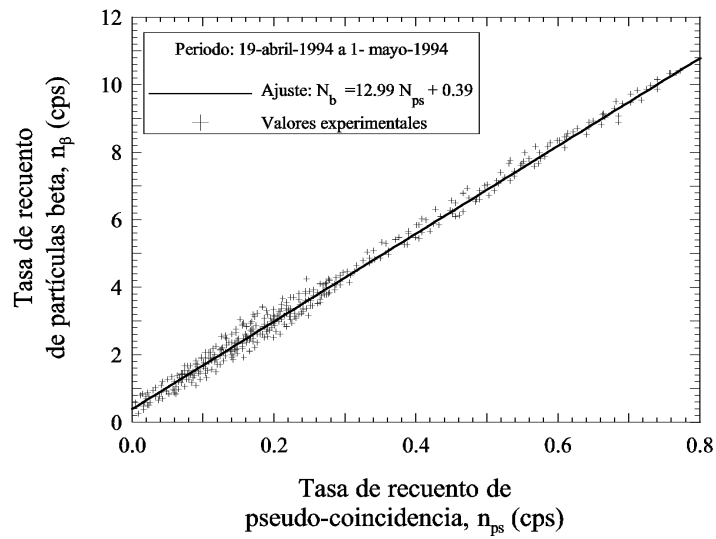


Figura 3.11: Relación entre la tasa de cuentas de pseudo-coincidencia y la tasa de cuentas de partículas beta. Valores obtenidos en la estación ESCRA, correspondientes al periodo comprendido entre el día 19 de abril de 1994 y el día 1 de mayo de 1994

Procedimiento de cálculo de la concentración del radón ambiental Tal y como se ha comentado anteriormente, la concentración de radón se calcula mediante el método diferencial de pseudocoincidencia alfa-beta (Método ABPD). Este método se basa en el hecho de que la desintegración beta del ^{214}Bi está inmediatamente seguida ($T_{1/2} \simeq 160\mu\text{s}$) por la desintegración alfa del ^{214}Po en la cadena de desintegración del ^{222}Rn . De esto modo es posible distinguir las emisiones beta y alfa de origen natural (descendientes del radón) de las emisiones debidas a radionucleidos de origen artificial, cuando el dispositivo de medida detecta simultaneamente una partícula alfa y una partícula beta. La tasa de recuento correspondiente a coincidencias de detección de partículas alfa y beta la denominaremos tasa de recuento de pseudocoincidencia, n_{ps} .

Consideremos $N(t)_j$ el número de radionucleidos j depositados en el filtro de fibra de vidrio en un instante dado. Suponiendo que el filtro no se desplaza, la evolución temporal del número de radionucleidos j en el filtro vendrá dada por las expresiones 3.20 y 3.21, donde F es el flujo de aire aspirado por la bomba, n_j es el número de radionucleidos j por unidad de volumen en el aire, y λ_j es la constante de desintegración del radionucleido j ,

$$\frac{dN_1}{dt} = Fn_1 - \lambda_1 N_1 \quad (3.20)$$

$$\frac{dN_j}{dt} = Fn_j - \lambda_j N_j + \lambda_{j-1} N_{j-1}, \quad j \geq 2. \quad (3.21)$$

Denominando a_j a la actividad volúmica del radionucleido j , (expresión 3.22), y A_j la actividad del radionucleido j depositada en el filtro, (expresión 3.23)

$$a_j = \lambda_j n_j, \quad (3.22)$$

$$A_j = \lambda_j N_j, \quad (3.23)$$

se obtiene que para la situación estable donde $\frac{dN_j}{dt} = 0$,

$$-\lambda_j N_j + Fn_j + \lambda_{j-1} N_{j-1} = \frac{Fa_j}{\lambda_j} - A_j + A_{j-1} = 0, \quad j \geq 2. \quad (3.24)$$

A partir de la expresión 3.24 la actividad depositada en el filtro debida al radionucleido j se puede escribir de acuerdo con la expresión 3.25,

$$A_j = A_{j-1} + \frac{Fa_j}{\lambda_j} = F \sum_{k=1}^j \frac{a_k}{\lambda_k}, \quad j \geq 2. \quad (3.25)$$

Para simplificar la expresión anterior podemos considerar que el radón se encuentra en equilibrio con sus descendientes, de forma que $a_j \simeq a$ para todo j siendo a la actividad volúmica

de radón. Esta consideración no es del todo correcta, ya que tal y como se vió en la figura 2.9 el factor de equilibrio medio oscila alrededor de 0.4. Apesar de ello, la concentración de radón será proporcional a la concentración de sus descendientes. De esta forma, la actividad del radionucleido j depositada en el filtro se podrá expresar según la ecuación 3.26,

$$A_j = Fa \sum_{k=1}^j \frac{T_{1/2}}{\ln 2}, \quad j \geq 2. \quad (3.26)$$

A raíz de la expresión 3.26 las actividad de los diferentes radionucleidos de la cadena de desintegración del radón son:

$$A_{Po-218} = Fa \left(\frac{1}{\lambda_{Po-218}} \right) = Fa \frac{186,6 \text{ s}}{\ln 2}. \quad (3.27)$$

$$A_{Pb-214} = Fa \left(\frac{1}{\lambda_{Po-218}} + \frac{1}{\lambda_{Pb-214}} \right) = Fa \frac{(186,6 + 1608 \text{ s})}{\ln 2}. \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} A_{Bi-214} &= Fa \left(\frac{1}{\lambda_{Po-218}} + \frac{1}{\lambda_{Pb-214}} + \frac{1}{\lambda_{Bi-214}} \right) \\ &= Fa \frac{(186,6 + 1608 + 1194 \text{ s})}{\ln 2}. \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} A_{Po-214} &= Fa \left(\frac{1}{\lambda_{Po-218}} + \frac{1}{\lambda_{Pb-214}} + \frac{1}{\lambda_{Bi-214}} + \frac{1}{\lambda_{Po-214}} \right) \\ &= Fa \frac{(186,6 + 1608 + 1194 + 1,64 \times 10^{-4} \text{ s})}{\ln 2}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Mediante las expresiones 3.27, 3.28, 3.29, y 3.30 se calculan las actividades alfa, $A_{nat,\alpha}$, y beta $A_{nat,\beta}$ totales de origen natural empleando las expresiones 3.31 y 3.32

$$A_{nat,\alpha} = A_{Po-218} + A_{Po-214} = Fa \frac{3175,2 \text{ s}}{\ln 2}, \quad (3.31)$$

$$A_{nat,\beta} = A_{Pb-214} + A_{Bi-214} = Fa \frac{4783,2 \text{ s}}{\ln 2}. \quad (3.32)$$

Dado que a representa la actividad volúmica en aire del radón y sus descendientes cuando se encuentran en equilibrio, si conocemos el flujo de aire aspirado, F , y la actividad alfa natural, $A_{nat,\alpha}$, o la actividad beta natural, $A_{nat,\beta}$ depositadas en el filtro, podremos determinar la actividad volúmica del radón mediante una de las dos expresiones 3.33 ó 3.34 si ordenamos los términos de las expresiones 3.31 y 3.32 respectivamente.

$$a = \frac{A_{\text{nat},\alpha} 0,882 \text{ h}}{F \ln 2}, \quad (3.33)$$

$$a = \frac{A_{\text{nat},\beta} 1,329 \text{ h}}{F \ln 2}, \quad (3.34)$$

La actividad alfa natural $A_{\text{nat},\alpha}$, y la actividad beta natural, $A_{\text{nat},\beta}$ depositadas en el filtro se obtienen a partir de la tasa de cuentas de pseudocoincidencia mediante las expresiones 3.35 y 3.36, siendo η_α y η_β la eficiencia del sistema de detección calculada mediante la expresión 3.16,

$$A_{\text{nat},\alpha} = \frac{n_{\text{nat},\alpha}}{\eta_\alpha} = \frac{n_{\text{ps}} F_{\text{ps},\alpha}}{\eta_\alpha}, \quad (3.35)$$

$$A_{\text{nat},\beta} = \frac{n_{\text{nat},\beta}}{\eta_\beta} = \frac{n_{\text{ps}} F_{\text{ps},\beta}}{\eta_\beta}. \quad (3.36)$$

Sustituyendo 3.35 y 3.36 en 3.33 y 3.34 respectivamente, la actividad volúmica de radón se podrá representar mediante las expresiones 3.37 y 3.38, donde Q_{Rn} corresponde al factor de calibración para el radón.

$$A_{\text{Rn}} = \frac{n_{\text{nat},\alpha}}{\eta_\alpha} \frac{\ln 2}{0,882 \text{ h}} = \frac{n_{\text{ps}} F_{\text{ps},\alpha}}{\eta_\alpha F} \frac{\ln 2}{0,882 \text{ h}} = Q_{\text{Rn}} n_{\text{ps}}. \quad (3.37)$$

$$A_{\text{Rn}} = \frac{n_{\text{nat},\beta}}{\eta_\beta} \frac{\ln 2}{1,329 \text{ h}} = \frac{n_{\text{ps}} F_{\text{ps},\beta}}{\eta_\beta F} \frac{\ln 2}{1,329 \text{ h}} = Q_{\text{Rn}} n_{\text{ps}}. \quad (3.38)$$

Para el cálculo de la actividad volúmica del radón se puede emplear una de la dos expresiones 3.37 ó 3.38 indistintamente.

El factor de calibración que se debe introducir en el monitor Berthold no corresponde al valor que se obtiene de la expresión 3.37 o de la expresión 3.38, sino que debe ser el valor correspondiente a la expresión 3.39. Esto es debido a que el monitor se encarga de multiplicar el flujo de aire por el factor introducido para llegar al valor de las expresiones 3.37 y 3.38.

$$Q'_{\text{Rn}} = Q_{\text{Rn}} \frac{F}{3600} = \frac{F_{\text{ps},\alpha}}{\eta_\alpha} \frac{\ln 2}{0,882 \times 3600} = \frac{F_{\text{ps},\beta}}{\eta_\beta} \frac{\ln 2}{1,329 \times 3600} \quad (3.39)$$

Por otro lado, si tenemos en cuenta que el radón y sus descendientes no se encuentran en equilibrio y que además existe un efecto de deposición de descendientes en las paredes del tubo de aspiración debido a su geometría y material de construcción, deberemos añadir una corrección en el factor de calibración. Para hallar dicha corrección se realizaron medidas simultaneas con el equipo Berthold y otro dispositivo más preciso de medida del radón ambiental. Se llegó a la conclusión de que para corregir el factor de calibración se debe dividir por un factor de

corrección $f_{\text{Corr}} = 0.47$, que es del mismo orden de magnitud que el factor de equilibrio medio (0.4) observado en la figura 2.9. De esta forma el factor de calibración final corregido será el de la expresión 3.40,

$$Q_{\text{Rn}}^{\text{Corr}} = \frac{1}{f_{\text{Corr}}} Q_{\text{Rn}}. \quad (3.40)$$

3.1.6. Equipos radiológicos: Medida de la dosis acumulada.

Para la medida de la dosis acumulada ambiental se dispone de dosímetros de termoluminiscencia (en adelante dosímetros TLD) que se ubican en la torre meteorológica a tres alturas distintas y en el interior del laboratorio ESCRA.

Descripción de los dosímetros TLD Cada dosímetro TLD está constituido por un porta-dosímetro de PVC en el cual se han practicado seis orificios en los que se alojan seis cristales de termoluminiscencia (TL) de fluoruro de litio (LiF), modelo TLD-700 suministrado por la empresa Harshaw, cuyas características se describen en la tabla 3.5. El porta-dosímetro tiene geometría cilíndrica con un diámetro exterior de 29 mm y una altura de 10 mm (ver figura 3.12. Los seis cristales TL están numerados y se ubican simétricamente respecto el centro del porta-dosímetro. El conjunto de cristales está cubierto por una tapa de PVC que tiene un espesor másico de 1 g/cm^2 . Con el fin de estimar el efecto *fading* o pérdida de señal del dosímetro, tres de los dosímetros utilizados se someten, antes de ser introducidos en el porta-dosímetro, a un proceso de exposición ambiental y posteriormente son irradiados con una dosis de 0.5 mSv.

Proceso de preparación de los dosímetros TLD En primer lugar se somete a los cristales TL a un tratamiento térmico previo el día anterior y que consiste en calentar los cristales TL a una temperatura de 300 °C durante 1.6 horas, y posteriormente a 80 °C durante 15 horas. Con este proceso se consigue el borrado de los cristales TL. Al día siguiente al borrado, los tres cristales TL de control de *fading* son irradiados a una dosis de 0.5 mSv, y se introducen junto con el resto de dosímetros TL en el porta-dosímetros según una posición fijada. Una vez el porta-dosímetro contine el total de cristales TL, se cierra y se introduce en una bolsa de plástico negro que se sella térmicamente. Cada dosímetro TLD se referencia con un número de identificación.

Ubicación de los dosímetros TLD en la Estación ESCRA y proceso de medida

La Estación ESCRA dispone de 3 posiciones para exponer dosímetros TLD a la radiación ambiental. Dos de ellas se encuentran ubicadas en la torre la torre meteorológica a 275 cm (TLD-1) y 135 cm (TLD-2) del suelo, y la tercera posición se encuentra en el interior de la Estación ESCRA (TLD-3). Cada conjunto de dosímetros permanecen en su posición durante un tiempo que oscila entre los 45 días y los 60 días. Una vez terminado este periodo de tiempo se retiran, y en su lugar se sitúan nuevos dosímetros TLD. Los dosímetros que han sido expuestos a la radiación ambiental se someten al proceso de lectura que se describe a continuación.

Lectura de los dosímetros TLD La lectura de los dosímetros TLD se efectúa en el horno marca Vinten, modelo Toledo siguiendo un proceso térmico que comprende un periodo de pre-calentamiento, y otro de lectura. El periodo de pre-calentamiento consiste en someter a los cristales TL a una temperatura de 135 °C durante 20 segundos. El periodo de lectura se efectúa inmediatamente después del periodo de pre-calentamiento, y consiste en someter al cristal TL a una temperatura de 270 °C durante 12 segundos, con una velocidad de calentamiento de 25 °C/s. La información obtenida por el proceso de lectura consiste en la curva de luminiscencia, y la señal del lector que se almacena en soporte magnético.

Calibración de los dosímetros Después de cada lectura, los dosímetros se colocan en un contenedor de aluminio que se utiliza para efectuar el tratamiento de borrado en el horno marca Vinten, previamente a la realización de la calibración. La calibración se realiza en el Laboratorio de Calibración y Dosimetría del INTE (Laboratorio número 23 acreditado por el SCI en el área de radiaciones ionizantes). La dosis de referencia empleada es de 0.5 mSv.

Elaboración de resultados Se registra en un estadillo los valores experimentales correspondientes a la lectura y calibración de cada dosímetro. A partir de los datos obtenidos en la última calibración se determina un factor de calibración individual que se utiliza para estimar la dosis registrada en cada dosímetro. Para cada conjunto de tres cristales de medida y tres cristales de control de *fading* se calcula el valor medio \dot{D} y la desviación típica de la lectura realizada, de acuerdo con la expresión 3.41, considerando que L_i es la lectura (expresada en cuentas), y N_i es el factor de calibración del dosímetro expresado en unidades de mSV/cuentas,

$$\dot{D} = \sum_{i=1}^3 L_i N_i. \quad (3.41)$$

El factor de *fading*, f , se puede calcular mediante la expresión 3.42, donde D_f es la dosis medida en los cristales de control de *fading*, y \dot{D} es la dosis medida en los cristales de medida ambiental,

$$f = \frac{0,5 \text{ mSv}}{D_f - \dot{D}}. \quad (3.42)$$

De esta forma, según las expresiones 3.41 y 3.42, la dosis, D , medida por el dosímetro TLD se expresa según 3.43,

$$D = \dot{D} \times f \quad (3.43)$$

Características de los dosímetros TLD-700	
Material	${}^7\text{LiF}$
Número Atómico efectivo	8.2
Espectro de emisión TL	3500 - 6000 Å
Respuesta energética 30 keV/ ${}^{60}\text{Co}$	1.25
Rango de medida	10 μGy - 10 Gy
Fading	Despreciable, 5 % año a 20 °C

Cuadro 3.5: Características de los dosímetros TLD-700

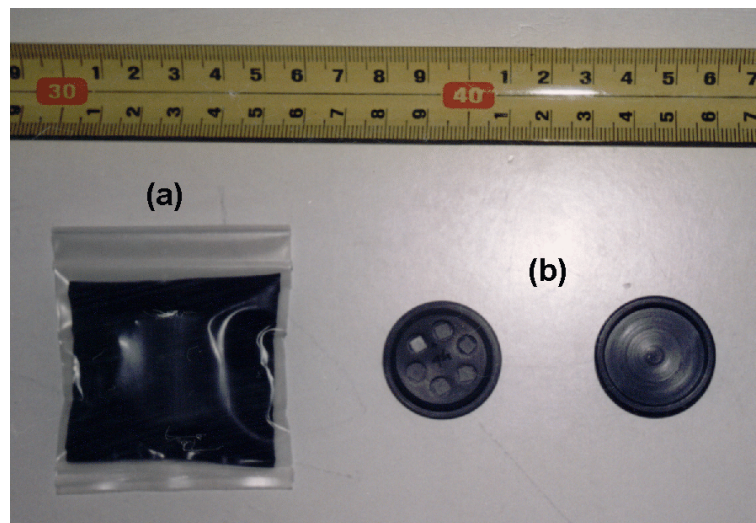


Figura 3.12: Dosímetros TLD empleados en la medida de la dosis acumulada ambiental. (a) Dosímetro montado; (b) Interior del dosímetro, en el que se puede apreciar el soporte de PVC, y los alojamientos de los cristales TL.

3.1.7. Equipos radiológicos: Sistema de medida *in-situ* de la actividad del agua de lluvia

Uno de los equipos radiológicos, que se ha instalado recientemente en la Estación ESCRA consiste en un sistema de medida en continuo de la actividad específica de radionucleidos emisores de radiación gamma en el agua de lluvia. El equipo empleado recibe el nombre de equipo SARAC, y ha sido desarrollado por completo en los laboratorios del INTE en el marco de esta tesis.

El principio de funcionamiento del equipo SARAC consiste en la colección de agua de lluvia durante los episodios de lluvia. Cuando el volumen de agua recogida (durante un tiempo inferior a 1000 segundos) es del orden de 250 cm^3 , se inicia un periodo de recuento de 600 segundos para obtener el espectro de emisión gamma del volumen de agua recogido. Del espectro obtenido se puede obtener la actividad específica del agua de lluvia, que según los resultados obtenidos oscila entre los 50 Bq/m^3 y los 1500 Bq/m^3 . En la sección 3.2 se describe con más detalle el principio de funcionamiento y características de este equipo.

3.1.8. Equipos de adquisición y almacenamiento de datos

Los datos obtenidos con los sensores meteorológicos descritos en la sección 3.1.2 se almacenan en soporte informático de forma continua, para su posterior tratamiento. El equipo empleado como interfase entre los sensores y el soporte informático, que en este caso se trata de un ordenador personal, se denomina *datalogger*, que realiza las funciones de conversor analógico-digital. Este equipo se utiliza para medir las salidas de tensión de los sensores de velocidad del viento, de radiación solar, y de tasa de lluvia; y también para medir la resistencia eléctrica de los sensores de temperatura, de humedad relativa, de presión, y de la dirección del viento.

Las características principales de los equipos y programas empleados en la adquisición y almacenamiento de datos son las siguientes:

- Datalogger: Equipo de la marca Hewlett & Packard, modelo HP-7500 serie B. Dispone de 16 entradas analógicas, accionadas por relés. Se conecta a un ordenador personal mediante una tarjeta modelo HP E1300A que se encuentra insertada en el ordenador personal. En la tabla 3.6 se indica la resolución.
- Ordenador personal PC-ESCRA1: Consiste en un ordenador marca DELL. El procesador es de la marca Intel, 486, con una velocidad de 33 MHz, y una capacidad del disco duro de 100 MBytes. Este equipo dispone de 4 conexiones de puerto serie para la comunicación con las sondas radiológicas.
- Ordenador personal PC-ESCRA2: Consiste en un ordenador marca MITROL. El procesador es de la marca Intel, pentium II, con una velocidad de 300 MHz, y una capacidad del disco duro de 4 GBytes. Este equipo se emplea para el tratamiento de los datos y como almacenamiento temporal de la información registrada en la Estación.
- Software de control: Se desarrolló un programa informático denominado DADQMGR que se encarga de establecer la comunicación entre el ordenador y los equipos de medida con el fin de almacenar periódicamente los datos registrados por éstos.

3.1.9. Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares de que dispone la estación se encargan de garantizar su funcionamiento en continuo y protegerla de las perturbaciones externas que puedan alterar su correcto funcionamiento. Los equipos disponibles son los siguientes:

- Sistema de acondicionamiento de aire: Se encarga de mantener la temperatura del interior del laboratorio a temperatura constante entre 22 °C y 24 °C durante todo el año. El equipo es de la marca ROCA, modelo FAS-K-244-ZHS5.
- Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI): Este equipo se emplea para estabilizar la tensión de alimentación de los instrumentos de la Estación y evitar su parada en caso de interrupción del suministro eléctrico. El equipo empleado es de la marca SALICRU, modelo UPS-3500MI-T. El SAI tiene capacidad para suministrar 3500 VA con una autonomía de 14 minutos.
- Sistema de protección contra las sobretensiones: La Estación dispone de un sistema de protección frente a las sobretensiones producidas por la caída de un rayo en las proximidades de la Estación. El sistema consiste en un conjunto de protecciones eléctricas DKU conectadas en serie a la salida de los sensores de la Estación que se encuentran ubicados en la torre meteorológica, antes de la entrada de la señal al *datalogger* y ordenador personal. De esta forma se protege el sistema de adquisición y almacenamiento de datos. Además existe un pararrayos situado a 15 metros de la Estación.

Rango	Tensión (V)		Rango	Resistencia (mΩ)
125 mV	0.12 μV		256 Ω	0.25
1 V	1.0 μV		2 kΩ	2.0
8 V	7.6 μV		16. kΩ	15
64 V	61 μV		131 kΩ	125
300 V	488 μV		1 MΩ	1000

Cuadro 3.6: Resolución del *datalogger* para un tiempo de respuesta de 20 ms

3.2. Equipo de medida *in-situ* de la actividad específica del agua de lluvia

3.2.1. Introducción

Desde la puesta en marcha de la estación ESCRA, los datos obtenidos pusieron de manifiesto la existencia de una relación entre los incrementos de la tasa de dosis ambiental, y los periodos de lluvia [55] tal y como era de suponer a raíz de los estudios publicados por otros autores, según se describe en la sección 2.4, los incrementos de la tasa de dosis se atribuyen a la presencia de descendientes del radón en el agua de lluvia. También se comprobó con los datos obtenidos en la estación ESCRA, que distintos episodios de lluvia en los que la tasa de lluvia era parecida, los incrementos de la tasa de dosis no eran de la misma intensidad. En ciertas ocasiones se observaron incrementos de la tasa de dosis muy acusados y en otras el incremento era poco significativo. Este fenómeno se puede explicar si se considera que la concentración de los descendientes del radón en el agua de lluvia varía en función de la procedencia de la nube y de la concentración de radón en el aire en el momento de producirse la precipitación. Además, la concentración de los radionucleidos en el agua de lluvia puede variar a lo largo del intervalo de tiempo en el que se produce la precipitación.

Existen algunos estudios, entre los que podemos citar [56], [57], en los que se determina la concentración de los descendientes del radón en el agua de lluvia, de forma indirecta, a partir del incremento de dosis generado durante el periodo de precipitación. Estos valores de la actividad específica del agua de lluvia poseen una gran incertidumbre, debido a que es posible que la concentración no se mantenga constante durante todo el intervalo de lluvia, o que existan otras contribuciones al incremento de la tasa de dosis no contabilizadas.

Para solucionar este problema, surgió la necesidad de disponer de un equipo que permitiera determinar la actividad específica del agua de lluvia de forma directa durante un episodio de lluvia. En el año 1997 se inició el diseño de un dispositivo para la medida de la actividad específica del agua de lluvia, denominado equipo SARAC. Su construcción finalizó el mes de julio del año 1998, y en septiembre del mismo año ya se obtuvieron los primeros resultados. En esta sección se describe el equipo SARAC que ha sido desarrollado íntegramente en las instalaciones del INTE para la realización de esta tesis.

3.2.2. Descripción general y principio de funcionamiento

El equipo SARAC está destinado a la medida de la actividad específica en el agua de lluvia de los descendientes del radón emisores de radiación gamma y otros radionucleidos emisores de radiación gamma con un periodo de semidesintegración similar o superior a ~ 20 minutos.

El principio de funcionamiento consiste en la colección de una muestra de agua de lluvia, la obtención de un espectro de la emisión de radiación gamma de la muestra, el análisis del espectro obtenido, la identificación de los radionucleidos emisores de radiación gamma, y la obtención de la actividad específica de cada radionucleido identificado en la muestra.

Todo este proceso se realiza de forma automática en el mismo lugar donde se recoge la

muestra, lo que permite determinar la composición de radionucleidos de vida corta. Por otro lado, las características del equipo permiten obtener un espectro del agua de lluvia en intervalos de tiempo que pueden variar desde minutos hasta horas. En condiciones de operación normales, se obtiene un espectro cada 10 minutos (si la tasa de lluvia es suficiente), lo que permite analizar la evolución de la actividad del agua durante un episodio de lluvia cuya duración sea superior a 10 minutos.

En la figura 3.13 se presenta un diagrama en el que se pueden observar los elementos que componen el equipo SARAC.

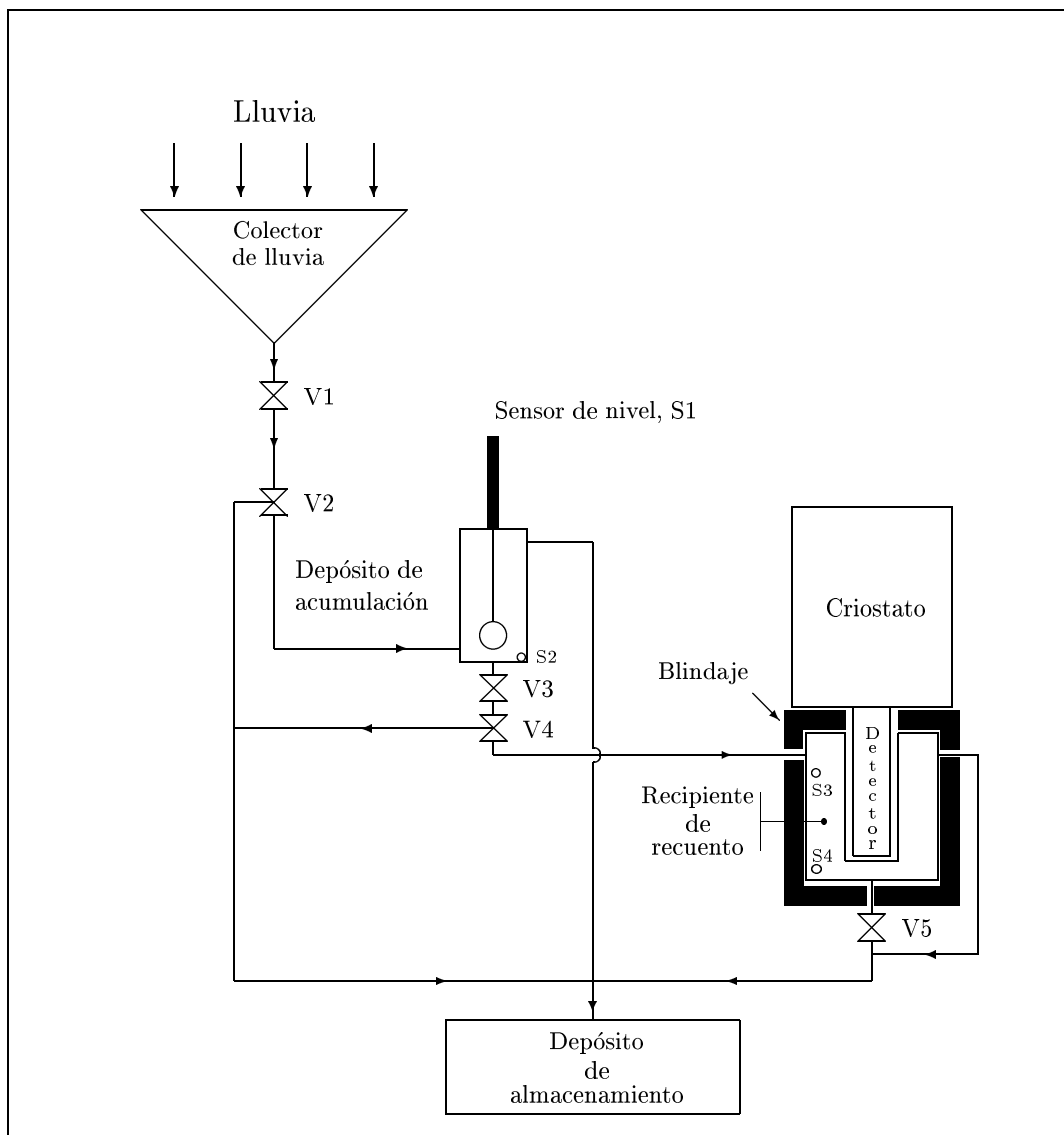


Figura 3.13: Esquema general del equipo SARAC.

Los elementos que constituyen el equipo SARAC son los siguientes:

- Colector de lluvia.
- Depósito de acumulación.
- Recipiente de recuento.
- Sensores de nivel de agua.
- Sistema de espectrometría gamma.
- Depósito de almacenamiento.
- Blindaje.
- Electroválvulas.

Colector de lluvia. Consiste en un embudo de acero inoxidable de geometría piramidal con base rectangular cuyo vértice se halla en posición invertida con la finalidad de canalizar el agua de lluvia recogida. Las dimensiones de la base son 1 m x 2 m, y la altura de la pirámide es de 45 cm. El colector se emplea para la colección del agua de lluvia y se encuentra situado en la azotea de la estación ESCRA. La superficie útil de colección de agua es de 2 m². En el vértice del embudo dispone de un orificio conectado a una conducción de 35 mm de diámetro para la evacuación del agua hasta el depósito de acumulación.

Depósito de acumulación. Su función consiste en almacenar el agua de lluvia que proviene del colector antes de pasar al recipiente de recuento. Está construido íntegramente con PVC, y es de geometría cilíndrica, con un volumen útil de 320 cm³. Dispone de un orificio de 2 cm de diámetro en la parte inferior de la pared lateral, para el llenado con el agua que proviene del colector de lluvia (ver figura 3.13), y otro orificio de las mismas dimensiones en la parte superior de la pared lateral que sirve de aliviadero en caso de llenado excesivo. En la base del depósito se encuentra otro orificio de 2 cm de diámetro destinado al vaciado depósito y el trasvase del agua al recipiente de recuento o al de almacenamiento. Además, el depósito dispone de dos sensores para conocer el estado de llenado.

Recipiente de recuento. Está destinado a almacenar el agua de lluvia durante el proceso de obtención del espectro. Está construido íntegramente en PVC y su geometría es de tipo Marinelli para optimizar la eficiencia de detección. Las dimensiones del recipiente se han calculado y optimizado mediante técnicas de simulación por métodos de Monte Carlo. En la sección 4.4 se describe el procedimiento seguido y los resultados obtenidos. El diámetro exterior es de 102 mm, y el espesor de las paredes exteriores de 10 mm. El volumen útil del recipiente de recuento es de 250 cm³. En el hueco interior del recipiente, que tiene un diámetro de 85 mm, se introduce la cabeza del dispositivo de espectrometría gamma que contiene en su interior el cristal semiconductor. En la parte superior de la pared lateral, el recipiente dispone de dos orificios de 2 cm de diámetro, uno para la entrada de agua de lluvia que proviene del depósito de acumulación, y otro que sirve de rebosadero. En la base existe otro orificio de las mismas dimensiones que los dos anteriores, empleado para vaciar el contenido del recipiente, según se puede observar en la figura 3.14.

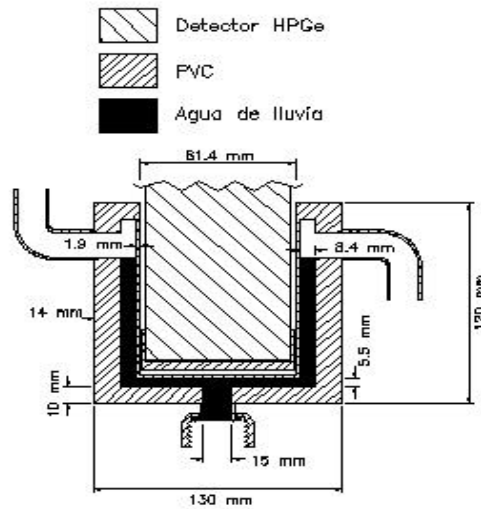


Figura 3.14: Corte transversal del recipiente de recuento del equipo SARAC

Sistema de espectrometría gamma. Está constituido por: 1) un detector portátil de germanio de alta pureza (ver tabla 3.7) para espectrometría gamma (en adelante detector HPGe) refrigerado por el nitrógeno líquido (LN2) que se encuentra en el interior de un criostato adosado al detector; 2) un analizador multicanal de la marca EG&G Ortec, modelo DART; 3) software de control del analizador multicanal y para el análisis de espectros constituido por un programa comercial de la marca EG&G Ortec denominado MAESTRO para Windows 95.

Marca	Canberra
Modelo	GR2020
Resolución (FWHM)	2 keV a 1.33 MeV ; 1.1 keV a 122 keV
Relación fotopico/borde compton	46:1
Geometría del cristal de Ge	Coaxial
Diámetro del cristal de Ge	50.5 mm
Longitud del cristal de Ge	55.5 mm
Distancia cristal-ventana	5 mm
Ventana del detector	Berilio, 0.5 mm espesor
Tensión de funcionamiento	-4000 Vdc
Rango de energía	50 keV a 10 MeV

Cuadro 3.7: Características del detector de germanio de alta pureza empleado en la realización de medidas de espectrometría gamma en el equipo SARAC.

Depósito de almacenamiento. Consiste en un recipiente de 50 litros de volumen útil, destinado al almacenamiento final de toda el agua recogida por el colector de lluvia. Se encuentra ubicado en el exterior del laboratorio, adosado a su pared norte, en la azotea del módulo B4 del Campus Nord.

Blindaje. Se emplea para evitar que la radiación gamma del agua de lluvia sea enmascarada por la radiación gamma ambiental. Ya que el equipo está destinado a medir la actividad de los descendientes del radón emisores de radiación gamma (^{214}Bi y ^{214}Pb) en el agua de lluvia, el blindaje reduce en un factor ~ 1000 la radiación generada por esos mismos radionucleidos que se encuentran en el aire y distribuidos en las superficies exteriores. El blindaje está formado por bloques de plomo envejecido, que colocados adecuadamente forman un paralelepípedo de 290mmx250mm de base y 500 mm de altura, que encierra el recipiente de recuento en su interior. Posee algunas aberturas para permitir la entrada y salida de agua, y también para que la sonda del detector HPGe pueda acceder al interior del recipiente de recuento. El espesor medio del blindaje es de 50 mm, y su peso total es de 250 kg.

Sensores de nivel de agua. El equipo SARAC dispone de cuatro sensores para determinar el nivel del agua en el interior de los recipientes. Los sensores se encargan de enviar información del estado de los depósitos al sistema de control que regula el funcionamiento del equipo. Existen dos tipos de sensores según se puede observar en la figura 3.13: 1) el sensor S1, formado por un flotador y un potenciómetro lineal situado en la parte superior del depósito de acumulación, que se encarga de indicar continuamente la altura del nivel del agua en dicho depósito; y 2) los sensores S2, S3, y S4, que a diferencia del sensor S1, sólo informan del llenado o vaciado completo del depósito donde se alojan mediante un 1 o un 0 lógicos.

Electroválvulas. Para facilitar el trasvase de agua entre depósitos, el equipo dispone de cuatro electroválvulas (V2, V3, V4, y V5), y una válvula de accionamiento manual (V1) para el colector de lluvia. Las electroválvulas V2 y V4 son de tres vías con dos posiciones (válvulas 3/2), y las electroválvulas V3 y V5 son de dos vías y dos posiciones (válvulas 2/2). Todas las electroválvulas se alimentan con 220 V y consumen una potencia de 1 W cuando están activadas.

Sistema de control del equipo SARAC. El sistema de control está constituido por un conjunto de módulos electrónicos, una tarjeta de adquisición de datos de la marca National Instruments, modelo LabPc 1200, que se encuentra conectada a un ordenador personal, y un programa informático elaborado íntegramente en las instalaciones del INTE. Este software de control se ha realizado mediante el entorno de programación denominado LabVIEW, que consiste en una aplicación informática desarrollada por National Instruments destinada al control de instrumentación electrónica, y que utiliza el lenguaje gráfico G. El programa de control regula el funcionamiento del equipo y permite que todo el proceso de análisis se realice de forma automática.

Descripción del proceso de operación del equipo SARAC. Existen dos modos de operación del equipo SARAC:

Modo 1: Espera de precipitación. El equipo se encuentra en este modo cuando no llueve. En esta situación la electroválvula V2 se encuentra activada, en espera de agua lluvia que enviará al depósito de acumulación, y la electroválvula V3 cierra el desagüe inferior del depósito de acumulación.

Modo 2: Proceso de medida. El equipo se encuentra en este modo durante un episodio de precipitación, mientras el equipo está recogiendo y analizando el agua de lluvia.

A continuación se describe el proceso de medida de una muestra de agua de lluvia cuando el equipo se encuentra en el modo 2 de operación teniendo en cuenta los tres estados en que se divide el intervalo de tiempo que transcurre desde que se empieza a coleccionar el agua de lluvia hasta que se termina su análisis y se envía al depósito de almacenamiento.

Estado a: Periodo de tiempo durante el cual se llena el depósito de acumulación.

Estado b: Periodo de tiempo durante el cual el agua de lluvia permanece en el depósito de acumulación en espera de ser trasvasada al recipiente de recuento.

Estado c: Periodo de tiempo durante el que el agua de lluvia permanece en el recipiente de recuento mientras se obtiene el espectro.

Cuando empieza a llenarse el depósito de acumulación se inicia el estado a. En ese instante se activa un contador de tiempo, que registra el tiempo que tarda en llenarse el depósito de acumulación. El tiempo transcurrido en el llenado se denomina *tiempo de llenado*, y se representa por t_a . Debido a que durante el proceso de llenado los descendientes del radón se están desintegrando (poseen un periodo de semidesintegración del orden de 20 minutos), la actividad específica va disminuyendo progresivamente. Por este motivo, si el tiempo de llenado es superior a un valor fijado, $t_{a_{max}} = 600$ s, el depósito de acumulación se vacía, el agua se vierte en el depósito de almacenamiento, y se inicia una nueva colección de agua, fijando de nuevo el contador de t_a a cero.

Cuando finaliza el proceso de llenado del depósito de acumulación, el sistema pasa al estado b. En ese instante, se inicia un nuevo contador de tiempo que registra el tiempo de acumulación, t_b , que representa el tiempo transcurrido desde el llenado completo del depósito de acumulación hasta que el agua es vertida al recipiente de recuento. Este contador de tiempo es útil ya que ciertas ocasiones, en función de la tasa de lluvia, cuando se llena por completo el depósito de acumulación el agua no puede pasar al recipiente de recuento debido a que éste aún se encuentra en proceso de medida de la muestra de agua anterior. Entonces la muestra de agua recogida deberá esperar en el depósito de acumulación hasta que el sistema termine de realizar el análisis de la muestra de agua anterior. Si t_b es superior a un valor máximo fijado $t_{b_{max}} = 400$ s, el agua es vertida al depósito de almacenamiento, el contador de tiempo se pone a cero, $t_b = 0$ y se inicia una nueva colección de agua de lluvia.

Cuando el sistema está listo para empezar a realizar el análisis de la muestra que se encuentra en el depósito de acumulación, se detiene el contador de tiempo t_b , el agua se trasvasa al recipiente de recuento (el tiempo de paso del agua entre depósitos es del orden de 5 segundos), y se inicia el estado c. Se activa un nuevo contador de tiempo que registra el tiempo que transcurre durante la obtención del espectro de la muestra de agua de lluvia. Este tiempo se denomina tiempo de recuento, y se representa por t_c . Por lo general, el tiempo de recuento es $t_c = 600$ segundos, y se fija mediante el sistema de espectrometría gamma.

Cuando termina el proceso de obtención del espectro, se abre la válvula V5, y el agua pasa al depósito de almacenamiento. Si durante el proceso de recuento el depósito de acumulación

se ha llenado, el agua de lluvia recogida se vierte en el recipiente de recuento y se inicia un nuevo análisis del agua de lluvia.

3.2.3. Método de cálculo de la actividad específica del agua de lluvia

En este apartado se describen las ecuaciones que permiten calcular la actividad específica de los descendientes del radón, ^{214}Pb y ^{214}Bi , en el agua de lluvia en función del tiempo transcurrido desde que se recoge la muestra de agua, hasta que se obtiene el espectro de la muestra. Para simplificar el modelo se ha considerado que la concentración de ^{218}Po es muy inferior a la concentración de ^{214}Pb y ^{214}Bi por lo que no se ha incluido en las ecuaciones. Esta aproximación la podemos realizar debido a que el periodo de semidesintegración del ^{218}Po es de unos 3 minutos, valor muy inferior al de sus dos descendientes inmediatos. Si consideramos que la mayor parte de la carga radiactiva del agua de lluvia proviene de la nube, cuando las gotas llegan al suelo o en este caso al recipiente de recuento SARAC, la concentración de ^{218}Po será prácticamente nula si la comparamos con la del ^{214}Pb o la del ^{214}Bi que tienen periodos de semidesintegración de 26 minutos y 20 minutos respectivamente.

Nomenclatura

$$i = 1 \rightarrow ^{214}\text{Pb}$$

$$i = 2 \rightarrow ^{214}\text{Bi}$$

$\lambda_i \equiv$ Constante de semidesintegración del radionucleido i , expresada en segundos.

$I \equiv$ Intensidad de lluvia. Las unidades empleadas son litros/s.

$N_i \equiv$ Concentración del radionucleido i en el agua de lluvia, expresado en núcleos/litro.

$N_{k_i}(t) \equiv$ Núcleos totales del elemento i , en el instante t , en el estado k ($k = a, b, c$).

Ecuaciones que determinan la evolución de los radionucleidos en el agua de lluvia

(a) Llenado del depósito de acumulación Se supone una tasa de lluvia, I (litros/s), constante durante todo el tiempo, t_a , de llenado del depósito. Se supone también que durante dicho proceso de llenado, la concentración de núcleos del elemento i , N_i , en el agua de lluvia es constante, y que en el instante inicial $t = 0$ no existen núcleos de dicho elemento i en el depósito de acumulación. Las ecuaciones diferenciales que reproducen la variación temporal de núcleos son las siguientes,

$$\begin{cases} dN_{a_1}(t) = IN_1 dt - \lambda_1 N_{a_1}(t) dt & ; N_{a_1}(0) = 0 \\ dN_{a_2}(t) = IN_2 dt + \lambda_1 N_{a_1}(t) dt - \lambda_2 N_{a_2}(t) dt & ; N_{a_2}(0) = 0 \end{cases} \quad (3.44)$$

(b) Espera en el depósito de acumulación Una vez se ha llenado el depósito de acumulación, el agua de lluvia permanece durante un cierto tiempo, t_b , antes de pasar al depósito de recuento. El número de núcleos iniciales del elemento i , $N_{b_i}(t=0)$, será igual al número de núcleos finales de dicho elemento cuando termina de llenarse el depósito de acumulación. Las ecuaciones correspondientes se detallan en .

$$\begin{cases} dN_{b_1}(t) = -\lambda_1 N_{b_1}(t)dt & ; N_{b_1}(0) = N_{a_1}(t_a) \\ dN_{b_2}(t) = \lambda_1 N_{b_1}(t)dt - \lambda_2 N_{b_2}(t)dt & ; N_{b_2}(t=0) = N_{a_2}(t_a) \end{cases} \quad (3.45)$$

(c) Recuento en el depósito de medida Durante el proceso de recuento en el depósito Marinelli, los descendientes del radón presentes en el agua de lluvia sufren un proceso de desintegración radiactiva. El número de cuentas totales, N_{T_i} , obtenidas durante el tiempo de recuento, t_c , para el radionucleido i se obtendrá a partir de la expresión 3.46,

$$N_{T_i} = \int_0^{t_c} \lambda_i N_{c_i}(t) Y_i \eta_i \frac{1}{V} dt \quad ; \quad N_{c_i}(0) = N_{b_i}(t_b) \quad (3.46)$$

siendo,

Y_i = Fracción de fotones producidos con la energía correspondiente al fotopico analizado, respecto a las desintegraciones totales, para el radionucleido i . Sus unidades son fotones/desintegración.

η_i = Eficiencia fotónica de detección por unidad de volumen de agua del recipiente de detección para el radionucleido i . Sus unidades son $\frac{\text{litros} \times \text{cuentas/s}}{\text{fotones/s}}$.

V = Volumen de agua en el recipiente de recuento. Unidades en litros.

Resolución de los sistemas de ecuaciones

(a) Llenado del depósito de acumulación Si resolvemos el sistema de ecuaciones, 3.44, se obtienen las expresiones 3.47 y 3.48 correspondientes al número de núcleos de los descendientes del radón en el agua del depósito de acumulación cuando termina el proceso de llenado ($t = t_a$)

$$N_{a_1}(t_a) = IN_1 A_1(t_a) \quad (3.47)$$

$$N_{a_2}(t_a) = IN_2 A_2(t_a) + IN_1 A_3(t_a) \quad (3.48)$$

siendo

$$A_1(t_a) = \frac{1 - e^{-\lambda_1 t_a}}{\lambda_1} \quad (3.49)$$

$$A_2(t_a) = \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_a}}{\lambda_2} \quad (3.50)$$

$$A_3(t_a) = \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_a}}{\lambda_2} + \frac{e^{-\lambda_1 t_a} - e^{-\lambda_2 t_a}}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (3.51)$$

(b) Espera en el depósito de acumulación Resolviendo el sistema de ecuaciones, 3.45, se obtienen las expresiones 3.52 y 3.53 correspondientes al número de núcleos de los descendientes del radón en el agua del depósito de acumulación cuando finaliza el tiempo de espera, ($t = t_b$), justo antes de vaciar su contenido al depósito de recuento.

$$N_{b_1}(t_b) = IN_1 B_1(t_a, t_b) \quad (3.52)$$

$$N_{b_2}(t_b) = IN_1[A_1(t_a)B_2(t_b) + A_3(t_a)B_3(t_b)] + IN_2 A_2(t_a)B_3(t_b) \quad (3.53)$$

siendo

$$B_1(t_a, t_b) = A_1(t_a)e^{-\lambda_1 t_b} \quad (3.54)$$

$$B_2(t_b) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t_b} - e^{-\lambda_2 t_b}) \quad (3.55)$$

$$B_3(t_b) = e^{-\lambda_2 t_b} \quad (3.56)$$

(c) Recuento en el depósito de medida Integrando la expresion 3.46, para $i = 1$ e $i = 2$, se obtienen las expresiones 3.57 y 3.58 que representan las cuentas totales que se obtendrán con el sistema de espectrometría gamma, y que corresponden al área del fotopico del espectro obtenido para la energía de los fotones de interés. Como puede observarse, las expresiones obtenidas son independientes del volumen de agua y de la intensidad de lluvia, ya que están relacionadas con el tiempo de acumulación de agua mediante la expresión $I = \frac{V}{t_a}$.

$$N_{T_1} = Y_1 \eta_1 N_1 B_1(t_a, t_b) \left(1 - e^{-\lambda_1 t_c}\right) \frac{1}{t_a} \quad (3.57)$$

$$N_{T_2} = Y_2 \eta_2 \frac{\lambda_2}{t_a} [(A_1(t_a)C_1(t_c) + C_3(t_a, t_c)C_2(t_c))N_1 + N_2 C_4(t_a, t_c)C_2(t_c)] \quad (3.58)$$

con

$$C_1(t_c) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_1 t_c}}{\lambda_1} - \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_c}}{\lambda_2} \right) \quad (3.59)$$

$$C_2(t_c) = \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_c}}{\lambda_2} \quad (3.60)$$

$$C_3(t_a, t_b) = A_1(t_a)B_2(t_b) + A_3(t_a)B_3(t_b) \quad (3.61)$$

$$C_4(t_a, t_b) = A_2(t_a)B_3(t_b) \quad (3.62)$$

La actividad específica del radionucleido i en el agua de lluvia, A_{e_i} , se puede expresar mediante $A_{e_i} = \lambda_i N_i$. Si reagrupamos los términos de las expresiones 3.57 y 3.58, expresando N_1 y N_2 en función del resto de variables y multiplicando por λ_1 y λ_2 respectivamente, se obtienen las expresiones 3.63 y 3.64 que corresponden a la actividad específica del agua de lluvia al inicio del estado a.

$$A_{e_1} = \frac{\lambda_1}{1 - e^{-\lambda_1 t_c}} \frac{N_{T_1} t_a}{Y_1 \eta_1 B_1(t_a, t_b)} \quad (3.63)$$

$$A_{e_2} = N_{T_2} \frac{t_a}{Y_2 \eta_2 C_2 C_4} - N_{T_1} \frac{C_3 \lambda_2 t_a}{C_4 Y_1 \eta_1 B_1(t_a, t_b) (1 - e^{-\lambda_1 t_c})} - \frac{A_1 C_1 \lambda_2}{C_2 C_4} \quad (3.64)$$

3.2.4. Calibración del equipo SARAC. Determinación de la eficiencia de detección.

Para calcular la actividad específica del ^{214}Pb y el ^{214}Bi mediante las expresiones 3.63 y 3.64 respectivamente, es necesario conocer el valor de la eficiencia fotónica de detección por unidad de volumen del agua de lluvia del recipiente de recuento, representada por η_i . Este parámetro que depende de la geometría del recipiente de recuento y de la energía de la radiación gamma, relaciona la tasa de recuento obtenida con el sistema de espectrometría gamma para una energía determinada, con la actividad fotónica específica de la fuente de radiación.

Para determinar la eficiencia fotónica para los descendientes del radón emisores de radiación gamma, sería ideal disponer de una muestra de agua con una actividad específica conocida, introducirla en el recipiente de recuento, y obtener el espectro de la muestra en las mismas condiciones que las que existen durante la operación normal del equipo SARAC. Debido a que no se dispone de una fuente que cumpla estos requisitos, para la calibración se ha empleado una disolución que contiene una mezcla de diversos emisores de radiación gamma, denominada, *disolución patrón*, de actividad específica conocida, junto con una reproducción del

recipiente de recuento, denominado *recipiente de calibración*, cuyas dimensiones son idénticas que el recipiente de recuento empleado en la operación normal del equipo. Se emplea este recipiente en lugar del recipiente de recuento original, debido a que la disolución patrón podría contaminar dicho recipiente e inutilizarlo para la medida de bajas actividades. El conjunto formado por el recipiente de calibración conteniendo la disolución patrón lo denominaremos *patrón de calibración*.

Descripción de la disolución patrón del equipo SARAC

Para la obtención de la disolución patrón del equipo SARAC se utilizó una disolución patrón suministrada por *Amersham* (ver tabla 3.8), con certificado QCY48, que denominaremos disolución patrón original, e identificaremos con el subíndice 0.

Antes de realizar la disolución patrón del equipo SARAC, se obtuvo un disolución patrón previa a partir de una masa $M_0 = 2,6420 \text{ g} \pm 10^{-4} \text{ g}$ de la disolución patrón original. Esta masa M_0 de disolución original se diluyó con ácido clorhídrico 4 molar (HCl 4M), obteniéndose una masa $M_1 = 106,1 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de disolución previa. Si la intensidad fotónica del patrón original para los fotones emitidos por el radionucleido i era $I_0 (\gamma \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1})$, con una incertidumbre σ_{I_0} , la intensidad fotónica de la disolución previa será, I_1 , y su incertidumbre σ_{I_1} , que se calculan mediante la expresión 3.65,

$$I_1 = I_0 \frac{M_0}{M_1} \quad , \quad \sigma'_{I_1} = \sqrt{\sigma'_{I_0}{}^2 + \sigma'_{M_0}{}^2 + \sigma'_{M_1}{}^2} \quad , \quad (3.65)$$

donde σ'_{I_0} , σ'_{I_1} , σ'_{M_0} , y σ'_{M_1} representan la incertidumbre relativa de las variables I_0 , I_1 , M_0 , y M_1 respectivamente.

Transcurrido un cierto tiempo t desde la fecha de referencia de la disolución patrón original, la intensidad fotónica variará según la expresión 3.66, siendo λ el periodo de semidesintegración del radionucleido en cuestión, e $I_1(t)$ la intensidad fotónica del patrón previo transcurrido el tiempo t . La incertidumbre asociada a dicha intensidad fotónica se expresará mediante 3.67,

$$I_1(t) = I_1 e^{-\lambda t} \quad , \quad (3.66)$$

$$\sigma'_{I_1(t)} = \lambda t \sqrt{\frac{\sigma'_{I_1}{}^2}{\lambda^2 t^2} + \sigma'_t{}^2 + \sigma'_\lambda{}^2} \quad , \quad (3.67)$$

siendo σ'_t la incertidumbre relativa del tiempo, y σ'_λ la incertidumbre relativa del periodo de semidesintegración.

La disolución patrón del equipo SARAC se obtuvo a partir de 5 cm^3 de la disolución previa, cuya masa era $M_2 = 5.1358 \text{ g} \pm 0.0001 \text{ g}$, que se mezcló con HCl 4M hasta alcanzar una masa $M_3 = 294.5 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$. La intensidad fotónica de la nueva disolución, que llamaremos disolución patrón final, la representamos por I_2 , y se obtiene a partir de la expresión 3.68,

$$I_2 = I_1' \frac{M_2}{M_3} \quad , \quad \sigma'_{I_2} = \sqrt{\sigma'_{I_1}{}^2 + \sigma'_{M_2}{}^2 + \sigma'_{M_3}{}^2} \quad , \quad (3.68)$$

En la tabla 3.8 se indica el valor de la intensidad fotónica por unidad de masa y unidad de volumen de la muestra patrón del equipo SARAC, calculada para el día 28 de julio de 1998.

En la tabla 3.9 se indican los valores de la eficiencia fotónica por unidad de masa de la disolución patrón final, y la eficiencia fotónica por unidad de volumen, obtenida a partir de la anterior considerando que la densidad de la disolución es $1,027 \text{ g/cm}^3 \pm 0,006 \text{ g/cm}^3$.

Radio-nucleido, <i>i</i>	Energía <i>E_j</i> (keV)	Periodo λ_i (años)	Intensidad fotónica patrón Amersham, <i>I</i> ₀ (1/11/1996) ($\gamma \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	Intensidad fotónica patrón SARAC, <i>I</i> ₂ (28/07/1998) ($\gamma \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$) ($\gamma \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{l}^{-1}$)	
²⁴¹ Am	59.54	432	1083 ± 23	4,7x10 ⁻¹ ± 0,1x10 ⁻¹ 482 ± 11	
¹⁰⁹ Cd	88.03	1.26	632 ± 23	1,07x10 ⁻¹ ± 0,04x10 ⁻¹ 110 ± 4	
⁵⁷ Co	122.1	0.74	554 ± 11	4,9x10 ⁻² ± 0,1x10 ⁻² 50 ± 1	
¹³⁹ Ce	165.9	0.38	692 ± 10	1,28x10 ⁻² ± 0,04x10 ⁻² 13,1 ± 0,4	
²⁰³ Hg	279.2	0.13	1923 ± 42	7,4x10 ⁻⁵ ± 0,6x10 ⁻⁵ 0,076 ± 0,006	
¹¹³ Sn	391.7	0.32	2047 ± 94	2,0x10 ⁻² ± 0,1x10 ⁻² 21 ± 1	
⁸⁵ Sr	514	0.18	3858 ± 85	2,1x10 ⁻³ ± 0,1x10 ⁻³ 2,1 ± 0,1	
¹³⁷ Cs	661.7	30.1	2405 ± 53	1,00 ± 0,02 1031 ± 24	
⁸⁸ Y	898	0.29	6117 ± 165	4,5x10 ⁻² ± 0,2x10 ⁻² 46 ± 2	
⁶⁰ Co	1173	5.27	3251 ± 20	1,130 ± 0,007 1157 ± 10	
⁶⁰ Co	1332.5	5.27	3253 ± 20	1,130 ± 0,007 1158 ± 10	
⁸⁸ Y	1836	0.29	6483 ± 175	4,8x10 ⁻² ± 0,2x10 ⁻² 49 ± 2	

Cuadro 3.8: Composición e intensidad fotónica de la disolución patrón para la calibración del equipo SARAC.

Proceso de calibración del equipo SARAC

Para calibrar el equipo SARAC se retira el recipiente de recuento del interior del blindaje y en su lugar se sitúa el recipiente de calibración que contiene la disolución de calibración.

Posteriormente se procede a obtener un espectro siguiendo el mismo procedimiento que se emplea para la medida del agua de lluvia cuando se encuentra en el recipiente de recuento.

Al analizar el espectro, se obtiene N_{i,E_j} , que representa la área cubierta por el fotopico correspondiente a la detección de los fotones de energía E_j emitidos por el radionucleido i del patrón de calibración, una vez eliminadas las cuentas debidas al fondo. La tasa de recuento correspondiente a fotones de energía E_j emitidos por el radionucleido i del patrón de calibración, representada por \dot{N}_{i,E_j} , se calculará a partir del cociente entre el área del fotopico y el tiempo de recuento, t_c (expresión 3.69)

$$\dot{N}_{i,E_j} = \frac{N_{i,E_j}}{t_c} \quad (3.69)$$

La eficiencia fotónica, η_{i,E_j} , se calculará mediante la expresión 3.70, siendo I_{i,E_j} la intensidad fotónica específica de la radiación gamma de energía E_j , emitida por el radionucleido i del patrón de calibración, que en la tabla 3.8 y la expresión 3.68 se ha representado por I_2 ,

$$\eta_{i,E_j}(\gamma \cdot \text{s}^{-1}/\text{cps}) = \frac{I_{i,E_j}(\gamma \cdot \text{s}^{-1})}{\dot{N}_{i,E_j}(\text{cps})}. \quad (3.70)$$

La incertidumbre relativa asociada a la eficiencia fotónica, $\sigma'_{\eta_{i,E_j}}$, se obtiene a partir de la expresión 3.71, siendo $\sigma'_{N_{i,E_j}}$ la incertidumbre relativa de la tasa de recuento, y $\sigma'_{I_{i,E_j}}$ la incertidumbre relativa de la intensidad fotónica de la disolución.

$$\sigma'_{\eta_{i,E_j}} = \sqrt{\sigma'^2_{N_{i,E_j}} + \sigma'^2_{I_{i,E_j}}} \quad (3.71)$$

Periódicamente se realiza una calibración del sistema de detección con el fin de evaluar posibles variaciones en la eficiencia de detección. En la figura 3.15 se puede observar un espectro de calibración obtenido el día 2 de octubre del año 1998. Aunque para la obtención de dicho espectro se empleó un tiempo de recuento de 132840 segundos (~ 36.9 horas), sólo se aprecian de forma significativa los fotones emitidos por los radionucleidos de vida larga, y los radionucleidos de vida corta son inapreciables (por ejemplo ^{203}Hg). En la tabla 3.9 se indican los resultados obtenidos en la determinación de la eficiencia fotónica de la radiación emitida por el patrón de calibración, correspondientes a los datos del espectro de la figura anterior.

Con el procedimiento anterior sólo se obtienen las eficiencias de detección para unas energías determinadas. Si se representa gráficamente la eficiencia fotónica de detección en función de la energía de la radiación gamma (figura 3.16), se observa que puede ajustarse a una expresión de tipo potencial. De este modo será posible determinar la eficiencia fotónica de detección para fotones de cualquier energía comprendida entre 100 keV y 1.4 MeV mediante la expresión 3.72, donde η_i se expresa en unidades de $\gamma \text{s}^{-1} \text{cm}^{-3}$ por cps, y E en unidades de keV.

$$\frac{1}{\eta_{i,E}} = 863E^{-0,833} \quad (3.72)$$

La actividad específica, $A_i(\text{Bq/l})$, de la disolución para el radioinucleido i se calculará mediante la expresión 3.73, donde Y_{i,E_j} es la abundancia relativa de fotones de energía E_j emitidos por el radionucleido i expresada en unidades de $\gamma \text{s}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1}$,

$$A_i(\text{Bq/l}) = \dot{N}_{i,E_j}(\text{cps}) \frac{\eta_{i,E_j}(\gamma \text{s}^{-1} \text{l}^{-1}/\text{cps})}{Y_{i,E_j}(\gamma \text{s}^{-1}/\text{Bq})} \quad (3.73)$$

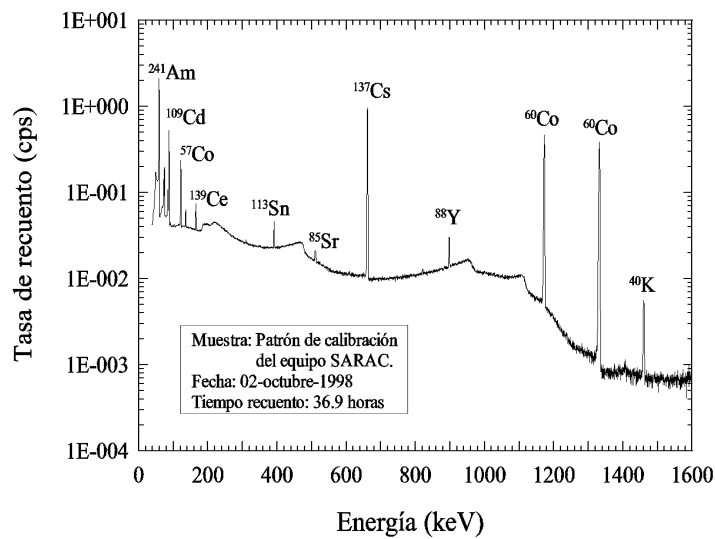


Figura 3.15: Espectro obtenido con el patrón de calibración del equipo SARAC, el día 2 de octubre de 1998, a las 20:58 horas. Tiempo de recuento: 36.9 horas. Se indican los radionucleidos responsables de los principales fotopicos del espectro.

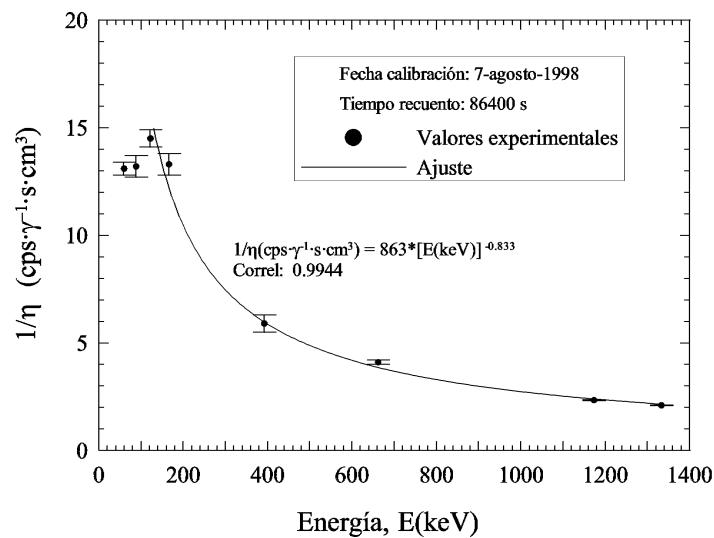


Figura 3.16: Relación entre el inverso de la eficiencia fotónica de detección del recipiente de recuento del equipo SARAC y la energía de la radiación gamma de la disolución patrón. Medidas realizadas el día 7 de agosto de 1998, para un volumen del patrón de calibración de 255 cm^3 .

Para calcular la actividad específica de los descendientes del radón emisores de radiación gamma, ^{214}Pb y ^{214}Bi , empleamos las expresiones 3.63 y 3.64 respectivamente. La eficiencia fotónica η_1 y η_2 se calcula a partir de la expresión 3.72 considerando las energías de los fotones emitidos $E_1 = 351 \text{ keV}$ y $E_2 = 609 \text{ keV}$ respectivamente.

Radionucleido	Energía E_j (keV)	Período (años)	Eficiencia fotónica η_{i,E_j} (Bq·l ⁻¹ cps)	Incertidumbre $\sigma_{\eta_{i,E_j}}$ (Bq·l ⁻¹ cps)
²⁴¹ Am	59.54	432	213	5
¹⁰⁹ Cd	88.03	1.26	2100	80
⁵⁷ Co	122.1	0.74	81	2
¹³⁹ Ce	165.9	0.38	94	4
²⁰³ Hg	279.2	0.13	—	—
¹¹³ Sn	391.7	0.32	263	18
⁸⁵ Sr	514	0.18	—	—
¹³⁷ Cs	661.7	30.1	284	7
⁸⁸ Y	898	0.29	481	24
⁶⁰ Co	1173	5.27	428	5
⁶⁰ Co	1332.5	5.27	477	6
⁸⁸ Y	1836	0.29	—	—

Cuadro 3.9: Eficiencia fotónica de detección del patrón de calibración del equipo SARAC calculada el día 27 de julio de 1998, para un tiempo de recuento de 1 hora.

Radionucleido	Energía (keV)	Abundancia (%)	LID (Bq/l)
²¹⁴ Pb	351.9	37.1	9 ± 1
¹³¹ I	364.48	81.2	7 ± 1
²¹⁴ Bi	609.3	46.1	9 ± 2
¹³⁷ Cs	661.67	85.2	5 ± 1
¹³⁵ I	1260.4	28.6	10 ± 2

Cuadro 3.10: Límite Inferior de Detección de diversos radionucleidos

Límite inferior de detección del equipo SARAC

Uno de los parámetros que caracteriza cualquier sistema de detección es el límite inferior de detección (en adelante LID) que fija el mínimo valor medible de la magnitud analizada. En el caso del equipo SARAC, se determina el LID correspondiente a la actividad específica del agua de lluvia de diversos radionucleidos de interés.

Cuando se realizan medidas de espectrometría gamma del fondo del equipo SARAC, el blindaje de que dispone no es suficiente para atenuar por completo la radiación gamma de natural que existe en el exterior del sistema de detección. Por este motivo, el espectro obtenido siempre muestra una tasa de recuento no nula para ciertas energías de la radiación gamma.

Para la determinación del LID de un determinado radionucleido i que emite fotones de energía E se realizó el siguiente procedimiento. En primer lugar se determinó un espectro de fondo durante el mismo intervalo de tiempo que durante la medida del agua de lluvia ($t = 600$ s), estando el recipiente de recuento vacío. Posteriormente se analizó el espectro obtenido y se determinó la tasa de recuento, \dot{N}_f , de fotones de energía E . El LID para el radionucleido i

se obtuvo mediante la expresión 3.74, donde $\eta_{i,E}$ corresponde a la expresión 3.72 y $Y_{i,E}$ es la abundancia relativa de fotones de energía E del radionucleido i ,

$$LID(\text{Bq/l}) = \dot{N}_f(\text{cps}) \frac{\eta_{i,E_j}(\gamma \text{ s}^{-1} \text{ l}^{-1} / \text{cps})}{Y_{i,E_j}(\gamma \text{ s}^{-1} / \text{Bq})}. \quad (3.74)$$

Siguiendo el procedimiento anteriormente descrito se ha analizado el LID de los siguientes radionucleidos: ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{137}Cs , ^{131}I . En la tabla 3.10 se pueden observar los resultados obtenidos.

3.3. Procedimiento de tratamiento y acondicionamiento de datos en la Estación ESCRA

3.3.1. Introducción

La estación ESCRA funciona en continuo las 24 horas al día durante todo el año, registrando variables meteorológicas y radiológicas en intervalos de 5 segundos, 30 segundos, 120 segundos o 1800 segundos en función de la variable considerada. Ello implica la generación de grandes volúmenes de datos meteorológicos y radiológicos que deben almacenarse en soporte informático para ser analizados con posterioridad y, de esta forma, extraer de ellos resultados que permitan conocer con más precisión los campos de radiación ionizante ambiental y su relación con las condiciones ambientales.

De lo expuesto anteriormente se puede deducir que el método de almacenamiento de datos y su tratamiento informático es muy importante para minimizar el espacio ocupado por la información y para facilitar el tratamiento informático y análisis posterior.

Para realizar el almacenamiento de los datos y su tratamiento, se dispone de un paquete de *software* desarrollado específicamente y que se describe en esta sección.

3.3.2. Procedimiento de almacenamiento de datos

Definimos el procedimiento de almacenamiento de datos como las tareas que se realizan desde que el sensor registra una variable meteorológica o radiológica, hasta que ésta se encuentra almacenada en un fichero definitivo. Cada variable meteorológica y radiológica lleva asociado un único fichero en formato ASCII. El nombre asignado a cada fichero está relacionado con su variable asociada, siendo el idioma empleado el inglés. De esta forma los nombres de los ficheros son los siguientes: PRESSURE.DAT para la presión atmosférica; TEMP.DAT para la temperatura ambiental; HUMIDITY.DAT para la humedad relativa; RAINRATE.DAT para la intensidad de lluvia; SUNRATE.DAT para la radiación solar; WIND.DAT para la dirección y velocidad del viento; RADON.DAT para la concentración de radón ambiental; ALPHA.DAT para la concentración de emisores de radiación alfa en el aire; BETA.DAT para la concentración de emisores beta en el aire; DOSERATE.DAT para la tasa de dosis ambiental registrada por la sonda FHZ601A; REUTER.DAT para tasa de dosis ambiental registrada por la cámara de ionización Reuter-Stokes.

Durante el proceso de almacenamiento de datos, estos pasarán por diversos estados o niveles en función del tratamiento que hayan sufrido. De esta forma, los datos se clasifican en datos de **nivel A**, datos de **nivel B**, y datos de **nivel C**.

Datos Nivel A. Son los datos generados directamente por los sensores de medida y que se almacenan en el PC-ESCRA1. La información contenida en los ficheros de nivel A incluye tanto datos válidos como información errónea debido a posibles problemas en el funcionamiento de los sensores o equipos asociados.

- Formato de los ficheros meteorológicos: Están constituidos por una primera columna que contiene el tiempo expresado en segundos a contar desde el 1 de enero de 1970 (inicio de tiempo del compilador de Turbo C de Borland) hasta el instante en que se ha registrado la variable; una segunda columna que contiene el valor de la variable meteorológica expresada en las unidades meteorológicas correspondientes; una tercera columna que contiene el valor de la variable eléctrica generada por el sensor meteorológico. Existe una excepción a este formato en el caso del fichero WIND.DAT que contiene la velocidad y dirección del viento. En este caso se dispone de un total de 5 columnas. La primera contiene el tiempo expresado en segundos al igual que en la descripción anterior, la segunda y tercera columna contienen respectivamente la velocidad del viento expresada en metros por segundo y la señal eléctrica expresada generada por el anemómetro. La cuarta columna contiene la dirección de procedencia del viento expresada en grados y la quinta columna contiene el valor de la señal eléctrica expresada en ohms.
- Formato de los ficheros radiológicos: Al igual que los ficheros meteorológicos están constituidos por una primera columna con el tiempo expresado en segundos. El formato del resto de columnas depende de la variable medida. En el caso de la tasa de dosis (DOSERATE.DAT Y REUTER.DAT), sólo existe una segunda columna que contiene directamente la tasa de dosis expresada en unidades de $\mu\text{Gy/h}$. En el caso de la concentración de radón, existen tres columnas adicionales: la segunda corresponde a la tasa de recuento de pseudocoincidencia expresada en cps, la tercera la tasa de recuento de partículas alfa expresada en cps, y la cuarta la concentración de radón expresada en Bq/m^3 . En el caso de la concentración de partículas alfa y partículas beta, la segunda columna contiene la tasa de recuento de pseudocoincidencia, la tercera la tasa de recuento de partículas alfa o beta expresada en cps y la cuarta columna la concentración de partículas alfa o beta expresada en Bq/m^3 .

Las medidas de presión atmosférica, temperatura, humedad relativa y radiación solar son almacenadas en los ficheros correspondientes de nivel A cada 120 segundos. Por lo que respecta a la intensidad de lluvia, se registra cada 30 segundos, y la y la dirección y velocidad del viento se registran cada 5 segundos. Debido al corto intervalo de tiempo entre datos, el tamaño de los ficheros obtenidos es de unos 35 MBytes por mes. Para reducir su tamaño, eliminar datos erróneos e identificar periodos de ausencia de datos se aplica un procedimiento que utiliza unas herramientas informáticas específicamente diseñadas para este fin, y que se describen en el apartado 3.3.3.

Datos tipo B Los datos de tipo B constituyen un estado intermedio entre los datos iniciales y los definitivos. Se obtienen a partir de los ficheros de nivel A una vez se han eliminado los datos erróneos y marcado los intervalos de tiempo sin datos. Las líneas con datos erróneos no son eliminadas completamente sino que son comentadas con la combinación de caracteres /* al principio y */ al final de la línea. De esta forma se puede recuperar la información eliminada si es necesario. Los saltos temporales se marcan con un número muy pequeño: $-1.0\text{E}+15$. En general, los datos se almacenan definitivamente en intervalos mensuales, de forma que a cada mes le corresponda un conjunto de ficheros de datos. Debido a que los datos de los ficheros de nivel A no empiezan ni terminan al principio y final del mes que les corresponde, para generar los ficheros de nivel B es necesario utilizar los datos de nivel A de dos meses consecutivos. De esta forma los ficheros de nivel B contienen los datos registrados desde el principio hasta el

final de cada mes con la misma cadencia temporal que los datos de nivel A, pero sin datos erróneos y con los saltos temporales marcados.

Los ficheros con datos de nivel B se almacenan de forma temporal durante el proceso de tratamiento de datos, siendo eliminados una vez se generados los ficheros definitivos.

Datos tipo C Representan los datos definitivos que se utilizarán para realizar el análisis de la información meteorológica y radiológica. Se obtienen a partir de los datos de nivel B mediante la media de los valores registrados durante un intervalo de tiempo fijado, que en general es de 600 segundos, excepto el caso de la intensidad de lluvia que es de 300 segundos. Por lo que respecta a los datos radiológicos, el único proceso aplicado a los datos de nivel B consiste en la sincronización con el principio del mes. El cálculo de la dirección y velocidad media del viento se realiza a partir de la media vectorial. El módulo de cada vector está representado por la velocidad del viento y su orientación por la dirección del viento.

Formato de los ficheros de datos

- Formato de los ficheros meteorológicos: Están formados por dos columnas. La primera contiene el tiempo en unidades de segundos (ver datos tipo A), y la segunda columna contiene el valor medio de la variable medida. La única excepción la constituye el fichero de velocidad y dirección del viento que contiene tres columnas, la primera para la variable temporal, la segunda para la velocidad del viento, y la tercera para la dirección del viento.
- Formato de los ficheros radiológicos: Es el mismo que los datos de nivel A.

3.3.3. Software de tratamiento de datos

Se ha diseñado un software para el tratamiento de los ficheros de datos. Está constituido por un conjunto de aplicaciones escritas en Turbo C compiladas en un entorno DOS. Para ejecutarlas es necesario teclear el nombre de la aplicación desde la línea de comandos, seguida de las opciones correspondientes. A continuación se enumera el conjunto de aplicaciones y una breve descripción de su utilidad y funcionamiento. Algunas de estas aplicaciones se emplean para realizar el paso de los ficheros del nivel A al B y del nivel B al C y otras para el análisis posterior de los datos una vez se encuentran en el nivel C.

- **EXTRACT.C** Extrae la columna especificada del fichero de datos de entrada y la almacena en el fichero de salida.
- **FILTERD.C** Crea un nuevo fichero con los datos del fichero de entrada pero las filas que tienen datos anómalos están comentadas. Por datos anómalos se entiende aquellos cuyo valor excede unos límites fijados.
- **GLUE.C** Une dos ficheros que contienen datos del mismo periodo de tiempo. Sólo se consideran los datos que coinciden temporalmente (dentro de la tolerancia especificada).

- GRAPHCUT.C Selecciona los datos de un fichero de acuerdo con un intervalo de tiempo especificado. Existe de la posibilidad, de forma opcional, de añadir una nueva columna con una unidad de tiempo adicional.
- MEAN.C Genera un fichero con el valor medio de los datos del fichero de entrada, registrados durante el intervalo de tiempo especificado en la línea de comandos.
- PRIMAMET.C Realiza una primera validación de los datos meteorológicos. Busca saltos en el registro de datos, sincroniza los datos y calcula la media del intervalo de tiempo especificado.
- PRIMARAD.C Realiza una primera validación de los datos radiológicos. Únicamente busca saltos en el registro de datos.
- TIMECONV.C Convierte una fecha en segundos según el convenio /T=0 s el 1/1/1970 a las 0:00 h) y también convierte tiempo expresado en segundos a una fecha (según el convenio anterior).
- TRANSFRM.C Transforma una columna de un fichero. La columna puede ser multiplicada, sumada, dividida o restada por un valor introducido en la línea de comandos.
- windconv.c Convierte la velocidad y dirección del viento a coordenadas rectangulares.
- windsig.c Calcula el valor medio y la desviación standard de un fichero de viento (WIND.DAT) de nivel A.
- MINMAX.C Determina los valores máximo y mínimo de un fichero de datos.

