



Máster Universitario
Investigación en Química
Universidad Zaragoza



Caracterización de un contador proporcional de flujo gas para la determinación de contenido alfa y beta en muestras ambientales.

Comparación de resultados con otras técnicas.

Patricia Sánchez Alonso
Trabajo Fin de Máster
Máster en Investigación en Química
Curso 2012-2013

ÍNDICE

1.	Resumen	1
2.	Introducción.....	2
3.	El LABAC y la Vigilancia Radiológica Ambiental en España.....	3
3.1.	Objetivos del trabajo	4
4.	Descripción del contador proporcional	5
4.1.	Principios de la medida simultánea alfa/beta	6
5.	Preparación de patrones y fondos.....	8
5.1.	Reactivos.....	8
5.2.	Patrones para determinar la eficiencia	8
5.3.	Preparación de fondos	8
5.4.	Preparación de patrones para las curvas de autoabsorción	9
5.5.	Patrones para la curva de autoabsorción beta	9
5.6.	Patrones para la curva de autoabsorción alfa.....	10
6.	Estudios realizados	10
6.1.	Determinación de la curva característica	10
6.2.	Determinación de eficiencias y fondos	12
6.3.	Determinación del "spillover"	13
6.4.	Determinación de la curva de autoabsorción para la medida del índice de actividad beta total.....	14
6.5.	Determinación de la curva de autoabsorción para la medida del índice de actividad alfa total	15
7.	Ánálisis de muestras ambientales (suelo)	16
8.	Comparación de los valores obtenidos con otras técnicas	17
8.1.	Contador de centelleo sólido para medida de alfa total.....	17
8.2.	Medida de muestras de suelo	18
8.3.	Cálculos para la obtención de resultados.....	22
8.3.1.	Índice de actividad beta total.....	22
8.3.2.	Índice de actividad alfa total	24
9.	Conclusiones	25
10.	Bibliografía	27
11.	ANEXO	29

1. Resumen

El procedimiento habitual para la determinación de los índices de actividad alfa total y beta total en suelos, consiste en depositar una determinada cantidad de muestra sobre una plancheta de acero inoxidable, disolver con ácido nítrico y llevar a sequedad. La posterior medida se realiza mediante un sistema de centelleo sólido de ZnS(Ag) (medida del índice de actividad alfa total) o un contador proporcional (medida de los índices de actividad alfa y/o beta total). En este trabajo se presenta la puesta a punto del contador proporcional de muy bajo fondo (Berthold LB 770 B) para la medida simultánea de los índices de actividad alfa total y beta total. Para ello se han determinado fondos, eficiencias, "spillover" y voltajes óptimos de trabajo para la medida en modo simultáneo. El modo simultáneo de contaje presenta características similares al secuencial, pero se seleccionó este modo de trabajo porque permite obtener resultados análogos en la mitad de tiempo. Además se determinaron, las curvas de autoabsorción para cada uno de los índices (alfa y beta) y se midieron una serie de muestras ambientales (suelo) recogidas en diferentes puntos de la geografía aragonesa que se compararon con valores obtenidos en otro equipo de características similares más antiguo y en un sistema de centelleo sólido de ZnS(Ag) para la medida del índices de actividad alfa total. Se obtuvieron resultados similares con cada uno de los equipos, aunque la incertidumbre y la actividad mínima detectable obtenida en el caso del contaje alfa fue superior con el contador proporcional.

2. Introducción

La radiactividad es un fenómeno que está presente de forma natural en nuestro planeta y forma parte de nuestro entorno. El ambiente en el que vivimos, los materiales que nos rodean, el aire, el agua, los seres vivos, el propio cuerpo humano son, en mayor o menor grado, radiactivos. Esto no significa que estemos en un ambiente peligroso o nocivo, pero sí que debe ser controlado y vigilado porque la radiactividad ambiental no sólo tiene un origen natural, sino que puede tener también una contribución debida a la acción humana.

La radiactividad es una propiedad de ciertos elementos químicos cuyos núcleos atómicos son inestables: con el tiempo, el núcleo alcanza su estabilidad al producirse un cambio interno, llamado desintegración radiactiva, que implica el desprendimiento de energía en forma de "radiación".

La energía que interviene es muy grande si se compara con la desprendida en las reacciones químicas en que pueden intervenir las mismas cantidades de materiales, y el mecanismo por el cual se libera esta energía es totalmente diferente. El proceso radiactivo es una transición desde un estado inicial del núcleo de un átomo a un estado final del mismo, que se produce espontáneamente debido a que la energía total del sistema inicial es mayor que la del sistema final.

La radiactividad natural proviene o bien de los radionúclidos presentes en la corteza terrestre (K^{40} , U^{238} , Th^{232} , ...), o bien de los producidos por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera (H^3 , Be^7 , C^{14} , Na^{22} , ...). Por otro lado, la radiactividad artificial se produce por reacciones nucleares. Entre los radionúclidos producidos artificialmente (Sr^{90} , I^{131} , Cs^{137} , Fe^{55} , H^3 , Mn^{54} , Ru^{106} , Ba^{140} , ...) cabe destacar que por interacción o reacción nuclear se pueden crear cadenas radiactivas artificiales de evolución análoga a las series naturales

Para que un isótopo sea estable, éste no puede estar constituido por cualquier número de neutrones (N) y protones sino que existe una relación entre N y el número atómico (Z). Si los núcleos se disponen en orden de N y Z crecientes sobre un diagrama rectangular, de forma que todos los radionúclidos con el mismo N (isobaros) aparezcan a lo largo de líneas horizontales, y todos los radionúclidos con el mismo Z (isótopos) aparezcan en líneas verticales, se obtiene la 'carta de Segré' o diagrama neutrón-protón. En este diagrama, las líneas del número másico (A) constante, cortan a los ejes según ángulos de 45° . Para pequeños números másicos, los núcleos estables se agrupan alrededor de la línea $N = Z$, llamada línea de estabilidad en el plano $N-Z$.

Los núcleos radiactivos, con exceso de protones o neutrones, aparecen a la derecha o izquierda de esta línea y para conseguir la estabilidad emiten partículas alfa, beta (positivas o negativas) o rayos gamma. Fundamentalmente, existen pues, tres tipos de procesos radiactivos:

- a) Radiactividad α . La partícula emitida es un núcleo de Helio, formado por la asociación de dos protones y dos neutrones. La mayoría de los núcleos con $A > 150$ pueden presentar este tipo de proceso. Para núcleos más ligeros el proceso es muy improbable.
- b) Radiactividad β . El núcleo emite un electrón (β^-) o positrón (β^+). Este tipo de radiactividad se produce para cualquiera que sea el Z . Ciertos núcleos pueden ser a la vez emisores β^- y β^+ .
- c) Radiactividad γ . En cualquiera de los dos procesos radiactivos anteriores el núcleo producto puede quedar en un estado excitado. Esta excitación provoca la emisión de uno o varios fotones γ [1] [2].

3. El LABAC y la Vigilancia Radiológica Ambiental en España

El LABAC (Laboratorio de Bajas Actividades) forma parte de la Red de Vigilancia Radiológica Ambiental (REVIRA) creada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), cuya finalidad es llevar a cabo la evaluación y la vigilancia del impacto radiológico ambiental de las instalaciones nucleares y radiactivas, y vigilar la calidad radiológica del medio ambiente de todo el territorio nacional, en cumplimiento de las obligaciones del Estado español en esta materia. Los objetivos básicos del programa de vigilancia son los siguientes:

- Detectar la presencia y vigilar la evolución de elementos radiactivos y de los niveles de radiación en el medio ambiente, determinando las causas de los posibles incrementos.
- Estimar el riesgo radiológico potencial para la población.
- Determinar, en su caso, la necesidad de tomar precauciones o establecer alguna medida correctora.

Esta red de vigilancia nacional, está constituida por:

- La Red de Estaciones de Muestreo (REM), donde la vigilancia se realiza mediante programas de muestreo y análisis llevados a cabo por diferentes laboratorios, entre los que se encuentra el LABAC.
- La Red de Estaciones Automáticas (REA) de medida en continuo.

Para el desarrollo de los programas de vigilancia, cada laboratorio que forma parte de la REM lleva a cabo la recogida y análisis de diferentes muestras en las principales vías de

transferencia. A modo de resumen, en la siguiente tabla se muestran los tipos de muestras recogidos, la frecuencia y los análisis realizados para a cada una de ellas [3]:

Frecuencia recogida	Tipos de muestras REM		Tipo de análisis
Semanal	Aire	partículas de polvo	Espectrometría gamma
		yodo en aire	Espectrometría gamma, índice actividad beta total, índice de actividad alfa total
Mensual	Agua potable		Espectrometría gamma, índice actividad beta total, índice de actividad alfa total
Trimestral	Dieta tipo		Espectrometría gamma
	^{90}Sr Filtros en aire		Separación radiológica de ^{90}Sr y medida en contador proporcional alfa beta
	^{90}Sr Agua potable		Separación radiológica de ^{90}Sr y medida en contador proporcional alfa beta
	^{90}Sr Dieta tipo		Separación radiológica de ^{90}Sr y medida en contador proporcional alfa beta
Anual	Suelo		Espectrometría gamma, índice actividad beta total
	^{90}Sr Suelo		Separación radiológica de ^{90}Sr y conteo en contador proporcional alfa beta

3.1. Objetivos del trabajo

Como se observa en la tabla resumen anterior, para cada tipo de muestras se lleva a cabo una caracterización radiológica (contenido en emisores alfa, beta y gamma) por lo que es necesario tener los equipos bien caracterizados, para posteriormente obtener unos resultados precisos. De esta necesidad de caracterización nació el presente trabajo.

El control radiológico llevado a cabo por el CSN junto a los diferentes laboratorios que forman las redes, hace que desde hace más de 20 años se tenga un conocimiento del contenido radiológico de fondo del país, lo que puede servir para valorar variaciones significativas fuera de estos valores medios. Lo mismo ocurre con la medida de los índices de actividad alfa y beta total; su finalidad, es detectar de forma rápida cualquier posible cambio en los niveles de radiactividad ambiental y, en su caso, realizar análisis más específicos.

Los contadores proporcionales de flujo continuo de gas se utilizan para la determinación de los índices alfa y beta total. Así, estos equipos se utilizan para la determinación del contenido en ^{40}K , ^{89}Sr y ^{90}Sr de una muestra, entre otros muchos isótopos ya que son emisores de radiación beta.

Los objetivos del presente trabajo son:

- Determinar el voltaje de trabajo para la medida simultanea de radiación alfa y beta.
- Caracterizar los diez detectores que forman el equipo: determinar eficiencias, fondos y “spillover” para cada uno de ellos.
- Realizar las curvas de autoabsorción alfa y beta total para la medida de muestras de agua y suelos.
- Medida de diferentes muestras de suelo y comparación con otras técnicas (detector de centelleo sólido de ZnS(Ag)).

4. Descripción del contador proporcional

Los contadores proporcionales de gas son utilizados habitualmente para la medida de los índices de actividad alfa total y beta total a partir de una matriz que contiene emisores de ambos tipos. Dichos índices pueden determinarse con dos medidas a diferentes voltajes (medida en modo secuencial) o con una sola medida a un voltaje determinado (medida en modo simultáneo). En el presente trabajo la medida se realizará en modo simultáneo, con el fin de obtener medidas en el menor tiempo posible, ya que para la medida en modo secuencial es necesario realizar dos medidas (a diferentes voltajes) para obtener el índice alfa total y el beta total por separado.

Para estudiar y establecer las condiciones idóneas de los dos modos de medida en el contador proporcional es necesario determinar de su curva característica y su voltaje óptimo de trabajo. Este último se define como aquel valor de voltaje que proporciona la mejor figura de mérito (FM) que se define como:

$$FM = \frac{E^2}{F}$$

donde E es la eficiencia absoluta de contaje expresada en tanto por ciento y F son las cuentas totales del fondo (1).

Los contadores proporcionales de flujo gas permiten el contaje de muestras de muy baja actividad alfa y/o beta. El sistema utilizado (Berthold LB 770 B) en este trabajo, dispone del preamplificador LB 2025 que permite la separación alfa y beta y, por lo tanto, la medida simultánea de ambas radiaciones y 10 canales para la medida de diez muestras.



Sistema contador proporcional de flujo de gas LB 770 B

El cambiador está provisto de cinco bandejas con dos portamuestras cada una (Figura 2), con lo que pueden utilizarse de manera independiente dos detectores a la vez. El gas de ionización (P-10: 90% argón y 10% metano) fluye de forma continua.

El contador dispone de 10 tubos detectores ultraplanos dispuestos en dos filas de 5 unidades. Los detectores están rodeados por un blindaje de 10 cm de espesor de ladrillos de plomo (aproximadamente 650 kg) para atenuar la radiación gamma externa. Un sistema de anticoincidencias permite reducir el fondo ocasionado por los rayos cósmicos de más energía

Asociado al contador se encuentra una interface y un sistema de adquisición de datos (programa UMS) encargado de recoger y gestionar los datos proporcionados por esta última. Los resultados pueden ser impresos o enviados a un fichero para su posterior tratamiento.

4.1. Principios de la medida simultánea alfa/beta

Una partícula alfa que atraviesa un medio material produce mayor ionización específica que un electrón de la misma energía, y por lo tanto, una señal analógica mucho mayor debido a su mayor masa en reposo (aproximadamente unas 8000 veces). Este hecho se ha de tener en cuenta para entender el proceso de medida simultánea alfa/beta, ya que con un nivel de discriminación apropiado el contaje de ambos tipos de partículas puede ser separado.

El contador proporcional, en el modo de medida simultáneo, está provisto de dos ventanas: alfa y beta. La ventana alfa consta de dos discriminadores con diferentes umbrales de separación de impulsos: U_1 y U_2 , siendo $U_1 > U_2$. La ventana beta consta de un discriminador U_3 . Para un impulso de amplitud E generado en el contador de flujo de gas, el sistema de separación de impulsos alfa/beta actúa como sigue: el impulso se dirige tanto al discriminador alfa como al discriminador beta, si $E > U_1$ (umbral alto de la ventana alfa), el impulso será almacenado en la ventana alfa; si $E > U_2$ (umbral bajo de la ventana alfa), se manda una señal de supresión de dicho impulso al discriminador beta; y si $E > U_3$, entonces dicho impulso, si no ha sido suprimido por la señal enviada por el discriminador alfa, será almacenado en la ventana beta.

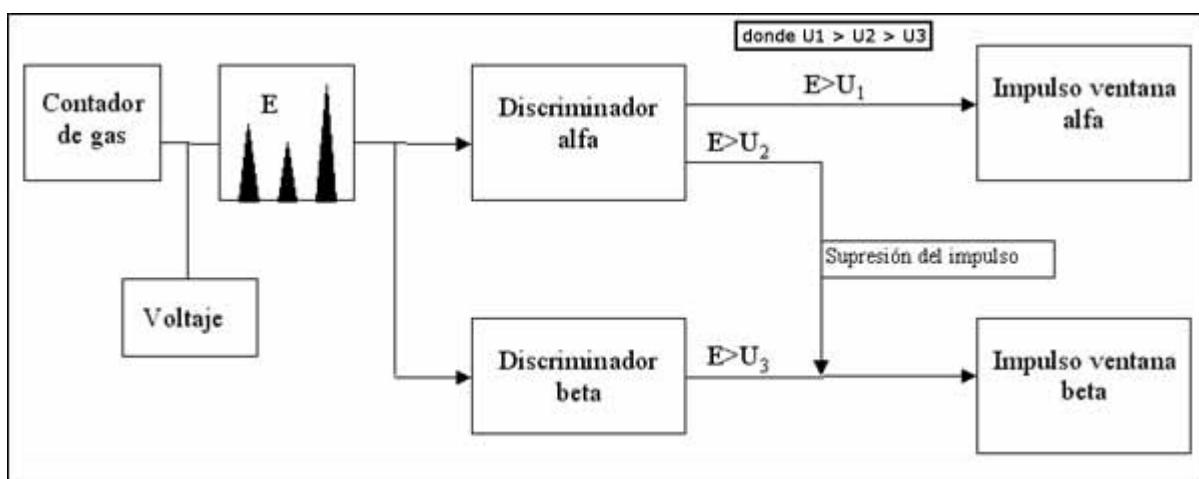


Diagrama funcional simplificado del discriminador alfa/beta del controlador proporcional LB 770 B

Sin embargo, con esta técnica, los impulsos alfa pueden encontrarse en la ventana beta y viceversa. A este fenómeno se le denomina "spillover". El valor del "spillover" en la ventana alfa o en la ventana beta necesita ser determinado para corregir de forma apropiada el contaje con una matriz que contenga ambos tipos de radiaciones.

Se define el "spillover" en la ventana alfa como la fracción de partículas beta contadas en la ventana alfa cuando se mide un patrón beta, y se expresa como:

$$\text{"Spillover" ventana alfa} = \frac{\text{cuentas}_{\text{patrón beta}}(\text{ventana}_{\text{alfa}})}{\text{cuentas}_{\text{patrón beta}}(\text{ventana}_{\text{beta}})}$$

Se define el "spillover" en la ventana beta como la fracción de partículas alfa contadas en la ventana beta cuando se mide un patrón alfa, y se expresa como:

$$\text{"Spillover" ventanabeta} = \frac{\text{cuentas}_{\text{patrónalfa}}(\text{ventanabeta})}{\text{cuentas}_{\text{patrónalfa}}(\text{ventana}_\alpha)}$$

En ambos casos el "spillover" se determina realizando una sola medida en el voltaje óptimo de trabajo [4], [5].

5. Preparación de patrones y fondos

5.1. Reactivos

Los reactivos utilizados para la preparación de los patrones fueron los siguientes:

- NaNO₃ calidad para análisis (Panreac, España)
- HNO₃ calidad para análisis (Panreac, España)
- Etanol calidad para análisis (Panreac, España)

5.2. Patrones para determinar la eficiencia

La determinación de la eficiencia de cada uno de los detectores se realizó con dos patrones de referencia certificados preparados por el Laboratorio de Metroología de Radiaciones Ionizantes del Ciemat (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas).

- Patrón beta: Para el caso de la eficiencia beta total el patrón utilizado fue FRC-2012-00274 de Sr-90/Y-90 cuya actividad es de 50,50 ± 0,76 Bq (k=2) y cuya fecha de referencia es 21 de junio 2012.
- Patrón alfa: En el caso de la eficiencia alfa total el patrón utilizado fue FRC-2012-00247 de Am-241 cuya actividad es de 50,96 ± 1,04 Bq (k=2) y cuya fecha de referencia es 20 de marzo de 2012.

5.3. Preparación de fondos

Para la determinación del fondo del equipo se utilizaron planchetas (del mismo tipo que las utilizadas para los patrones y las curvas de autoabsorción) de acero inoxidable, vacías y posteriormente limpiadas con alcohol para cada uno de los detectores.

5.4. Preparación de patrones para las curvas de autoabsorción

En la preparación de las curvas de autoabsorción para ambos índices el aspecto más importante a considerar es la sal empleada. Es posible utilizar cualquier sal, sin embargo, hay que tener en cuenta cual es el medio final del residuo.

Cuando las muestras a analizar se acidifican previamente con ácido nítrico, como es nuestro caso, el residuo final estará constituido por nitratos y por tanto es recomendable el empleo de un nitrato. Por otra parte, el catión utilizado suele ser el sodio, siendo imprescindible que el residuo obtenido en las planchetas presente una buena homogeneidad. Existen diferentes estudios relativos a la sal a utilizar, en nuestro caso utilizaremos nitrato de sodio, porque es el que más se asemeja a la composición de las muestras a analizar.

El rango de espesores máscicos de la curva de autoabsorción debe incluir los de las muestras habitualmente preparadas en el laboratorio. Se suele trabajar con espesores máscicos lo más bajos posible con el fin de evitar una autoabsorción elevada que provocaría un aumento considerable de la incertidumbre en los resultados.

Para la preparación de las curvas de autoabsorción diferenciaremos entre la curva para la determinación del índice de actividad alfa total y la curva para la determinación del índice de actividad beta total [6].

5.5. Patrones para la curva de autoabsorción beta

Se prepararon 10 patrones emisores beta en planchetas de acero inoxidable de 5 cm de diámetro con $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ de 285 Bq con fecha de referencia 10 de febrero de 2010. La preparación se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se limpian las planchetas con alcohol, se enumeran y se pesan (P_1).
- Se añaden 200 μL de patrón a cada una de ellas.
- Se añaden cantidades crecientes de una disolución de 75 mg/ml de NaNO_3 a cada una de las planchetas con el fin de obtener una curva de autoabsorción para depósitos de plancheta comprendidos entre 0 – 0,3 g (rango del contenido en residuo seco de un agua potable).
- Se homogeneiza el contenido de la plancheta.
- Se seca bajo lámpara de infrarrojo situada a 25 cm y posteriormente se calcina.

- Se pesa la plancheta y se anota el peso (P_2).

El cálculo del depósito final de cada una de las planchetas, se obtiene por diferencia entre la tara de la plancheta (P_1) y el peso final (P_2).

5.6. Patrones para la curva de autoabsorción alfa

En el caso de la curva de autoabsorción, para determinar el índice alfa total se prepararon 9 patrones emisores alfa en planchetas de acero inoxidable de 5 cm de diámetro con ^{241}Am de 8,5 Bq con fecha de referencia 15 de noviembre de 2009.

La preparación de esta curva se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de la curva anterior. Al realizarse con un patrón cuya actividad era menor que en el caso anterior, se añadieron 8 ml de patrón a cada una de las planchetas. El rango de depósito final en cada una de las planchetas para esta curva varió entre 0 y 0,4 g.

6. Estudios realizados

Para cada uno de los diez detectores del contador proporcional LB 770, se realizaron los siguientes estudios en el modo de contaje simultáneo:

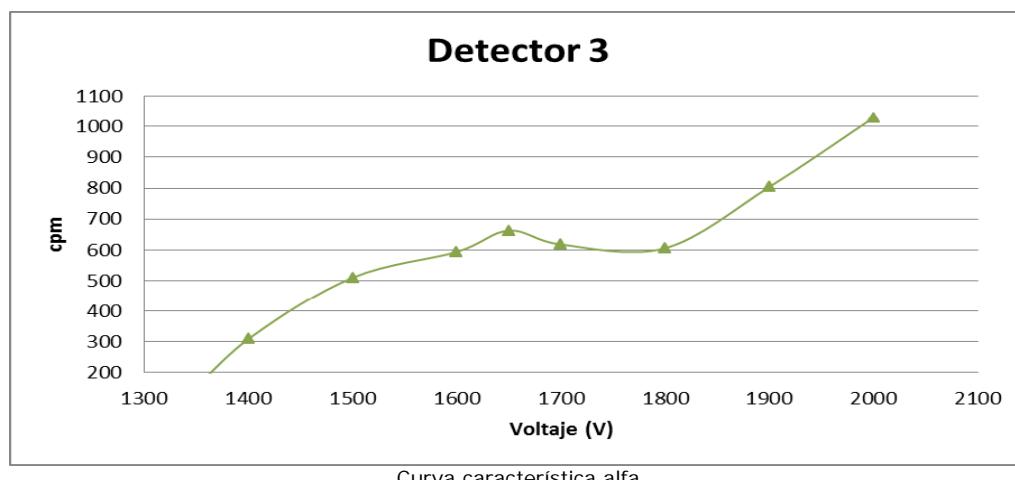
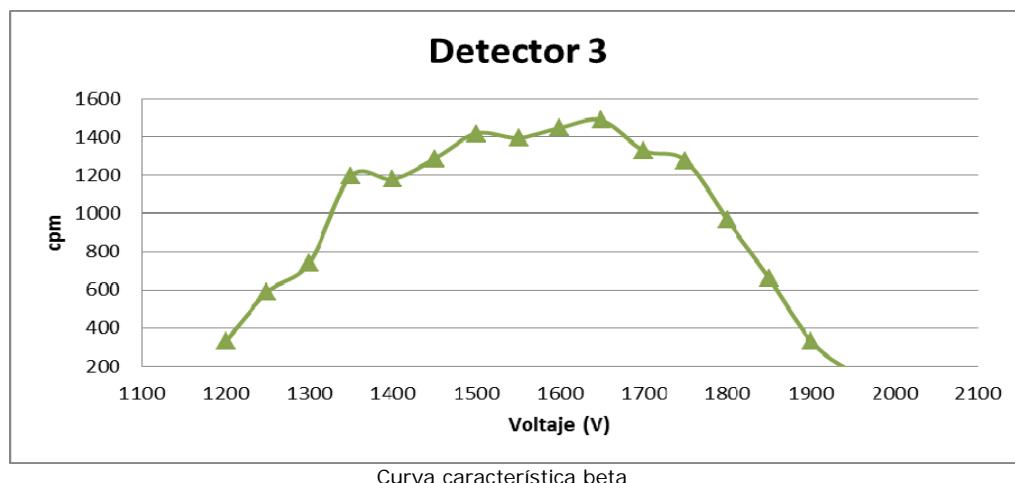
1. Determinación de las eficiencias con los patrones de Americio-241 (emisor alfa) y Estroncio/Itrio-90 (emisores beta). Determinación del "spillover" en modo simultáneo.
2. Determinación del fondo al voltaje óptimo de trabajo.
3. Determinación de las curvas de autoabsorción alfa y beta para la medida de agua.
4. Comparación de los valores obtenidos con otras técnicas.

6.1. Determinación de la curva característica

La determinación de la curva característica se realizó con los dos patrones de referencia certificados nombrados anteriormente. Los patrones alfa y beta se midieron desde 1200 V hasta 2000 V, en incrementos de 50 V, durante 20 segundos para cada uno de los voltajes [7].

Conviene señalar que, aunque el estudio se ha realizado para los diez detectores del contador, sólo se exponen en esta parte de la memoria los resultados correspondientes al primer detector, los datos de los otros nueve están incluidos en el anexo.

Primeramente hay que tener en cuenta que las partículas alfa producen unos impulsos de mayor amplitud que las partículas beta por lo que el "plateau" alfa se presenta para voltajes inferiores que el "plateau" beta. Por otra parte, para el contaje de las emisiones alfa existe un "plateau" bastante amplio desde 1500 a 1800 V y, para el contaje de las emisiones beta, el "plateau" se sitúa entre 1450 y 1700 V.



Como se puede observar en los gráficos anteriores, hasta aproximadamente 1200 V, no se registran impulsos en la ventana alfa en el contaje del patrón alfa, ya que los impulsos se almacenan en la ventana beta. Por otra parte, tanto el "plateau" alfa como el beta se sitúan entre 1450 y 1700 V. Por tanto, teniendo en cuenta todos los detectores (curvas adjuntas en el anexo), elegiremos como valor óptimo de trabajo 1675V para trabajar en modo simultáneo.

6.2. Determinación de eficiencias y fondos

En las tablas siguientes se presentan las medidas de eficiencia y fondo en modo simultáneo para las zonas de medida alfa y beta, respectivamente.

Para obtener los datos de eficiencia se utilizó un programa de cinco minutos de duración por ciclo y un ciclo de repetición. La eficiencia se obtiene como resultado entre la actividad certificada del patrón a fecha de la medida y el resultado obtenido experimentalmente, a través de la fórmula:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Actividad experimental}}{\text{Actividad certificada patron}} \cdot 100$$

Los valores obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Voltaje (V)	Cuentas patrón alfa (5 min)	Eficiencia alfa (%)	Cuentas patrón beta (5 min)	Eficiencia beta (%)
1200	0	0,00	330	10,89
1250	0	0,00	588	19,41
1300	21	0,69	741	24,46
1350	132	4,32	1197	39,50
1400	309	10,10	1179	38,91
1450	432	14,13	1287	42,48
1500	510	16,68	1419	46,83
1550	654	21,39	1395	46,04
1600	594	19,42	1449	47,82
1650	663	21,68	1488	49,11
1700	618	20,21	1329	43,86
1750	708	23,15	1278	42,18
1800	606	19,82	966	31,88
1850	864	28,25	660	21,78
1900	804	26,29	333	10,99
1950	852	27,86	168	5,54
2000	1029	33,65	78	2,57

Como se observa en la tabla, los valores de eficiencia para la determinación del índice de actividad beta total son del 45% y para el caso del índice de actividad alfa total son en torno al 20%. Los cálculos se han realizado teniendo en cuenta la actividad de los patrones utilizados para la medida, la fecha de referencia y la vida media de cada uno de los isotopos que formaban el patrón.

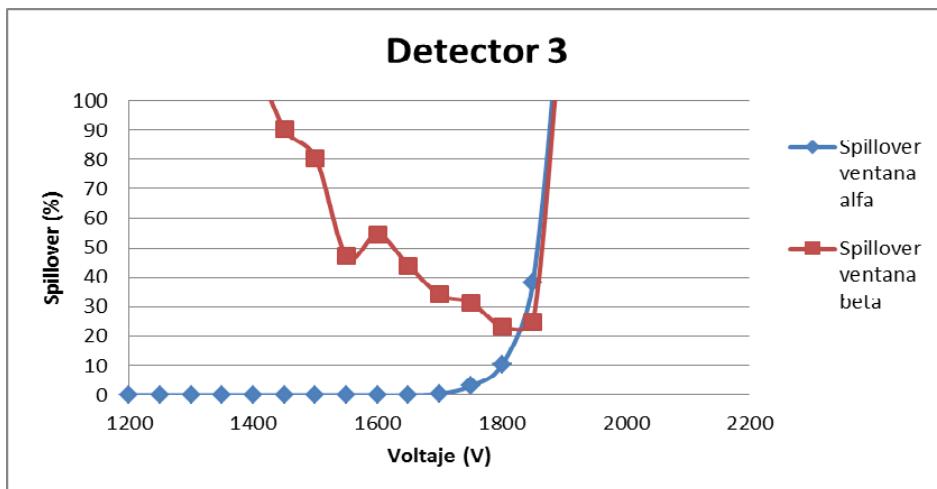
Una vez optimizado el valor de la eficiencia (a 1675V) se realizó un fondo de 1000 minutos. Los valores finales de eficiencias y fondos para los 10 detectores fueron los que se presentan en la siguiente tabla.

	Eficiencia alfa (%)	Fondo alfa (cpm)	Eficiencia beta (%)	Fondo beta (cpm)
Detector 1	18,64	0,06	44,46	0,44
Detector 2	19,77	0,04	44,21	0,26
Detector 3	20,95	0,05	46,49	0,25
Detector 4	19,91	0,04	48,51	1,59
Detector 5	20,60	0,04	44,36	0,38
Detector 6	20,80	0,05	45,94	0,44
Detector 7	19,47	0,04	42,97	0,29
Detector 8	21,29	0,04	45,25	0,27
Detector 9	20,06	0,02	48,61	0,25
Detector 10	20,01	0,04	47,77	0,40

En el caso de la zona de medida alfa, se observó que el fondo era inferior a 0,04 cpm. Respecto a la medida beta, el fondo medio fue 0,45 cpm.

6.3. Determinación del "spillover"

En la figura siguiente se representan el "spillover" para la medida alfa y la medida beta, respectivamente, en modo simultáneo.



"Spillover" en la ventana alfa y beta en el modo simultáneo

Para la ventana alfa se observó que el "spillover" era despreciable hasta 1700 V. Como el voltaje de medida en modo simultáneo fue inferior a este valor, no era necesario corregir el contejo alfa por "spillover" en matrices que contengan emisores alfa y beta.

En cambio, para la ventana beta, se observó que el "spillover" siempre era apreciable y que, para aproximadamente 1675 V este podía variar entre un 30% y un 40% dependiendo del detector. En consecuencia, será necesario realizar la corrección por "spillover" en las medidas beta realizadas.

6.4. Determinación de la curva de autoabsorción para la medida del índice de actividad beta total

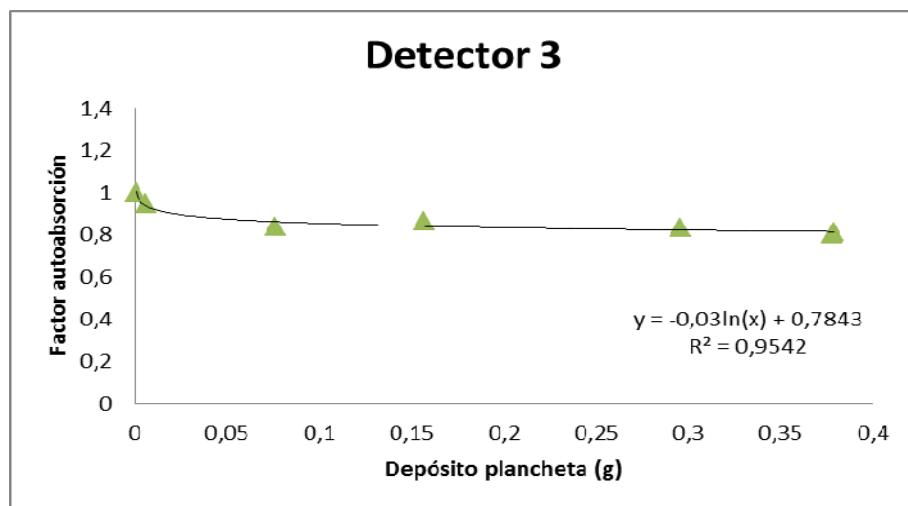
La energía media perdida por los electrones por colisión es pequeña, sin embargo, la pérdida en una colisión individual puede ser muy elevada. Esto ligado al carácter continuo de los espectros de los emisores beta, conduce a que los poderes de penetración de los distintos electrones de un mismo haz sean también muy diferentes. En consecuencia, la absorción y, por tanto, el alcance de los electrones es un proceso muy complejo y ha de ser tratado experimentalmente.

Para determinar experimentalmente la llamada curva de autoabsorción, es decir, la disminución de las partículas beta procedentes de una fuente radiactiva que llegan al detector, en función del espesor del absorbente que atraviesa, es preciso estudiar de diversos factores como son: la geometría del dispositivo experimental, el material absorbente y la sensibilidad del detector.

Como se observa las curvas de autoabsorción, al ser los electrones de baja energía absorbidos rápidamente, la pendiente inicial de la curva es mayor que en la parte final. La forma exacta de la curva depende de la forma del espectro energético del emisor beta utilizado para preparar los patrones de autoabsorción y, debido a los efectos de las colisiones, también depende de las geometrías, del absorbente y del detector. Sin embargo, combinando el hecho de que el haz de electrones procedente de un emisor beta contiene un espectro continuo de energía con el mecanismo de las colisiones, se obtiene una curva de absorción prácticamente exponencial hasta alcanzar el fondo derivado de eventuales emisores gamma y de la radiación de frenado [6].

Los patrones preparados para cada punto de la curva de autoabsorción fueron medidos en cada uno de los detectores del contador proporcional en modo de recuento simultáneo, y el voltaje de medida fue 1675 V. La sal utilizada como absorbente fue nitrato sódico calcinado. Se utilizó un programa de 4 minutos/ciclo y tres ciclos.

En el gráfico siguiente se muestra la curva de autoabsorción obtenida para uno de los detectores.



Se realizó un ajuste de tipo logarítmico para cada uno de los detectores, ya que con éste se obtuvieron mejores factores de regresión.

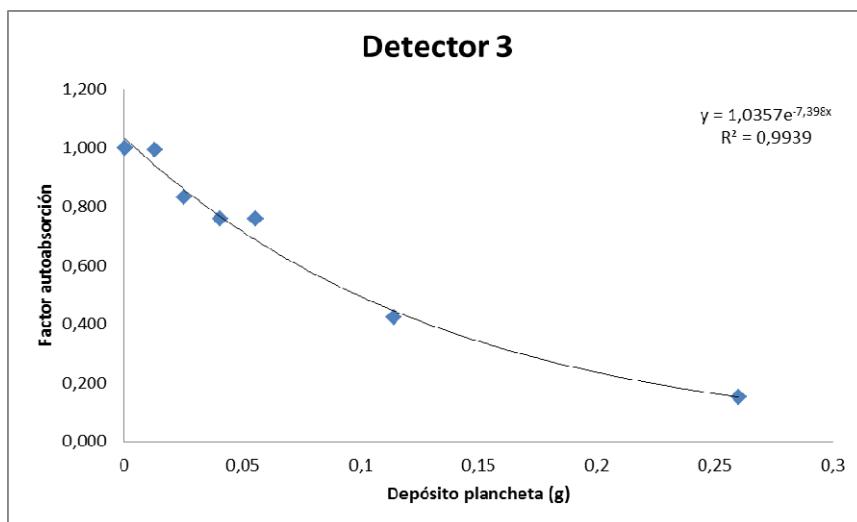
6.5. Determinación de la curva de autoabsorción para la medida del índice de actividad alfa total

Las partículas alfa, como ya se ha comentado anteriormente, son partículas más pesadas que las partículas beta, ya que están formadas por dos protones y dos neutrones (núcleo de Helio). Por tanto, en este caso la curva de autoabsorción es un parámetro muy importante a la hora de determinar el índice de actividad alfa total de una muestra.

Esta curva nos da información sobre la atenuación que sufren las partículas alfa debido al espesor másico y a la composición del precipitado final formado en el proceso radioquímico.

Para la medida de los patrones en la determinación de la curva de autoabsorción para la medida del índice de actividad alfa total se utilizó un programa de 30 minutos/ciclo y 2 ciclos, de mayor duración que para el caso de la medida de la curva de autoabsorción beta total, debido a que el patrón utilizado para la preparación beta era más activo que el de la preparación alfa.

En el gráfico siguiente se muestra la curva de autoabsorción obtenida para uno de los detectores.



Se realizó un ajuste de tipo exponencial para cada uno de los detectores dado que con este tipo de ajuste se obtuvieron los mejores factores de regresión.

7. Análisis de muestras ambientales (suelo)

A través de la red Revira, el CSN puede llevar a cabo el seguimiento continuo de la exposición de la población a las radiaciones ionizantes, es decir:

- Conocer la concentración distribución y evolución de los radioisótopos presentes en el medio ambiente
- Disponer de un banco de datos medioambientales que permita establecer un rango de niveles característico del fondo radiactivo en cada región, y obtener en cualquier momento niveles de referencia.
- Disponer de datos empíricos a través de los cuales estimar el impacto radiológico potencial al que pueda estar sometida la población.

Por ello existen procedimientos regulados (normas UNE y procedimientos del CSN) a través de los cuales se lleva a cabo la recogida, tratamiento y análisis de las muestras.

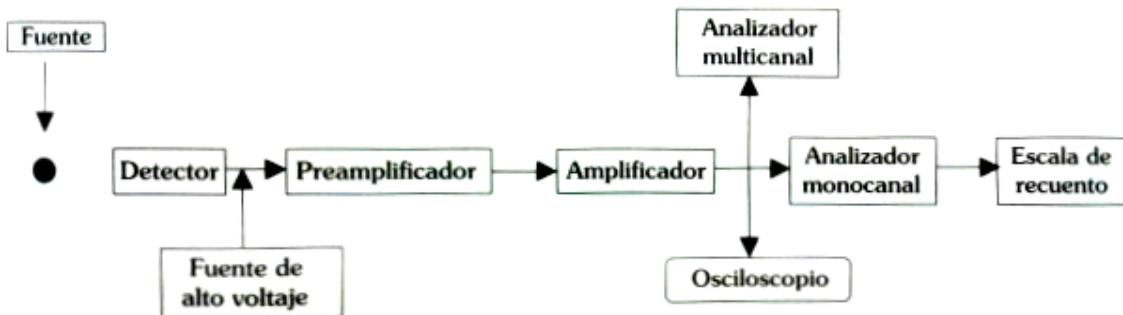
Para el presente trabajo hemos realizado en análisis de 24 muestras de suelo repartidas por Aragón que fueron recogidas para llevar a cabo la caracterización radiológica de la Comunidad autónoma de Aragón en 2010.

Los índices de actividad alfa y beta total para el caso de los suelos suelen ser siempre valores de actividad por encima de la actividad mínima detectable que establece el CSN, porque contienen de forma natural elementos como Urano, Torio (emisores alfa) o K-40 (emisor beta). El objetivo principal de estos índices, por tanto, es estimar de forma rápida el contenido de radiactividad del suelo, cuyo origen podrá ser tanto natural como artificial, y decidir si es necesario realizar determinaciones más específicas de emisores alfa y beta [3].

8. Comparación de los valores obtenidos con otras técnicas

8.1. Contador de centelleo sólido para medida de alfa total

Los detectores de centelleo sólido de ZnS (Ag) del LABAC, están formados por un cambiador de muestras, un tubo fotomultiplicador bialcalino de 2" de diámetro de tipo veneciano y un preamplificador. El tubo está alimentado por una fuente de alta tensión que trabaja a 860 que. a su vez esta conectado a un amplificador lineal, un analizador monocanal y una escala, de forma que se puede regular la la ganancia, la ventana y el límite inferior de detección. En la siguiente imagen se refleja el esquema general de este tipo de detectores:



Los datos obtenidos se recogen mediante un ordenador que permite modificar el número de ciclos y la duración de la medida de cada una de ellas.

En el cambiador se coloca la plancheta de acero inoxidable en la cual está depositada la muestra y sobre ésta se coloca un disco de plástico que tiene en una de sus caras un depósito de finos cristales de ZnS (Ag) cuya función es la transformación de la energía proveniente de las partículas alfa que chocan con él, en fotones que amplificará posteriormente el fotomultiplicador.

Este tipo de detectores se utilizan con frecuencia debido a sus ventajas: bajo precio, facilidad de manejo y buenas cualidades de estabilidad y reproducibilidad [8].

Tras la caracterización de los dos detectores del laboratorio, los valores de eficiencia y fondo obtenidos para el voltaje óptimo de trabajo, se recogen en la siguiente tabla:

Detector	Voltaje óptimo (V)	Eficiencia (%)	Fondo (cpm)
1	850	39,61	0,0114
2	880	39,47	0,0148

Como se puede observar, los valores de eficiencia en este tipo de equipos son significativamente mayores que los obtenidos con el contador proporcional y el fondo es menor, lo que contribuye a que los valores de AMD y las incertidumbres de los resultados obtenidos con este tipo de equipos sean menores.

8.2. Medida de muestras de suelo

Para la comparación entre los valores obtenidos con el contador proporcional de flujo gas y los detectores de centelleo sólido se procedió a la medida de 24 muestras de suelo recogidas en diferentes puntos seleccionados de la geografía aragonesa.

La toma, preparación y análisis de todas las muestras se llevó a cabo de acuerdo con la colección de normas UNE-EN 73311 relativas al procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad ambiental [9], [10] de las cuales se hacen eco los Procedimientos 1.1 y 1.2 del CSN [11], [12].

A partir de las muestras iniciales se prepararon las planchetas de medida. Para ello se tomó una alícuota (alrededor de 0,2g) de cada una de las muestras de suelo y se depositó sobre una plancheta de acero inoxidable previamente tarada. La fijación a la superficie de ésta se realizó con agua acidificada con ácido nítrico y posteriormente se evaporó hasta pesada constante en lámpara de infrarrojo.

Las planchetas se mantienen durante un mínimo de dos días en un desecador antes de la medida. Es aconsejable no superar los 5 mg/cm² de depósito sobre la plancheta debido al alcance de las partículas y al posible efecto de autoabsorción de las mismas según la Norma UNE 73311-4 [13]. Para corregir este efecto de autoabsorción se debe realizar una corrección de los valores obtenidos con las curvas de autoabsorción para alfa y beta obtenidas previamente.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los valores del índice de actividad alfa y beta total obtenidos con el contador proporcional.

Muestra	Beta			Alfa		
	Actividad (Bq/Kg)	Error Actividad (95,5%)	AMD (Bq/Kg)	Actividad (Bq/Kg)	Error Actividad (95,5%)	AMD (Bq/Kg)
Pina de Ebro	6,99E+02	8,08E+00	3,79E+01	7,50E+02	3,04E+02	3,22E+02
Sariñena	8,79E+02	9,73E+00	3,36E+01	5,31E+02	2,15E+02	2,28E+02
Belchite	7,60E+02	9,07E+00	4,38E+01	5,54E+02	2,24E+02	2,38E+02
Monreal del Campo	4,86E+02	5,67E+00	3,42E+01			
Perales						
Alfambra	6,69E+02	8,24E+00	4,57E+01	1,28E+03	2,64E+02	1,63E+02
Hijar	6,95E+02	8,30E+00	4,15E+01	3,15E+02	1,58E+02	1,84E+02
Alcañiz	4,40E+02	5,36E+00	3,76E+01			
La Almunia	1,26E+03	1,41E+01	3,96E+01	7,50E+02	1,62E+02	1,07E+02
Calatayud	1,29E+03	1,41E+01	3,37E+01	3,26E+02	1,16E+02	9,33E+01
Ayerbe	5,30E+02	6,69E+00	4,34E+01	5,00E+02	2,08E+02	2,17E+02
Zuera	5,97E+02	7,08E+00	3,70E+01	6,24E+02	2,70E+02	2,97E+02
Borja	7,57E+02	8,45E+00	3,67E+01	2,86E+02	1,57E+02	1,90E+02
Caspe	3,91E+02	5,08E+00	3,81E+01			
Monzón	7,59E+02	8,51E+00	3,36E+01	6,67E+02	2,18E+02	1,86E+02
Tauste	5,32E+02	6,80E+00	4,62E+01	4,72E+02	2,08E+02	2,26E+02
Fraga	7,34E+02	8,59E+00	4,04E+01	8,64E+02	3,17E+02	3,17E+02
Barbastro	8,72E+02	9,70E+00	3,55E+01			
Alagón	2,15E+02	3,52E+00	4,22E+01	1,87E+02	9,78E+01	3,34E+01
Ejea de los Caballeros	5,52E+02	7,00E+00	4,61E+01			
Daroca	1,53E+03	1,73E+01	4,57E+01	9,80E+02	1,83E+02	1,02E+02
Moyuela	5,34E+02	6,68E+00	4,13E+01			
Huesca	9,64E+02	1,15E+01	7,09E+01	4,69E+02	1,90E+02	1,89E+02
Zaragoza	6,40E+02	7,85E+00	4,40E+01	4,64E+02	1,41E+02	1,16E+02
Teruel	1,07E+03	1,26E+01	6,63E+01			

En la siguiente tabla se muestran los valores del índice de actividad alfa total obtenidos con los detectores de centelleo sólido.

Muestra	Actividad (Bq/Kg)	Error Actividad (95,5%)	AMD (Bq/Kg)
Pina de Ebro	8,40E+02	9,69E+01	4,80E+01
Sariñena	5,25E+02	5,45E+01	2,08E+01
Belchite	4,04E+02	4,88E+01	2,15E+01
Perales Alfambra	1,05E+03	6,82E+01	1,05E+03
Hijar	5,88E+02	6,10E+01	5,88E+02
La Almunia	7,17E+02	4,84E+01	1,46E+01
Calatayud	2,95E+02	3,33E+01	1,38E+01
Ayerbe	4,50E+02	5,37E+01	2,74E+01
Zuera	7,06E+02	8,34E+01	3,60E+01
Borja	3,28E+02	4,45E+01	2,54E+01
Monzón	9,84E+02	8,09E+01	5,74E+00
Tauste	4,04E+02	5,23E+01	2,45E+01
Fraga	1,19E+03	1,10E+02	4,48E+01
Alagón	1,64E+02	2,62E+01	1,71E+01
Daroca	1,29E+03	7,95E+01	2,19E+01
Huesca	3,72E+02	3,94E+01	1,54E+01
Zaragoza	4,44E+02	5,75E+01	6,43E+00

En la siguiente tabla se muestran los valores del índice de actividad beta total obtenidos con el anterior contador proporcional del laboratorio:

Muestra	Actividad (Bq/Kg)	Error Actividad (95,5%)	AMD (Bq/Kg)
Pina de Ebro	8,369E+02	6,715E+01	5,054E+01
Sariñena	9,361E+02	7,115E+01	5,651E+01
Belchite	8,359E+02	7,065E+01	5,583E+01
Monreal del Campo	5,500E+02	5,849E+01	5,114E+01
Perales Alfambra	6,652E+02	6,798E+01	6,250E+01
Hijar	6,734E+02	6,569E+01	5,597E+01
Alcañiz	5,450E+02	5,967E+01	5,194E+01
La Almunia	1,331E+03	8,256E+01	5,482E+01
Calatayud	1,601E+03	9,136E+01	5,260E+01
Ayerbe	6,364E+02	6,431E+01	5,379E+01
Zuera	7,079E+02	6,445E+01	5,366E+01
Borja	8,324E+02	7,223E+01	5,564E+01
Caspe	4,364E+02	5,338E+01	4,836E+01
Monzón	8,681E+02	7,018E+01	5,108E+01
Tauste	5,832E+02	6,216E+01	5,131E+01
Fraga	9,500E+02	7,755E+01	6,614E+01
Barbastro	9,073E+02	7,068E+01	5,185E+01
Alagón	2,372E+02	4,737E+01	5,190E+01
Ejea de los Caballeros	6,308E+02	6,529E+01	5,664E+01
Daroca	1,811E+03	9,520E+01	5,546E+01
Moyuela	6,171E+02	6,163E+01	5,188E+01

Huesca	6,854E+02	1,069E+02	1,244E+02
Zaragoza	7,359E+02	1,243E+02	1,586E+02
Teruel	1,061E+03	1,148E+02	1,150E+02

Como se puede observar en las tablas anteriores, se obtienen valores similares para el caso de la medida beta (en los diferentes contadores proporcionales). Con el nuevo equipo se obtienen menores valores para el caso de la incertidumbre y la actividad mínima detectable, esto es debido a la mayor eficiencia y al menor fondo del equipo.

Para el caso del índice de actividad alfa total, solo se han tenido en cuenta las muestras cuyo depósito estaba comprendido dentro de las curvas de autoabsorción de los dos equipos de medida, por ello en la primera tabla aparecen espacios en blanco. Como se puede observar en ellas, los valores son similares a los obtenidos con el sistema de centelleo sólido, pero al tener menor eficiencia y mayor fondo que este tipo de equipos, con el contador proporcional los valores de incertidumbre y actividad mínima detectable son mucho mayores.

Además hay que tener en cuenta que existe un factor limitante para el caso de la medida de alfas y es el factor de autoabsorción, la bibliografía recomienda que las planchetas no superen los 0,1 g de depósito para que la autoabsorción no sea significativa. Al igual que la eficiencia, la autoabsorción aparece en el denominador de los cálculos con lo que factores de autoabsorción altos, hacen que aumente significativamente la incertidumbre y la actividad mínima detectable.

Esto podría solucionarse utilizando menor cantidad de muestra para obtener planchetas de depósito mucho menor, ya que los valores del factor de autoabsorción son más cercanos a uno y se obtendrían, menores incertidumbres y actividades mínimas detectables. Por el contrario, al disminuir la cantidad de muestra, como está también aparece en el denominador de la expresión, los valores obtenidos (de incertidumbre y actividad mínima detectable) son similares a los obtenidos en el caso anterior.

Además si se utiliza muy poca cantidad de muestra se corre el riesgo de que si esta es poco activa, obtengamos valores de actividad muy por debajo de la actividad mínima detectable del equipo.

En definitiva, existen factores limitantes muy importantes a tener en cuenta, como son: la eficiencia y el fondo del equipo de medida, la cantidad de muestra usada o el depósito del residuo en la plancheta, de la cual depende el factor de autoabsorción. En fondo del equipo puede

corregirse haciendo medidas largas (mayores de 4000 minutos) pero para el caso de las alfas la eficiencia será un factor limitante importante, ya que con otros equipos, como es el caso del centelleo sólido se obtienen eficiencias significativamente mayores.

8.3. Cálculos para la obtención de resultados

8.3.1. Índice de actividad beta total

El índice de actividad beta total (A) se calcula mediante la siguiente fórmula [13]:

$$A = \frac{(cpm_{beta} - cpmb_{beta}) - \gamma \cdot (cpm_{alfa} - cpmb_{alfa})}{60 \cdot E \cdot F \cdot M}$$

donde,

A es el índice de actividad beta total de la muestra, en Bq/Kg,
 cpm_{beta} son las cuentas por minuto beta de la muestra, en cpm,
 $cpmb_{beta}$ son las cuentas por minuto beta del blanco, en cpm,
 cpm_{alfa} son las cuentas por minuto alfa de la muestra, en cpm,
 $cpmb_{alfa}$ son las cuentas por minuto alfa del blanco, en cpm,
E es la eficiencia del recuento, en tanto por uno,
F es el factor de autoabsorción,
M es la cantidad de muestra, en kg,
 γ es el “spill-over” de la medida beta, y se expresa como:

$$\gamma = \frac{cuentas_{patrónalfa}(V_{beta})}{cuentas_{patrónalfa}(V_{alfa})}$$

donde

$cuentas_{patrónalfa}(V_{beta})$ son las cuentas de una muestra de calibrado alfa registradas en la ventana beta,

$cuentas_{patrónalfa}(V_{alfa})$ son las cuentas de una muestra de calibrado alfa registradas en la ventana alfa.

La incertidumbre de recuento en la determinación del índice de actividad beta total (a nivel 2 sigma) se debe calcular mediante la expresión:

$$u_A = \frac{2}{60 \cdot E \cdot F \cdot V} \sqrt{\frac{cpm_{beta} + \gamma^2 \cdot cpm_{alfa}}{t(m)} + \frac{cpmb_{beta} + \gamma^2 \cdot cpmb_{alfa}}{t(b)}}$$

donde,

uA es la incertidumbre de recuento en la determinación del índice de actividad beta total, en Bq/Kg,

E es la eficiencia de recuento, en tanto por uno,

F es el factor de autoabsorción correspondiente al espesor másico de la muestra,

M es la cantidad de muestra, en kg,

cpm_{beta} son las cuentas por minuto beta de la muestra, en cpm,

γ es el “spill-over” de la medida beta,

cpm_{alfa} son las cuentas por minuto alfa de la muestra, en cpm,

cpmb_{alfa} son las cuentas por minuto alfa del blanco, en cpm,

cpmb_{beta} son las cuentas por minuto beta del blanco, en cpm,

t(m) es el tiempo de medida de la muestra, en minutos,

t(b) es el tiempo de medida del blanco, en minutos.

Las unidades serán las mismas que las de la actividad.

No se tienen en cuenta el error de la eficiencia ya que al mantenerse éste por debajo del 1% su contribución resulta despreciable frente a los errores debidos al contaje de la muestra o del fondo.

Por otra parte, se entiende por AMD, la más pequeña actividad de una muestra que proporcione un contaje neto para el que puede afirmarse que, en un determinado nivel de confianza, la muestra tiene actividad.

Para un nivel de confianza del 95,5% la actividad mínima detectable (AMD) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$AMD = \frac{3,3 \cdot \sqrt{cpmb_{beta} \cdot \left(\frac{1}{t(b)} + \frac{1}{t(m)} \right) + \gamma^2 \frac{cpm_{alfa} - cpmb_{alfa}}{t(m)}} + 2,7 \cdot \left(\frac{1}{t(b)} + \frac{1}{t(m)} \right)}{60 \cdot E \cdot F \cdot M}$$

Donde,

AMD es la actividad mínima detectable o el límite de detección, Bq/Kg,

E es la eficiencia de recuento, en tanto por uno,

F es el factor de autoabsorción correspondiente al espesor másico de la muestra,

M es la cantidad de muestra, en kg,

cpm_{beta} son las cuentas por minuto beta de la muestra, en cpm,
 γ es el “spill-over” de la medida beta,
cpm_{alfa} son las cuentas por minuto alfa de la muestra, en cpm,
cpmb_{alfa} son las cuentas por minuto alfa del blanco, en cpm,
cpmb_{beta} son las cuentas por minuto beta del blanco, en cpm,
t(m) es el tiempo de medida de la muestra, en minutos,
t(b) es el tiempo de medida del blanco, en minutos.
con unidades análogas a las ya citadas.

8.3.2. Índice de actividad alfa total

El índice de actividad alfa total (A) se calcula mediante la siguiente fórmula [8]:

$$A = \frac{(cpm_{alfa} - cpmb_{alfa})}{60 \cdot E \cdot F \cdot V}$$

La incertidumbre de recuento en la determinación del índice de actividad beta total (a nivel 2 sigma) se debe calcular mediante la expresión:

$$u_A = \frac{2}{60 \cdot E \cdot F \cdot V} \sqrt{\frac{cpm_{alfa}}{t(m)} + \frac{cpmb_{alfa}}{t(b)}}$$

Por otra parte, se entiende por AMD, la más pequeña actividad de una muestra que proporcione un contaje neto para el que puede afirmarse que, en un determinado nivel de confianza, la muestra tiene actividad.

Para un nivel de confianza del 95,5% el actividad mínima detectable (AMD) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$AMD = \frac{3,3 \sqrt{cpmb_{alfa} \left(\frac{1}{t(b)} + \frac{1}{t(m)} \right)} + 2,7 \left(\frac{1}{t(b)} + \frac{1}{t(m)} \right)}{60 \cdot E \cdot F \cdot V}$$

con unidades análogas a las ya citadas.

9. Conclusiones

De todo el trabajo desarrollado se concluye que:

1. Se ha caracterizado un contador de flujo gas para la determinación del contenido alfa y beta en muestras ambientales, obteniendo valores concretos para los principales parámetros determinantes de la medida de muestras alfa y beta. En concreto:
2. Como el "plateau" en el modo secuencial y en modo simultáneo es diferente, ha sido necesario llegar a un acuerdo para obtener las máximas eficiencias tanto en alfas como en betas, por lo que se ha elegido un voltaje de 1675 V, para la medida en este modo.
3. Se han determinado las eficiencias obtenidas en el voltaje optimizado que el caso de radiación beta, proporcionan un valor del 40% y para el caso de radiación alfa del 20%, corresponden a valores descritos en la bibliografía para este tipo de equipos. El fondo medio para la medida de alfa es 0.04 cpm, y en la ventana beta es aproximadamente 0.45 cpm.
4. Se ha comprobado que el "spillover" en el contaje alfa es despreciable para los voltajes óptimos de contaje. En cambio, el "spillover" en la ventana beta es alrededor del 40%, por lo que es necesario realizar un ajuste de la medida.
5. Las actividades obtenidas con los distintos equipos son similares salvo para algunas muestras para las cuales el factor de autoabsorción resulta muy limitante (ya que modifica mucho los valores de actividad).
6. Al trabajar con mayor eficiencia y menor fondo con el equipo de centelleo sólido, los valores obtenidos para la actividad mínima detectable (AMD) y de incertidumbre son menores, lo cual presenta una clara ventaja a favor de este equipo.
7. Para el caso de la medida de alfas deberíamos utilizar menores cantidades de muestra, para obtener depósitos de alrededor de 0,1 gramos, ya que los valores de autoabsorción no son muy significativos para esas cantidades, aunque correremos el riesgo de obtener actividades por debajo de la mínima detectable.
8. Para el caso de betas se obtienen valores similares y se ha mejorado los valores de actividad mínima detectable y los valores de incertidumbre, ya que el equipo tiene una mayor eficiencia y un menor fondo en relación con el antiguo.
9. Por tanto resulta interesante hacer una medida simultánea de alfa y beta en el contador proporcional para conocer la actividad de las muestras, aunque para el caso de las alfas es

recomendable hacer una medida posterior con un sistema de centelleo sólido para obtener unos valores mucho más precisos.

10. Bibliografía

- [1] *Curso sobre medidas ambientales de radiactividad.* Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Cedex) y Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). 1998.
- [2] *Curso de capacitación para supervisores de instalaciones radiactivas.* Instituto de Técnicas Energéticas, Universidad Politécnica de Cataluña. 1983.
- [3] Colección de Informes Técnicos 20.2011 del CSN. *Programa de vigilancia radiológica ambiental del CSN. Resultados 2010.*
- [4] *Puesta a punto de un contador proporcional para la medida simultanea de la actividad alfa y beta.* Luis Pujol, J. A. Suarez-Navarro, M^a Fé Diaz. Ingeniería Civil 119/2000
- [5] *EG&G Berthold "PC-Controlled 10 Channel alpha-beta counter", Operating Manual,* Bad Wildbad, Germany. 1996.
- [6] Cuadernos de investigación. *Índice de Actividad beta total: Curvas de autoabsorción.* CEDEX.2002. Luis Pujol, J. A. Suarez-Navarro.
- [7] Cuadernos de investigación. *Prácticas de Laboratorio de Radiactividad Ambiental. CEDEX. 2003.* Luis Pujol, J. A. Suarez-Navarro.
- [8] Cuadernos de investigación. *Índice de actividad alfa total: Contador de centelleo sólido de ZnS (Ag).* CEDEX. 2000. Luis Pujol, J. A. Suarez-Navarro, Marcial Montero Ramos.
- [9] Norma UNE 73311-1:2002. *Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad ambiental. Parte 1: suelos, capa superficial.*
- [10] Norma UNE 73311-5:2002. *Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad ambiental.*
- [11] Colección de Informes Técnicos 11.2003, serie vigilancia radiológica ambiental, procedimiento 1.1. *Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial.*

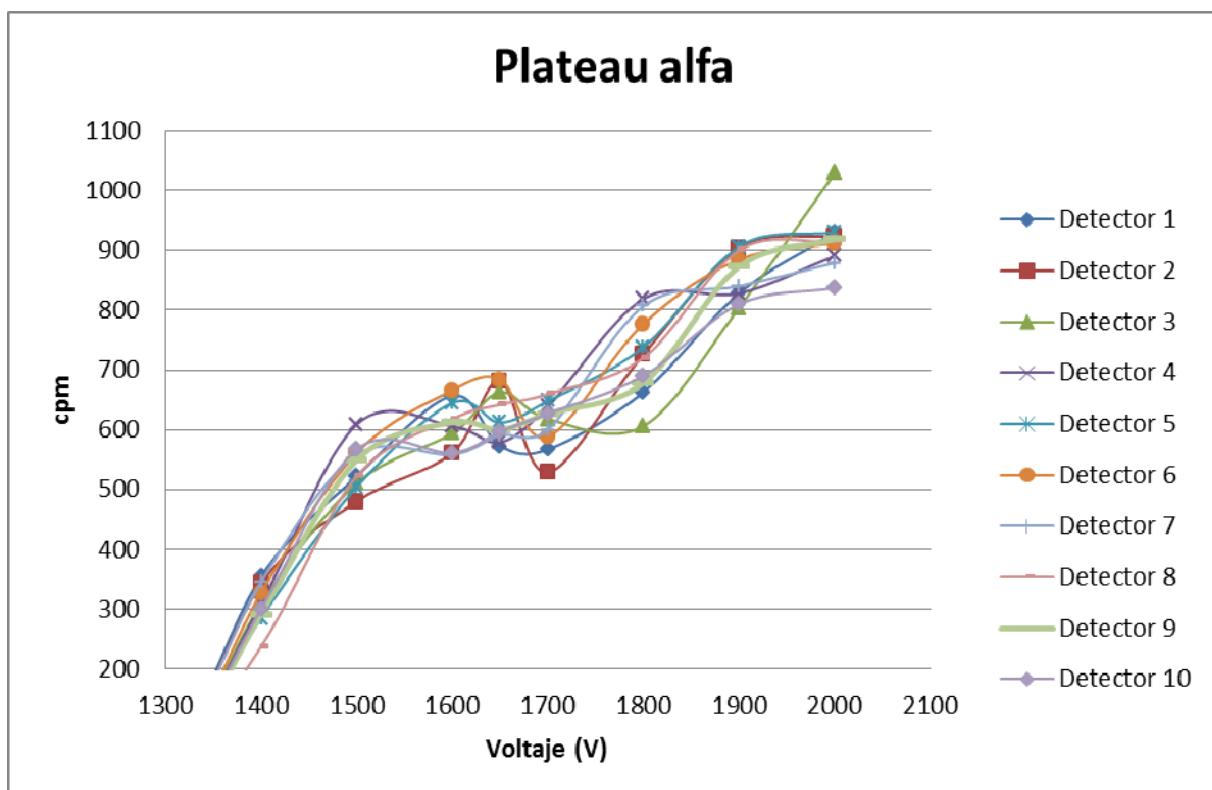
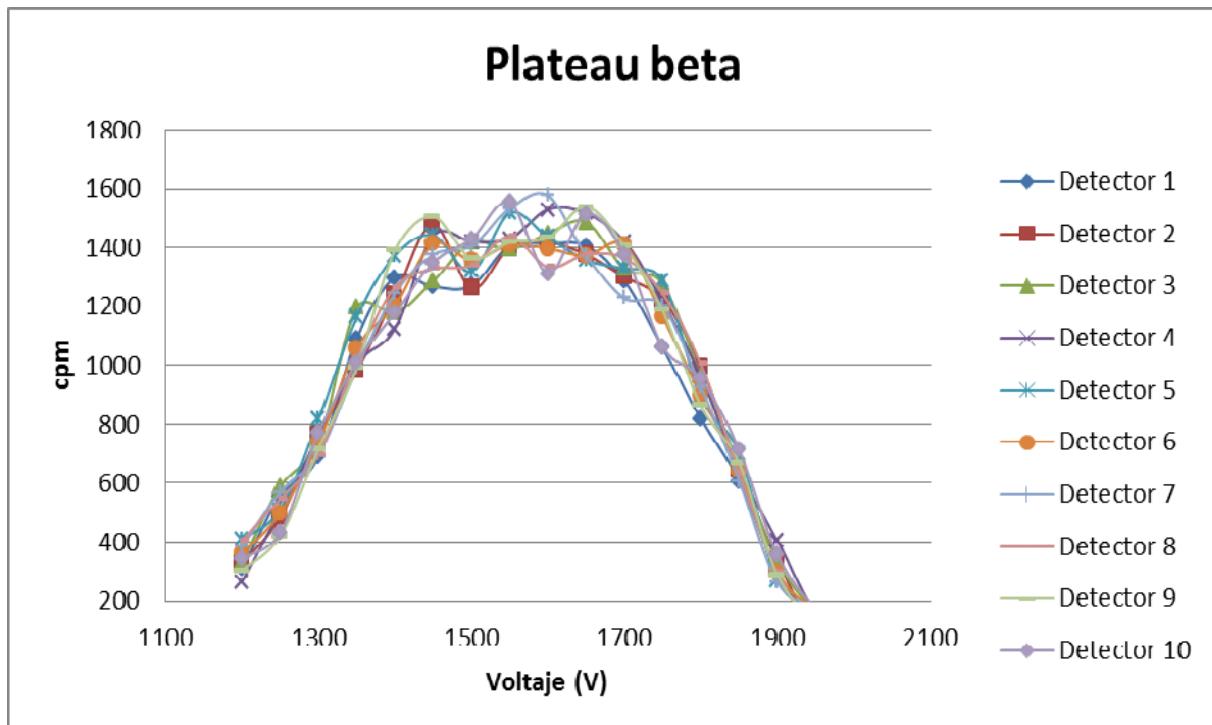
- [12] Colección de Informes Técnicos 11.2003, serie vigilancia radiológica ambiental, procedimiento 1.2. *Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad.*
- [13] Norma UNE 73311-4:2002. *Determinación del índice de actividad beta total en aguas mediante contador proporcional.*

11. ANEXO

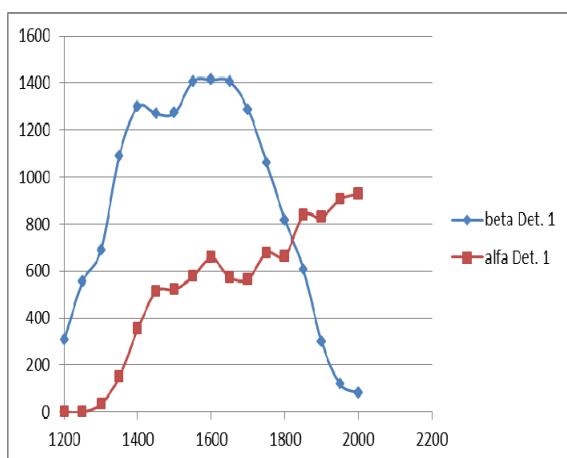
Gráficos de la caracterización de un contador proporcional de flujo gas para la determinación de los índices alfa y beta total. Incluye:

- Representación de Plateaus (alfa y beta) para los diferentes voltajes y para cada uno de los detectores.
- Curvas de “spillover” para cada uno de los detectores.
- Curvas de autoabsorción para la medida del índice de actividad beta total para cada uno de los detectores.
- Curvas de autoabsorción para la medida del índice de actividad alfa total para cada uno de los detectores.

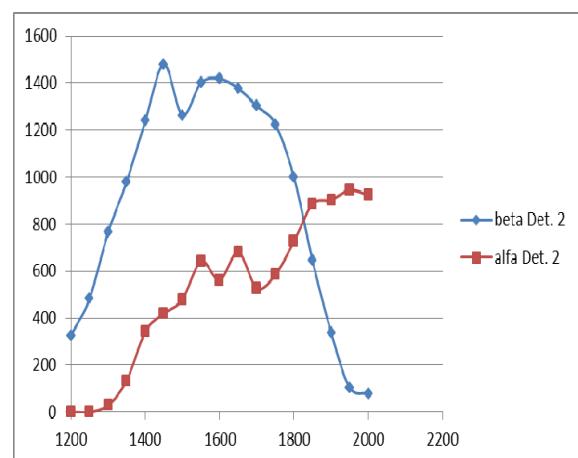
Curvas de Plateau alfa y beta



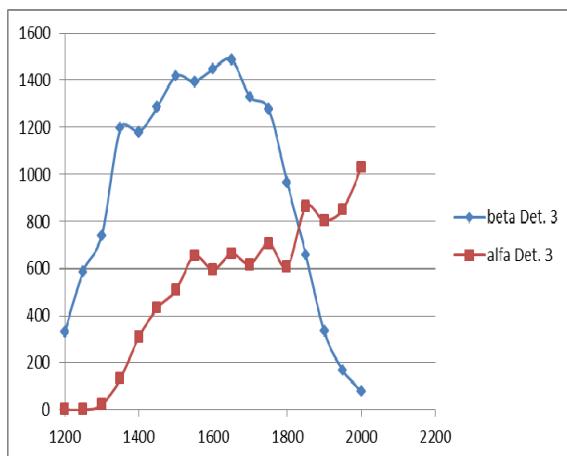
Curvas Plateau para Detector 1



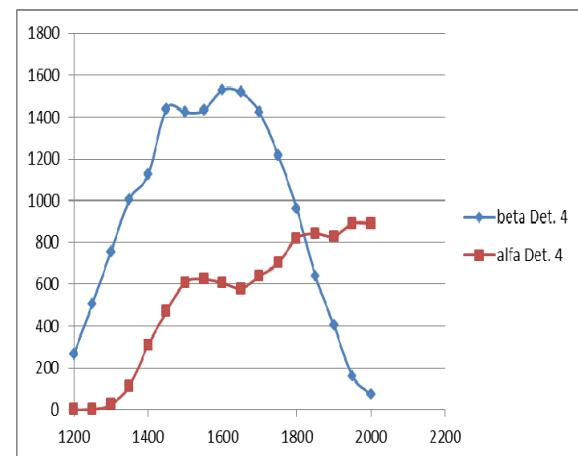
Curvas Plateau para Detector 2



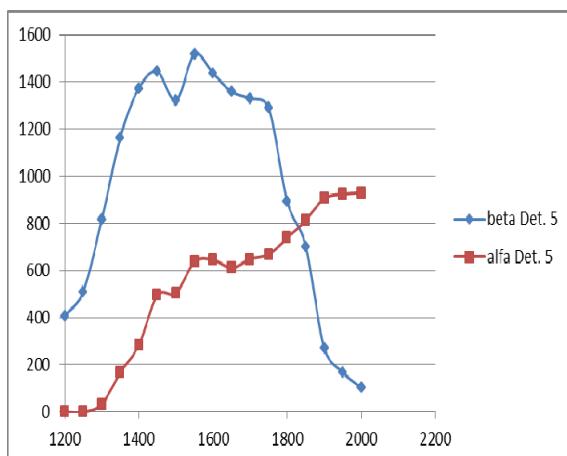
Curvas Plateau para Detector 3



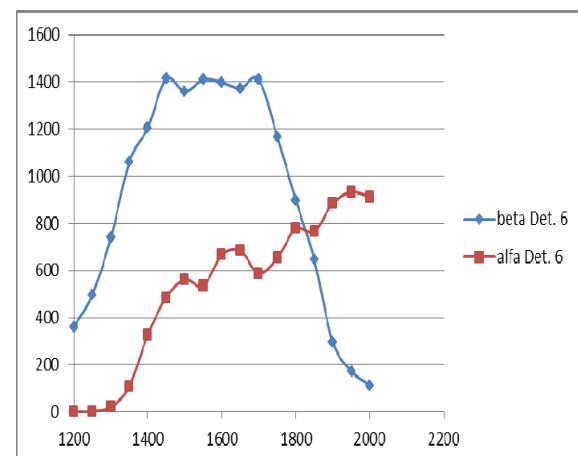
Curvas Plateau para Detector 4



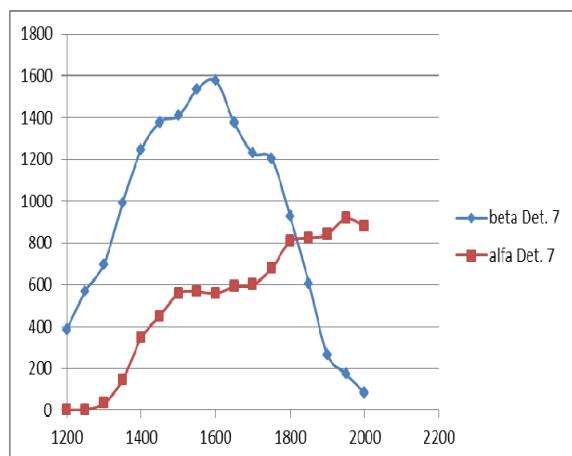
Curvas Plateau para Detector 5



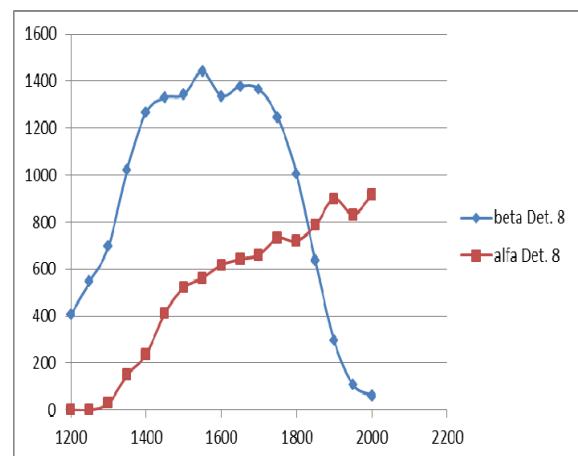
Curvas Plateau para Detector 6



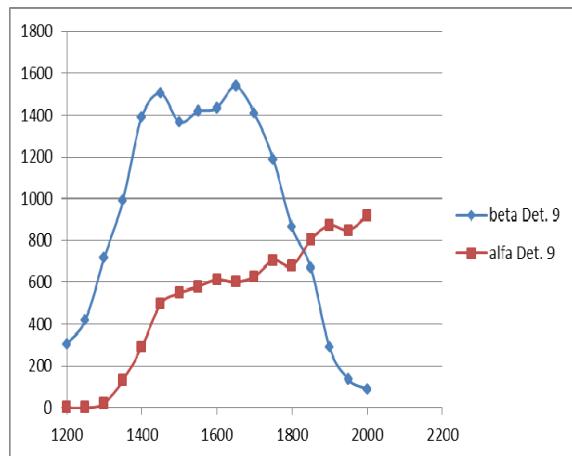
Curvas Plateau para Detector 7



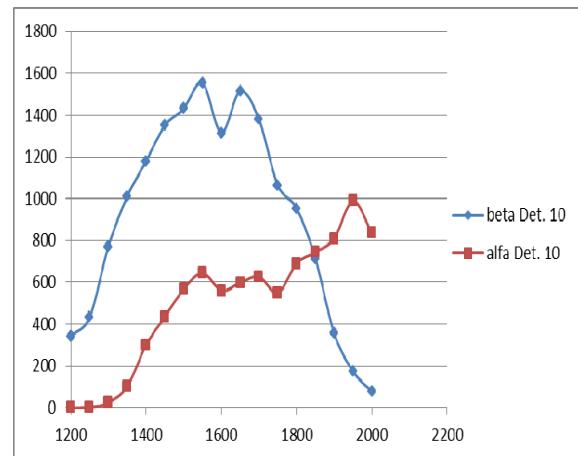
Curvas Plateau para Detector 8



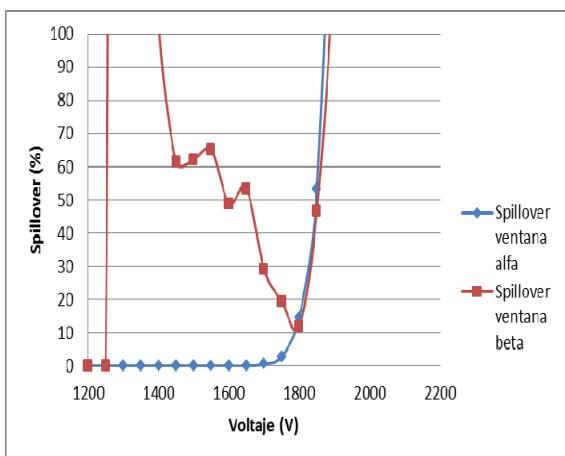
Curvas Plateau para Detector 9



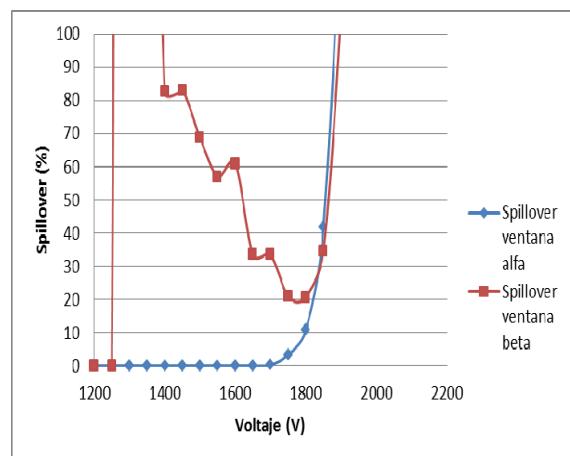
Curvas Plateau para Detector 10



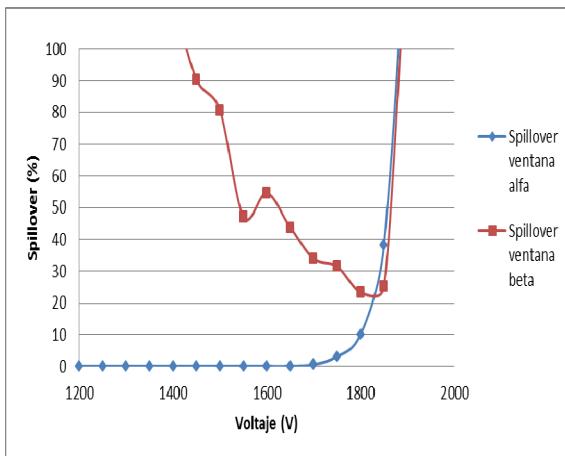
Curvas Spillover detector 1



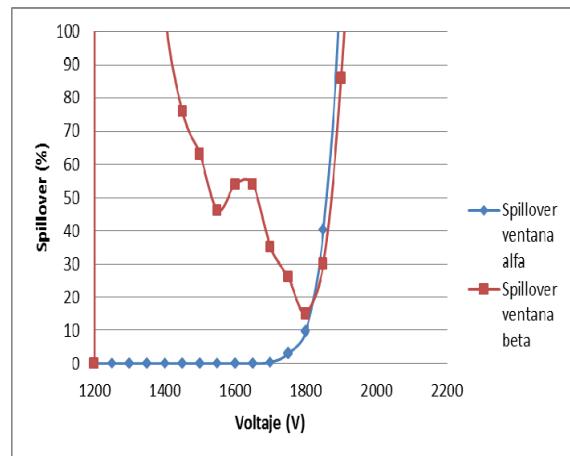
Curvas Spillover detector 2



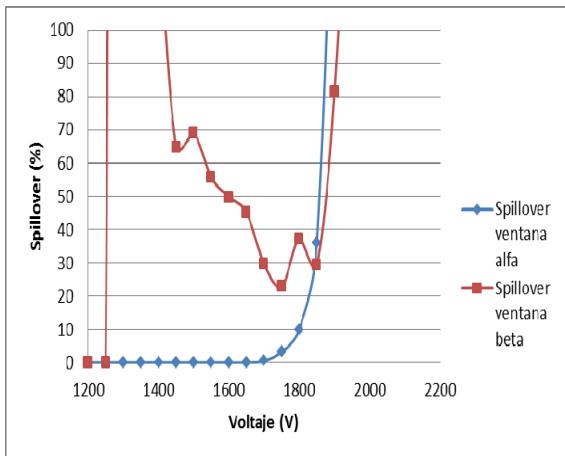
Curvas Spillover detector 3



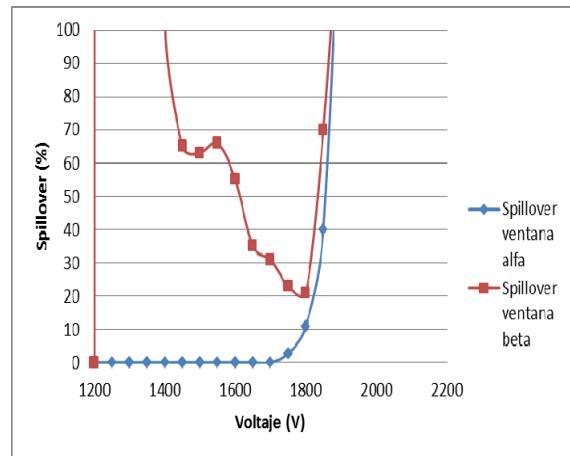
Curvas Spillover detector 4



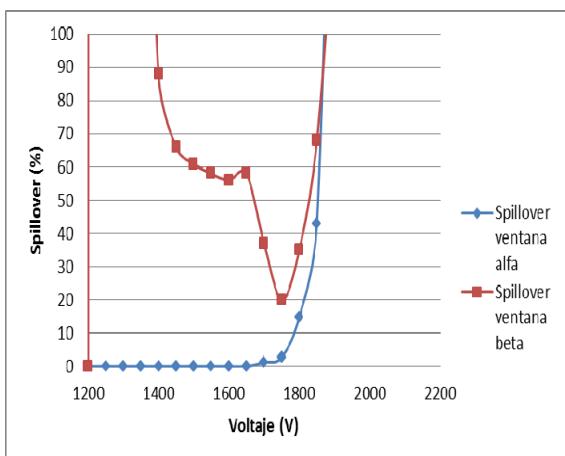
Curvas Spillover detector 5



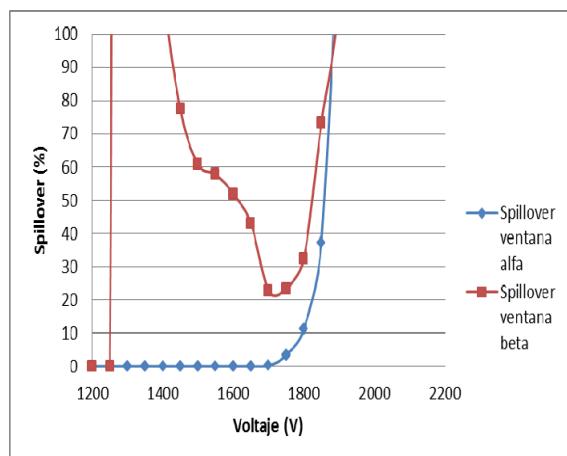
Curvas Spillover detector 6



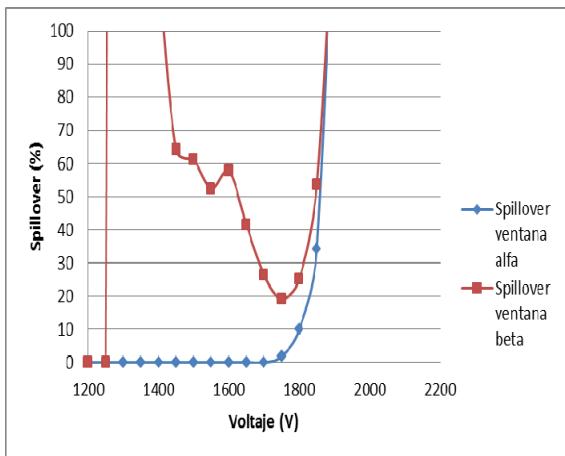
Curvas Spillover detector 7



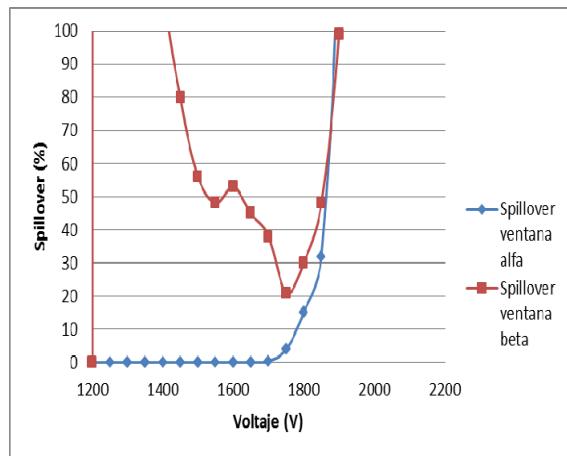
Curvas Spillover detector 8



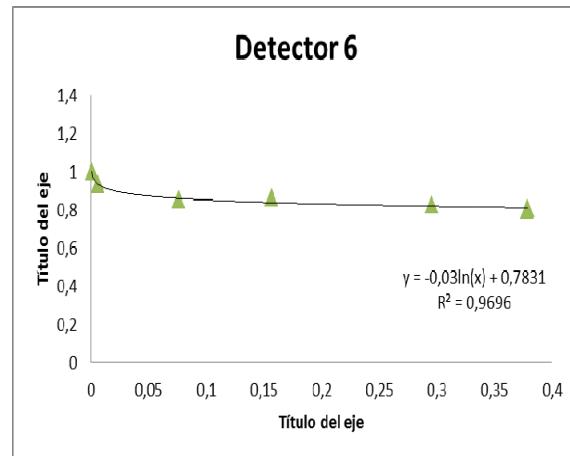
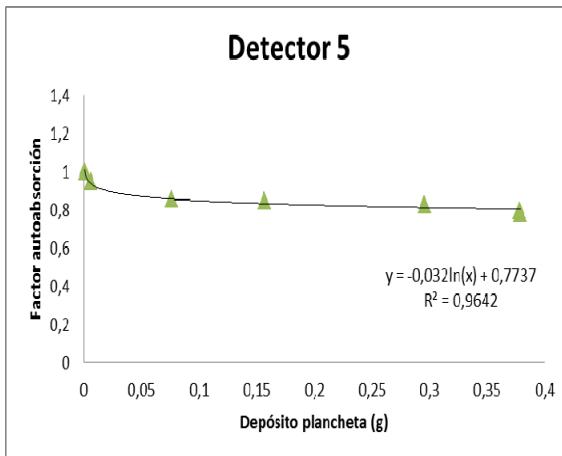
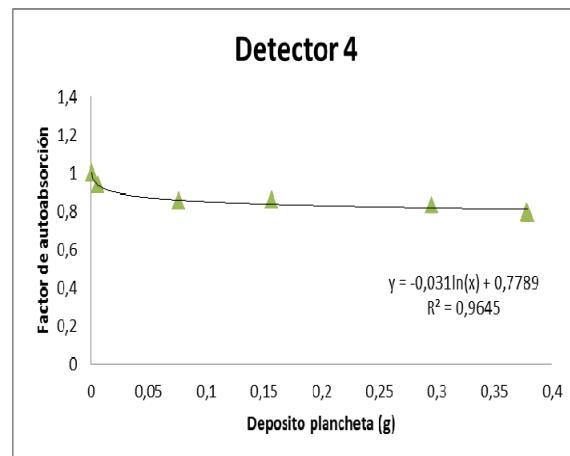
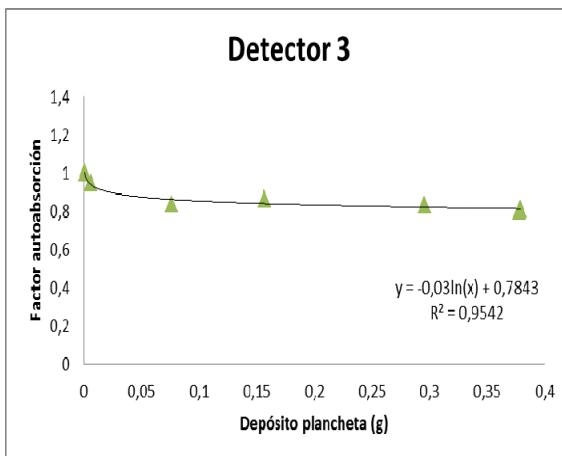
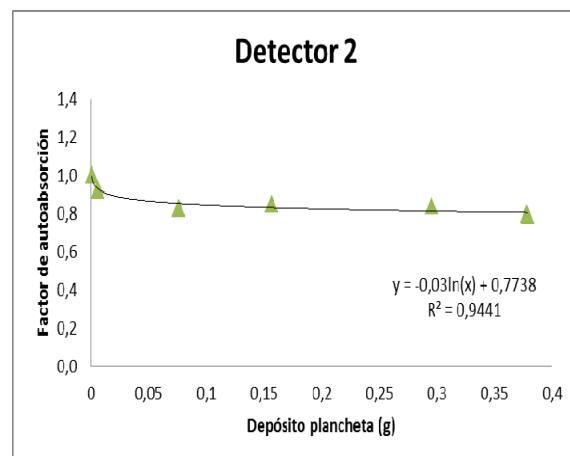
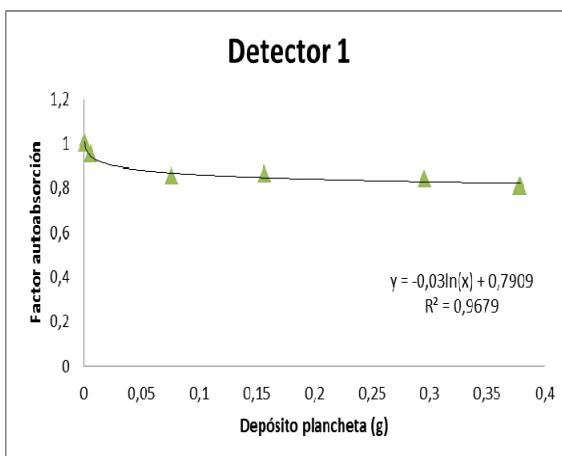
Curvas Spillover detector 9

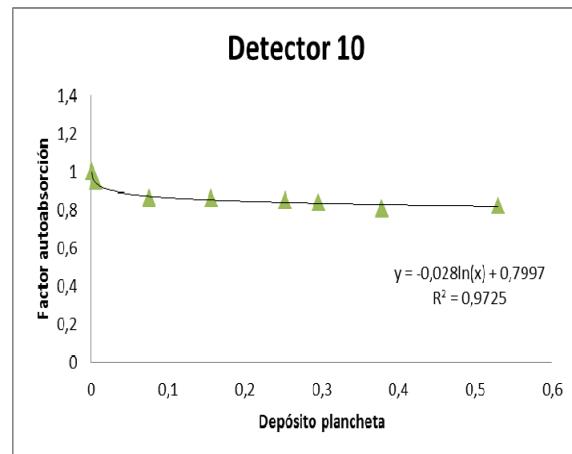
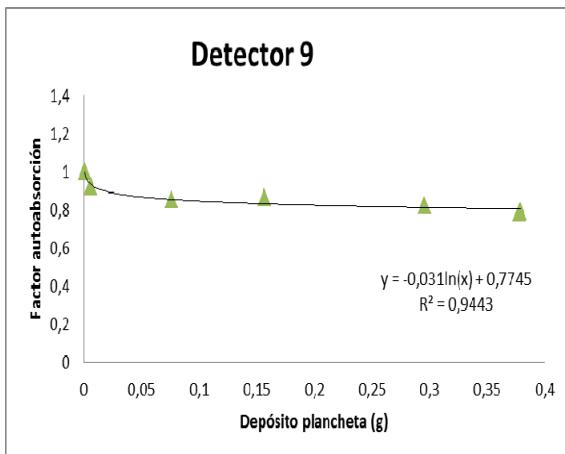
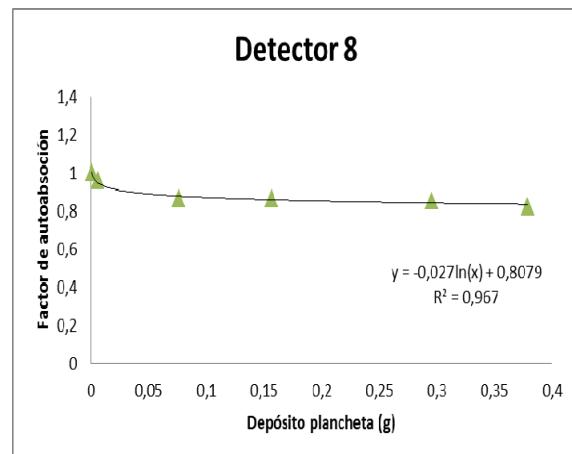
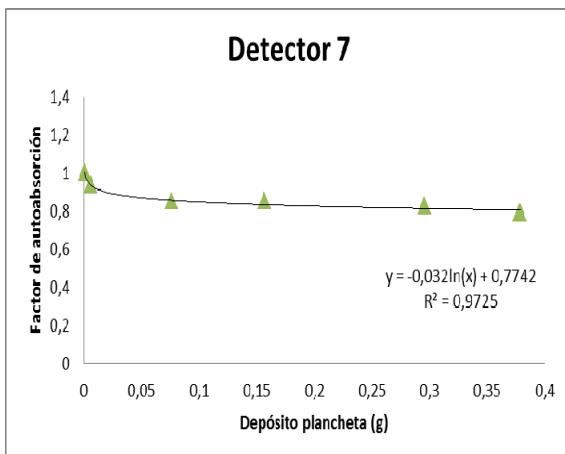


Curvas Spillover detector 10



Curvas de autoabsorción beta total





Curvas de autoabsorción alfa total

