

Diseño del Control de Calidad  
de las Medidas de Actividad  
Alfa-Beta Total  
(LMPR - CIEMAT)

A. Álvarez  
L. Yagüe  
C. Gascó  
N. Navarro  
E. Higuera  
C. Noguerales



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales  
<http://www.060.es>

**Depósito Legal:** M -14226-1995

**ISSN:** 1135 - 9420

**NIPO:** 471-10-029-7

Editorial CIEMAT

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S46

QUALITY CONTROL; ACTIVITY LEVELS; ALPHA DETECTION; BETA DETECTION;  
MONITORING; MEASURING INSTRUMENTS

## **Diseño del Control de Calidad de las Medidas de Actividad Alfa-Beta Total (LMPR-CIEMAT)**

Álvarez, A.<sup>1</sup>; Yagüe, L.<sup>1</sup>; Gascó, C.<sup>2</sup>; Navarro, N.<sup>1</sup>; Higuera, E.<sup>1</sup>; Nogueras, C.<sup>1</sup>

28 pp. 9 fig. 2 tablas 10 refs.

### **Resumen:**

De acuerdo con la normativa internacional los laboratorios de análisis deben disponer de un sistema de calidad que defina aspectos organizativos y técnicos. Los requerimientos técnicos incluyen el establecimiento de un control de calidad interno, cuyo objetivo es vigilar el proceso de análisis y medida, identificar problemas e iniciar acciones correctoras.

En este informe se describe el diseño de un programa de control de calidad para la medida de la actividad alfa y beta total, que incluye de acuerdo con las normas y recomendaciones internacionales la identificación y el control de los indicadores, los principios que gobiernan su uso y su significado estadístico. Se describen también los cálculos a realizar de actividad, incertidumbre y límites de detección.

## **Design of a Quality Control Program for the Measurement of Gross Alpha and Gross Beta Activities (LMPR-CIEMAT)**

Álvarez, A.<sup>1</sup>; Yagüe, L.<sup>1</sup>; Gascó, C.<sup>2</sup>; Navarro, N.<sup>1</sup>; Higuera, E.<sup>1</sup>; Nogueras, C.<sup>1</sup>

28 pp. 9 fig. 2 tablas 10 refs.

### **Abstract:**

In accordance with international standards, general requirements for testing laboratories have to include a quality system for planning, implementing, and assessing the work performed by the organization and for carrying out required quality assurance and quality control. The purpose of internal laboratory quality control is to monitor performance, identify problems, and initiate corrective actions.

This report describes the internal quality control to monitor the gross alpha and beta activities determination. Identification of specific performance indicators, the principles that govern their use and statistical means of evaluation are explained. Finally, calculation of alpha and beta specific activities, uncertainties and detection limits are performed.

<sup>1</sup> CIEMAT, Servicio de Protección Radiológica

<sup>2</sup> CIEMAT, Departamento de Medio Ambiente



# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2.- REQUISITOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE ACTIVIDAD ALFA-BETA TOTAL.....</b>	<b>3</b>
2.1.- Sistema de medida .....	4
2.2.- Registro y archivo .....	4
2.3.- Condiciones ambientales .....	5
2.4.- Trazabilidad de las medidas.....	6
<b>3.- INDICADORES DE CALIDAD EN LA PREPARACIÓN DE LAS FUENTES.....</b>	<b>6</b>
<b>4.- INDICADORES DE CALIDAD DE LA INSTRUMENTACIÓN .....</b>	<b>7</b>
4.1.- Curva característica.....	8
4.2.- Fondo Ambiental .....	9
4.3.- Eficiencia .....	9
4.4.- Cross-talk (superposición de señales).....	10
<b>5.- PROCESO DE CÁLCULO .....</b>	<b>11</b>
5.1.- Cálculo de la actividad.....	11
5.2.- Cálculo de la incertidumbre .....	11
5.3.- Cálculo de límites característicos.....	15
<b>6.- PROGRAMA DE CALIDAD.....</b>	<b>20</b>
6.1.- Procedimiento de ensayo y calibración.....	20
6.2.- Verificación y mantenimiento del sistema de medida. ....	20
6.3.- Control de los indicadores .....	21
6.4.- Comprobación de los cálculos .....	21
6.5.- Programa de seguimiento de la calidad .....	21
<b>7.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>22</b>
<b>8.- BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>22</b>
<b>ANEXO I: “Comprobación de los cálculos. Ejemplos numéricos”</b>	





## **1.-INTRODUCCIÓN**

Los laboratorios de análisis radiológicos tienen los mismos requerimientos que cualquier otro laboratorio analítico desde el punto de vista del control de calidad. De acuerdo con la normativa internacional<sup>1</sup>, deben disponer de una documentación que refleje aspectos organizativos y técnicos. Los requerimientos técnicos de tipo general se refieren a entrenamiento de personal, instalaciones y condiciones ambientales, métodos, equipos, informes de resultados y registros.

Una de las técnicas más aplicadas en laboratorios radiológicos es la determinación de los índices de actividad alfa y/o beta total. El índice de actividad consiste en la medida conjunta de todas las emisiones alfa o beta presentes en una muestra. Se trata de una medida muy útil para interpretación de resultados, ya que permite mediante técnicas sencillas conocer el orden de magnitud de la concentración de actividad en materiales a caracterizar radiológicamente.

Su utilización en el laboratorio exige desarrollar procedimientos operativos donde se incluya la información relativa al calibrado de la instrumentación utilizada y a las verificaciones operacionales que deban ser realizadas. Desde el punto de vista normativo son aplicables a esta técnica de medida dos normas internacionales, una relativa a medidas en aguas<sup>2</sup> y otra sobre expresión de resultados en el campo de la radiactividad<sup>3</sup>.

El Laboratorio de Medidas de Protección Radiológica del CIEMAT (en adelante LMPR) dispone de un procedimiento de determinación de la actividad alfa-beta total para filtros ambientales, frotis y líquidos, donde se describe la preparación de las muestras, su medida en un contador proporcional de flujo continuo de gas y los cálculos de actividad, incertidumbre y límites característicos. En ese mismo procedimiento se detalla también el proceso del calibrado en eficiencias.

En este informe se establecen los requisitos y características técnicas a tener en cuenta para la determinación de los índices de actividad alfa y/o beta total en un laboratorio radiológico. Además se describe el diseño del programa de control de calidad aplicable a estas medidas en el LMPR. Para ello se han tenido en cuenta las recomendaciones de MARLAP<sup>4</sup> (que proporciona información más pormenorizada que la de la normativa internacional) en cuanto a la identificación de los indicadores específicos que demuestran si un proceso se está realizando adecuadamente. Estos indicadores afectan al proceso de preparación de fuentes y a la instrumentación.

Finalmente, se describen los cálculos de actividad e incertidumbre realizándose una comparación entre los resultados obtenidos de la aplicación de dos criterios distintos para la obtención de los límites de detección.

## **2.-REQUISITOS BÁSICOS DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE ACTIVIDAD ALFA-BETA TOTAL.**

La aplicación de la normativa internacional<sup>1</sup> incluye la definición de los aspectos técnicos básicos, que afectan a los equipos, a las condiciones ambientales de las instalaciones, a la trazabilidad de las medidas y al aseguramiento de la calidad de los resultados.

## 2.1.- Sistema de medida

La medida de la actividad alfa-beta total se realiza utilizando un contador proporcional de flujo continuo de gas. El funcionamiento del sistema de detección está basado en la capacidad de producción de pares iónicos por la interacción de las partículas alfa y beta con las moléculas del gas.



Figura-1. Contador proporcional de flujo continuo de gas LB-770.

El contador de flujo continuo de gas empleado es el modelo LB770 de Berthold (que aparece en la Figura 1) con el microprocesador digital LB1027. El sistema tiene una capacidad de medida simultánea de 10 muestras, que se colocan en una bandeja especialmente diseñada para introducirla dentro de un blindaje de plomo dónde se encuentran los detectores. El blindaje, concebido para atenuar la radiación gamma externa, está formado por ladrillos de plomo de 10cm de espesor.

El sistema de medida necesita para su funcionamiento un suministro del gas denominado PR (mezcla de argón (90%) y metano (10%)) cuyo nivel de llenado se controla mediante un indicador de presión. La aplicación de una tensión de polarización adecuada en el seno del gas permite medir impulsos de corriente que revelan la llegada de radiación al detector.

Los preamplificadores y amplificadores de pulsos así como el sistema de anticoincidencia están colocados fuera del blindaje en la unidad LB1027 donde también se encuentra la fuente de alta tensión. Desde esta unidad se realiza la selección del tipo de recuento (sólo alfa, solo beta, alfa y beta).

## 2.2.- Registro y archivo

La orden de adquisición de los datos correspondiente a una determinada muestra se realiza desde el ordenador personal asociado al equipo utilizando un programa especialmente

diseñado para generar un fichero de texto. En ese fichero se almacenan los datos (previamente introducidos por el usuario) relativos a las características de la muestra y los generados en el proceso de medida.

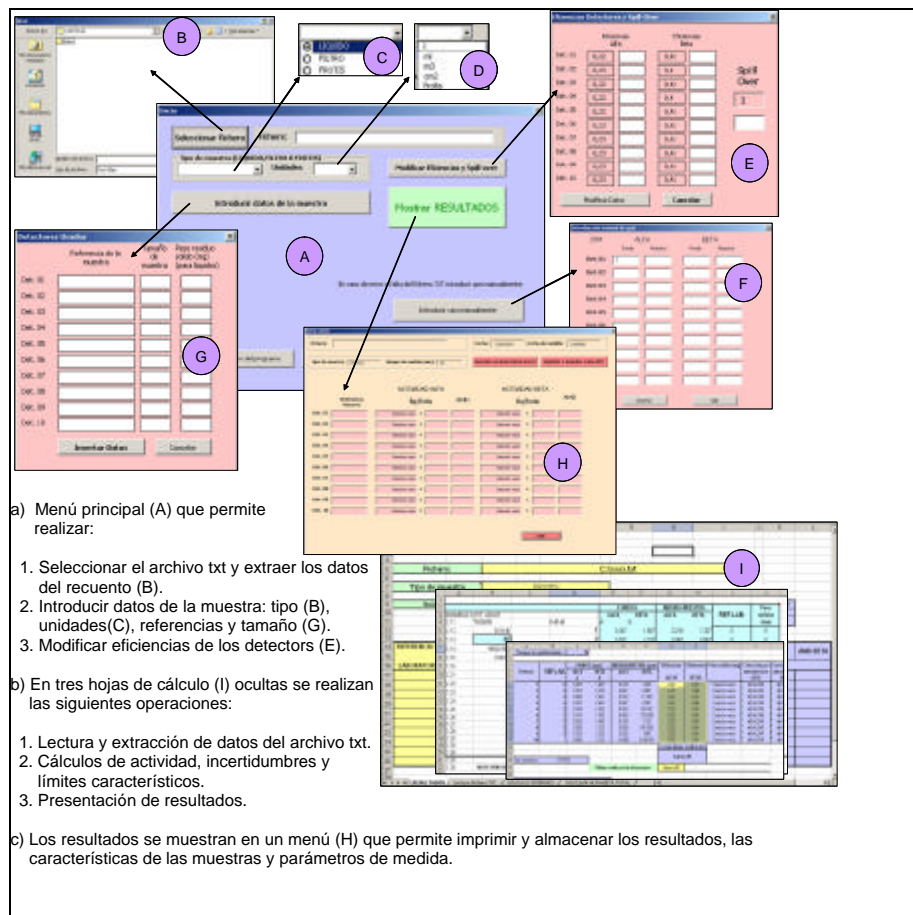


Figura-2. Esquema de recogida de datos (Berthold LB770)

Los cálculos de actividad, incertidumbre y límite de detección se realizan utilizando un programa de cálculo<sup>5</sup> basado en hojas de Excel y programación en Visual Basic especialmente desarrollado cuyo esquema se presenta en la Figura-2. El proceso finaliza con la obtención de un fichero que contiene información sobre la identificación y características de las muestras, junto con los resultados finales, que se almacena en una unidad de red. La utilización del programa permite además de automatizar y facilitar el cálculo, eliminar errores humanos en la transcripción de datos.

### 2.3.- Condiciones ambientales

El LMPR dispone de un sistema de climatización que garantiza una temperatura constante en la dependencia donde se encuentra el sistema de medida. Además, para evitar pérdidas de información o deterioro de los equipos por fallos en el suministro eléctrico se dispone de una unidad de alimentación ininterrumpida.

## 2.4.- Trazabilidad de las medidas

La trazabilidad se garantiza mediante el uso de fuentes preparadas en los mismos soportes de acero inoxidable utilizados para la medida de las muestras. Estos materiales de referencia han sido preparados por la Unidad de Metrología de Radiaciones Ionizantes del CIEMAT y se dispone de los correspondientes certificados.

## 3.- INDICADORES DE CALIDAD EN LA PREPARACIÓN DE LAS FUENTES

La preparación de las muestras consiste en el conjunto de operaciones a realizar para adecuar su estado físico, forma y tamaño original al exigido por la geometría de medida en el contador proporcional, que es un soporte de acero inoxidable (denominado plancheta) de idéntica superficie a la del detector del equipo utilizado.

Las muestras que se analizan en el LMPR son aerosoles (retenidos sobre un filtro), líquidos y frotis.

En el caso de muestras líquidas, la preparación de la fuente se realiza mediante evaporación. El método consiste en obtener en una plancheta un residuo sólido correspondiente a una alícuota del líquido a analizar. Durante el proceso de medida debido al material sólido presente en la muestra se produce una atenuación de la radiación emitida (sobre todo en el caso de la emisión alfa). Para realizar una corrección en la medida, es necesario establecer la pérdida de detección en función del espesor del residuo sólido. Esta corrección se realiza obteniendo experimentalmente las correspondientes curvas de autoabsorción.

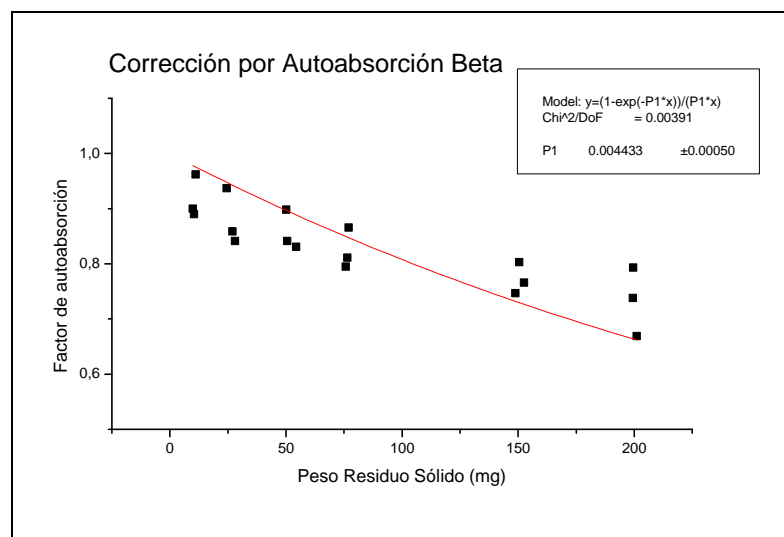


Figura 3 – Ajuste experimental de la curva de autoabsorción beta.

Las fuentes para la obtención experimental de las curvas de autoabsorción se preparan adicionando una actividad conocida de una solución de referencia a cantidades determinadas de una solución salina, de manera que el residuo obtenido cubra el intervalo de espesor másico con el que habitualmente se trabaja en el LMPR. La curva para la corrección de la actividad alfa total, se preparó utilizando una solución patrón de  $^{241}\text{Am}$ , mientras que para la

curva de beta total se ha utilizado una solución patrón de  $^{90}\text{Sr}$  en equilibrio con  $^{90}\text{Y}$ . Los residuos sólidos obtenidos están distribuidos al igual que las muestras de forma no homogénea en la superficie de las planchetas.

El factor de autoabsorción se define como la relación entre la eficiencia media de las fuentes preparadas con diferentes pesos de residuo final y la de las fuentes preparadas sin autoabsorción (correspondientes a los materiales de referencia descritos en el apartado 2.4 de este informe).

Los ajustes matemáticos realizados a partir de los resultados experimentales están incorporados al programa de cálculo utilizado. Un ejemplo de los mismos se presenta en la Figura-3.

#### **4.-INDICADORES DE CALIDAD DE LA INSTRUMENTACIÓN**

El control de la instrumentación es fundamental en todos los procesos de medida, siendo necesario identificar todos los parámetros experimentales que puedan dar lugar a una variación en el resultado final. En el caso de la medida de la actividad alfa-beta total en contadores proporcionales, estos indicadores de calidad son los siguientes: Curva característica (denominada también “plateau”), control de fondo, eficiencia y cross-talk (“superposición de señales”).

El establecimiento de la máxima variabilidad de los indicadores se realiza aplicando criterios estadísticos o límites definidos por el usuario.

La aplicación de criterios estadísticos exige disponer de información histórica sobre los valores numéricos de los parámetros experimentales. El tratamiento de esta información servirá para establecer los límites que definen el intervalo numérico aceptable para ese parámetro.

Habitualmente se utilizan gráficos de control donde se representa una línea central correspondiente al valor esperado o estimado del parámetro estudiado, mientras que el eje horizontal es una escala temporal. Alrededor de esta línea central se establecen límites de investigación y de aviso. Estos últimos son por definición límites de acción, es decir, una medida cuyo valor del parámetro estudiado estuviese fuera de los límites de aviso, significa la parada inmediata del proceso de medida, la investigación del problema y la ejecución de una acción correctora. Los límites de investigación ayudan a identificar e investigar el problema antes de exceder los límites de aviso.

Para establecer estos valores (investigación y aviso) existen criterios estadísticos que aseguran además que las incertidumbres asociadas a la medida están adecuadamente estimadas. De acuerdo con la guía MARLAP, para el conjunto de los  $N$  valores disponibles de una variable  $X$ , se establece el valor medio  $M$  y la desviación estándar  $S$ , de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N} \qquad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (M - X_i)^2}{N - 1}$$

Los límites de investigación y de aviso se establecen de acuerdo con las expresiones siguientes:

- Límite inferior de investigación =  $M - 2S$
- Límite superior de investigación =  $M + 2S$
- Límite inferior de aviso =  $M - 3S$
- Límite superior de aviso =  $M + 3S$

#### 4.1.- Curva característica

Una partícula alfa al atravesar un medio material, produce una ionización mayor que una partícula beta de la misma energía.

Los contadores proporcionales miden de acuerdo con la configuración del equipo en modo secuencial o simultáneo. La medida en modo simultáneo consiste en determinar la actividad alfa y beta midiendo en un único voltaje. La medida en modo secuencial se realiza cuando se selecciona el voltaje de operación del detector para trabajar en dos mesetas. En este tipo de detección (que es la que corresponde al sistema de medida del LMPR) ha de establecerse previamente el intervalo del voltaje aplicado para realizar cada una de las medidas (modo alfa y modo beta).

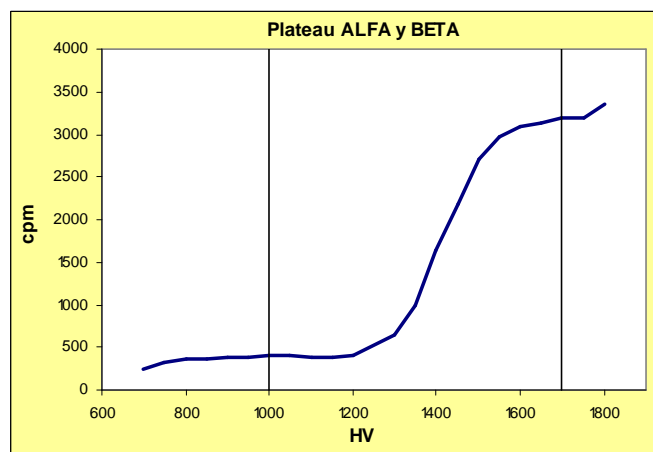


Figura-4. Curva característica de uno de los detectores del sistema de medida.

La curva característica se obtiene cuando se representa, para una fuente dada, el número de impulsos medidos en función de la tensión de operación. Al ir aumentando la tensión de polarización comienzan a detectarse las partículas alfa por su mayor amplitud de impulso. La meseta alfa se alcanza cuando se detectan la totalidad de partículas alfa emitidas por la fuente.

Al seguir aumentando la tensión, tras una región de transición, se alcanza una nueva meseta la alfa+beta, de menor longitud y mayor pendiente que la anterior. En esta segunda meseta el

recuento es debido a todas las partículas (alfa y beta) emitidas por la fuente. En la Figura-4 aparece la curva característica del sistema de medida del LMPR.

#### 4.2.- Fondo Ambiental

El contador proporcional de flujo continuo de gas empleado en el LMPR es un sistema de medida de bajo fondo. El fabricante proporciona como valor de referencia un fondo inferior a 1cpm para la zona beta+alfa e inferior a 0,05 cpm para la zona alfa.

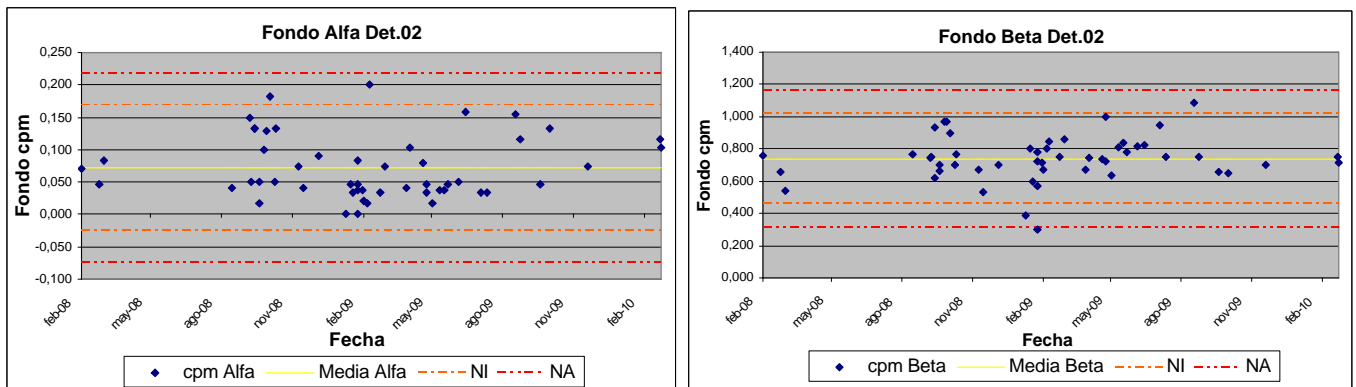


Figura-5. Control del fondo ambiental en uno de los detectores del sistema de medida.

Debido a distintos factores, tales como ventilación, ubicación del local donde se encuentra el equipo, temperatura ambiente o nivel de llenado de gas se producen variaciones del fondo ambiental. Dentro del proceso de cálculo de la actividad, el valor del fondo ambiental debe ser sustraído en cada uno de los diez detectores que posee el equipo de medida, por lo que es necesaria su caracterización. Para ello, se dispone de una serie de fuentes o planchetas “blanco” correspondientes a los distintos tipos de muestras analizadas en el LMPR.

A partir de los valores experimentales obtenidos de la medida de las muestras “blanco” se establecen los límites de aviso e investigación para cada detector de acuerdo con los criterios estadísticos definidos en el apartado 4. En la Figura 5 se presentan los valores de fondo obtenidos durante dos años en uno de los detectores del sistema de medida LB770 del LMPR.

Si en cualquiera de los diez detectores se supera el límite establecido, se tomarán las acciones oportunas (comprobación del nivel de llenado de gas PR, limpieza del porta-muestras, sustitución del papel mylar) y a continuación se realizará una nueva medida de comprobación de que el valor del fondo cumple con el criterio establecido.

#### 4.3.- Eficiencia

Las eficiencias alfa y beta del equipo para espesor cero se determinan utilizando las fuentes certificadas descritas en el apartado 2.4.

El calibrado para la medida de la actividad alfa total se realiza con una fuente de  $^{241}\text{Am}$  y el de la actividad beta total con una fuente de  $^{90}\text{Sr}$  en equilibrio con  $^{90}\text{Y}$ . La verificación de estas

calibraciones requiere realizar las correspondientes correcciones por desintegración de las fuentes.

La eficiencia a aplicar para el cálculo de la actividad alfa o beta total es el cociente entre la tasa de recuento de la plancheta del patrón utilizado y la actividad de dicho patrón a la fecha de medida, de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$e_a = \frac{CPM_a}{60 \cdot A_a}$$

$$e_b = \frac{CPM_b}{60 \cdot A_b}$$

Donde:

$CPM_\alpha$  y  $CPM_\beta$  = tasa de recuento alfa o beta correspondiente a la fuente de calibración.

$A_\alpha$  y  $A_\beta$  = Actividad alfa o beta depositada en la fuente desintegrada a fecha del recuento.

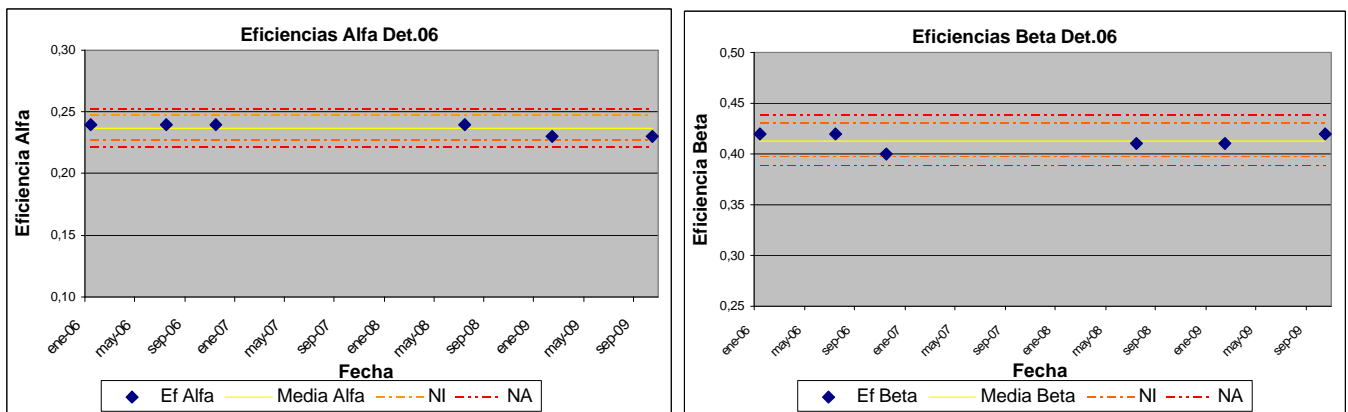


Figura-6. Control de la eficiencia en uno de los detectores del equipo de medida.

La verificación de la eficiencia se realiza periódicamente. Los valores experimentales obtenidos se han representado gráficamente en la Figura 6, donde se observa que la variación de este parámetro es muy pequeña siempre y cuando el sistema de medida opere en las condiciones adecuadas.

#### 4.4.- Cross-talk (superposición de señales)

Debido a la configuración del sistema de medida (medida secuencial de actividad alfa y beta), cuando se trabaja en la zona beta, se cuentan un cierto número de partículas alfa y por tanto es necesario corregir la actividad beta por este efecto.

Se define el “Cross-Talk” como la fracción de partículas alfa contadas en la zona beta cuando se mide una fuente alfa. Matemáticamente se calcula de acuerdo con la expresión siguiente:

$$g = \frac{\text{cuentas}_{\text{fuente Alfa}}(\text{mod } b)}{\text{cuentas}_{\text{fuente Alfa}}(\text{mod } a)}$$



Este parámetro debe ser obtenido experimentalmente para realizar la correspondiente corrección en el cálculo de la actividad beta.

## 5.- PROCESO DE CÁLCULO

### 5.1.- Cálculo de la actividad

La concentración de actividad alfa se calcula de acuerdo con la expresión siguiente:

$$A_a = \frac{r_{ga} - r_{0a}}{E \cdot 60 \cdot Y \cdot f}$$

Donde:

- $A_a$ : Concentración de actividad alfa total de la muestra (Bq/l; Bq/m<sup>3</sup>; Bq/frotis, Bq/g).
- $r_{ga}$ : Tasa de recuento bruta ("g" gross) alfa correspondiente a la muestra (cpm).
- $r_{0a}$ : Tasa de recuento alfa correspondiente al fondo o al blanco (cpm).
- E: Eficiencia de detección (alfa).
- Y: Tamaño de la muestra o de la alícuota analizada.
- f : factor de autoabsorción (sólo aplica a muestras líquidas).

En el cálculo de la concentración de actividad beta, hay que restar la contribución debida a la fracción de partículas alfa que se cuentan en la zona beta de acuerdo con la siguiente expresión:

$$A_b = \frac{r_{gb} - r_{0b} - [(r_{ga} - r_{0a}) \cdot g]}{E \cdot 60 \cdot Y \cdot f}$$

Donde:

- $A_b$ : Concentración de actividad beta total de la muestra (Bq/l; Bq/m<sup>3</sup>; Bq/frotis, Bq/g).
- $r_{ga}$ : Tasa de recuento alfa bruta ("g" gross) correspondiente a la muestra (cpm).
- $r_{gb}$ : Tasa de recuento beta bruta ("g" gross) correspondiente a la muestra (cpm).
- $r_{0a}$ : Tasa de recuento correspondiente al fondo/blanco en el canal alfa (cpm).
- $r_{0b}$ : Tasa de recuento correspondiente al fondo/blanco en el canal beta (cpm).
- E: Eficiencia de detección (beta).
- Y: Tamaño de la muestra o de la alícuota analizada.
- $g$ : factor de amplificación  $\alpha\beta$  (Cross-Talk)- Fracción de las emisiones alfa que se cuentan como beta.
- f : factor de autoabsorción (sólo aplica a muestras líquidas).

### 5.2.- Cálculo de la incertidumbre

La incertidumbre asociada a la concentración de actividad de una muestra se determina según las etapas definidas por la normativa internacional<sup>6</sup> que se define la función de actividad (Y) como una combinación de variables ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) que representan a la población. Los estimadores de estas variables ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) son el objeto de medida. La incertidumbre de la función actividad  $u(y)$  depende de la incertidumbre asociada a cada una de las variables, calculándose de manera experimental o conociendo las leyes que rigen su variabilidad.

En el caso de la función concentración de actividad alfa la función es del tipo:

$$Y = G(X_1, \dots, X_m) = (X_1 - X_2) \cdot \frac{1}{X_3 \cdot X_4 \cdots X_m \cdots} = (X_1 - X_2) \cdot W \quad (1)$$

En la expresión (1), las variables directamente relacionadas con el proceso de medida ( $X_1$  e  $X_2$ ) se separan de aquellas que intervienen en su determinación ( $X_3, X_4, \dots, X_m$ ) pero cuyas incertidumbres no están ligadas al proceso de recuento. Estas últimas se agrupan en un factor denominado "W".

La muestra que representa a esta población sería del tipo:

$$y = (x_1 - x_2) \cdot \frac{1}{x_3 \cdot x_4 \cdots x_m \cdots} = (x_1 - x_2) \cdot w \quad (1)$$

Donde:

$x_1 = r_g$  = tasa de recuento bruto de la muestra.

$$x_1 = r_g = \frac{n_g}{t_g} \quad y \quad u^2(x_1) = \frac{n_g}{t_g^2} = \frac{r_g}{t_g}$$

$x_2 = r_0$  = tasa de recuento de fondo o blanco.

$$x_2 = r_0 = \frac{n_0}{t_0} \quad y \quad u^2(x_2) = \frac{n_0}{t_0^2} = \frac{r_0}{t_0}$$

$n_g$  y  $n_0$  = cuentas totales brutas de la muestra y del fondo en los tiempos  $t_g$  y  $t_0$  respectivamente.

La incertidumbre asociada se calcula de acuerdo a la expresión siguiente:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (2)$$

Sustituyendo en la ecuación (2):

$$u(y) = \sqrt{w^2 \cdot [u^2(x_1) + u^2(x_2)] + y^2 \cdot u_{rel}^2(w)} \quad (3)$$

Donde: 
$$u_{rel}^2(w) = \sum_{i=3}^{i=m} \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}$$

En el caso de la función concentración de actividad beta la función es del tipo:

$$y = [(x_1 - x_2) - g(x_3 - x_4)]w$$

Y siguiendo las mismas etapas que en el caso anterior:

$$u(y) = \sqrt{w^2 \cdot [u^2(x_1) + u^2(x_2) + g^2(u^2(x_3) + u^2(x_4) + u^2(g)(x_3 - x_4)^2)] + y^2 \cdot u_{rel}^2(w)} \quad (4)$$

### 5.2.1 Cálculo de la incertidumbre de la concentración de actividad alfa

Teniendo en cuenta que el cálculo de la concentración de actividad alfa total se realiza de acuerdo con la expresión siguiente:

$$A_a = \frac{r_{g_a} - r_{0_a}}{Y \cdot E \cdot 60 \cdot f} = (r_{g_a} - r_{0_a}) \cdot w$$

Donde:

- $r_g$  = tasa de recuento bruta (“g” gross) de la muestra en cpm.
- $r_0$  = tasa de recuento de fondo o blanco en cpm.
- $Y$  = tamaño de la muestra.
- $E$  = eficiencia.
- $f$  = factor de autoabsorción (solo para muestras líquidas).
- $w = 1/(Y \cdot E \cdot 60 \cdot f)$  factor de “peso (w)” de conversión a unidades de actividad

El cálculo de la incertidumbre de la actividad alfa se realiza aplicando la ecuación (3) considerando el mismo tiempo de medida para el fondo y para la muestra ( $t_g = t_0$ ) de acuerdo con la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} u(A_a) &= \sqrt{w^2 \cdot [u^2(r_{g_a}) + u^2(r_{0_a})]} + A_a^2 \cdot u_{rel}^2(w) \\ u(A_a) &= \sqrt{\left(\frac{1}{V \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_{g_a}}{t_{g_a}} + \frac{r_{0_a}}{t_{0_a}}\right) + \left(\frac{r_{g_a} - r_{0_a}}{V \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot u_{rel}^2(w)} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{r_{g_a} - r_{0_a}}{V \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot \frac{1}{(r_{g_a} - r_{0_a})^2} \cdot \left(\frac{r_{g_a}}{t_{g_a}} + \frac{r_{0_a}}{t_{0_a}}\right) + \left(\frac{r_{g_a} - r_{0_a}}{V \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot u_{rel}^2(w)} = \\ &= A_a \cdot \sqrt{\left(\frac{n_{g_a}}{t_{g_a}^2} + \frac{n_{0_a}}{t_{0_a}^2}\right) \cdot \frac{1}{\left(\frac{n_{g_a}}{t_{g_a}} - \frac{n_{0_a}}{t_{0_a}}\right)^2} + u_{rel}^2(w)} = A_a \cdot \sqrt{\frac{n_{g_a} + n_{0_a}}{t^2} \cdot \frac{t^2}{(n_{g_a} - n_{0_a})^2}} \end{aligned}$$

$$\boxed{u(A_a) = A_a \cdot \sqrt{\frac{n_{g_a} + n_{0_a}}{(n_{g_a} - n_{0_a})^2} + u_{rel}^2(w)}} \quad (5)$$

Donde:

- $n_{g\alpha}$  = número de cuentas alfa brutas totales de la muestra.
- $n_{0\alpha}$  = número de cuentas alfa totales de fondo.
- $A_\alpha$  = actividad alfa.
- $u_{rel}^2(w)$  = incertidumbre relativa de los factores que no son del recuento (tamaño de muestra, eficiencia, factor de autoabsorción, homogeneidad...)

El cálculo de la incertidumbre se realiza sumando dos componentes, la debida al recuento (primer sumando de la raíz de la expresión (5)) y la correspondiente al resto de las variables ( $u_{rel}^2(w)$ ).

### 5.2.2 Cálculo de la incertidumbre de la concentración de actividad beta

La actividad beta se calcula restando la contribución debida a la fracción de partículas alfa que se cuentan en la zona beta (“cross-talk”), de acuerdo con la expresión siguiente:

$$A_b = \frac{(r_{gbeta} - r_{0beta}) - \mathbf{g} \cdot (r_{galfa} - r_{0alfa})}{Y \cdot E \cdot 60 \cdot f} = [(r_{gbeta} - r_{0beta}) - \mathbf{g} \cdot (r_{galfa} - r_{0alfa})] \cdot w$$

El cálculo de la incertidumbre de la actividad beta se obtiene aplicando la ecuación (4), obteniéndose la expresión siguiente:

$$u(A_b) = \sqrt{w^2 \cdot [(u^2(r_{gb}) + u^2(r_{0b}) + T(\mathbf{g}))] + A_b^2 \cdot u_{rel}^2(w)} \quad (6)$$

En este cálculo aparece un nuevo término  $T(\gamma)$  que engloba las incertidumbres del recuento alfa y del “cross-talk”:

$$T(\mathbf{g}) = (r_{ga} - r_{0a})^2 u^2(\mathbf{g}) + \mathbf{g}^2 \cdot (u^2(r_{ga}) + u^2(r_{0a})) \quad (7)$$

$$u(\mathbf{g}) = \sqrt{\mathbf{g}(\mathbf{g} + 1) / (r_{sa} \cdot t_{sa})} \quad (8)$$

Donde:

$r_{s\alpha}$ : tasa de recuento bruta de la fuente de calibración utilizada para determinar el cross-talk.

$t_{s\alpha}$ : tiempo de recuento bruta de la fuente de calibración.

El primer término de la ecuación (7) es despreciable frente al segundo, por lo que sustituyendo en la expresión (6) se transforma en la siguiente:

$$u(A_b) = \sqrt{\left(\frac{1}{Y \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot \left(\frac{r_{gb}}{t_{gb}} + \frac{r_{0b}}{t_{0b}} + \mathbf{g}^2 \cdot \left(\frac{r_{ga}}{t_{ga}} + \frac{r_{0a}}{t_{0a}}\right)\right) + \left(\frac{(r_{gb} - r_{0b}) - \mathbf{g}(r_{ga} - r_{0a})}{Y \cdot E \cdot 60 \cdot f}\right)^2 \cdot u_{rel}^2(w)}$$

Multiplicando y dividiendo el primer término de la raíz por  $\left(\frac{r_{gb} - r_{0b}}{t_{gb}} - \mathbf{g} \left(\frac{r_{ga} - r_{0a}}{t_{ga}}\right)\right)^2$  y teniendo en cuenta que  $t_{g\beta} = t_{0\beta} = t_{g\alpha} = t_{0\alpha}$ , se obtiene:

$$u(A_b) = A_b \cdot \sqrt{\left( \frac{n_{gb} + n_{0b} + g^2 \cdot (n_{ga} + n_{0a})}{t^2} \right) \cdot \left( \frac{t^2}{(n_{gb} - n_{0b}) - g \cdot (n_{ga} - n_{0a})} \right)^2} + u_{rel}^2(w)$$

$$\boxed{u(A_b) = A_b \sqrt{\left[ \frac{n_{gb} + n_{0b} + n_{ga} \cdot g^2 + n_{0a} \cdot g^2}{(n_{gb} - n_{0b}) - g \cdot (n_{ga} - n_{0a})} \right]^2} + u_{rel}^2(w)} \quad (9)$$

Donde:

$n_{g\beta}$  = cuentas brutas totales de la muestra en el modo  $\beta$ .

$n_{0\beta}$  = cuentas totales del fondo en modo  $\beta$ .

$n_{g\alpha}$  = cuentas brutas totales de la muestra en el modo  $\alpha$ .

$n_{0\alpha}$  = cuentas totales del fondo en modo  $\alpha$ .

Y = tamaño de la muestra.

E = eficiencia.

f = factor de autoabsorción (solo para muestras líquidas).

w =  $1/(Y \cdot E \cdot 60 \cdot f)$

$\gamma^2$  Cross-Talk.

$A_\beta$  = actividad beta.

$u_{rel}^2(w)$  = incertidumbre relativa de los factores que no son del recuento (tamaño de muestra, eficiencia, factor de autoabsorción, homogeneidad...)

La incertidumbre del factor W,  $u_{rel}^2(w)$  contiene las incertidumbres no derivadas directamente del recuento. El término  $u_{rel}^2(w)$  agrupa las incertidumbres debidas a la medida de volúmenes y áreas, a la de los factores de auto-absorción y heterogeneidad de la fuente y a la actividad de los materiales de referencia.

La incertidumbre del factor W en el caso de muestras líquidas corresponde a la suma de la incertidumbre asociada a la corrección por auto-absorción, a la correspondiente a la medida del volumen, a la medida de la eficiencia y a la asociada a la “no homogeneidad” de la muestra. Esta última se ha evaluado de acuerdo con el criterio que la guía MARLAP denomina “juicio de experto”. La evaluación de la incertidumbre del volumen se ha realizado de acuerdo con el criterio establecido en un documento técnico del CSN<sup>7</sup> sobre este tema.

En el caso de muestras de aerosoles retenidas en un filtro, hay que considerar la incertidumbre de la medida del aire muestreado. El criterio seguido ha sido considerar los valores recomendados en una de guía del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo<sup>8</sup>. Al igual que en las muestras líquidas, la evaluación de la incertidumbre asociada a la “no homogeneidad” tanto en aerosoles como en frotis se ha establecido de acuerdo con la experiencia del LMPR en este tipo de medidas.

### 5.3.- Cálculo de límites característicos

Los límites característicos para la medida de la radiactividad son: umbral de decisión (o límite crítico) y el límite de detección ( ó actividad mínima detectable).

La capacidad de detección de un método viene dada por el umbral de decisión y sirve (como su nombre indica) para tomar decisiones sobre la detección de la técnica instrumental empleada. Este límite admite varios criterios para la aceptación del valor de actividad como detectada, permitiendo un determinado margen de falsos positivos (normalmente se elige un 5%).

La sensibilidad de un método es la mínima cantidad de muestra que se puede detectar con una confianza dada, generalmente el 95% y se denomina límite de detección.

Ambos límites están correlacionados. El umbral de decisión depende únicamente de la incertidumbre del fondo ( $UD, L_C$ ) y el límite de detección ( $LD$ ) de la del fondo y de la muestra.

El criterio para la realización del cálculo de los límites característicos de este proceso de medida en el LMPR ha sido el de Currie<sup>8</sup>. En paralelo, se ha comenzado a realizar estos cálculos de acuerdo con la nueva normativa internacional<sup>10</sup>. En los apartados siguientes se presenta la comparación de ambos criterios.

### 5.3.1 Criterio de Currie

Los cálculos del límite crítico ( $L_C$ ) y de detección ( $L_D$ ) de acuerdo con el criterio de Currie<sup>8</sup> se realizan de acuerdo con las siguientes expresiones :

$$L_C = k_a \cdot \sigma_0 \quad \text{y} \quad L_D = L_C + k_b \cdot \sigma_D$$

Donde:

$k_\alpha$  y  $k_\beta$  = probabilidad de cometer errores de tipo I y II (falsos positivos y negativos).

$\sigma_0$  = desviación estándar del fondo .

$\sigma_D$  = desviación estándar cuando la señal neta es igual al  $L_D$ .

Empleando un valor de  $\alpha=\beta=0,05$ :

$$L_C = k \cdot \sqrt{2 \cdot n_0} \quad \quad \quad L_C = 1,65 \cdot \sqrt{2 \cdot n_0}$$

$$L_D = k^2 + 2 \cdot L_C \quad \quad \quad L_D = 1,65^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot n_0} = 2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{n_0}$$

Donde:

$n_0$  = cuentas totales de fondo.

El límite de detección expresado en unidades de concentración de actividad, se calcula de acuerdo con las expresiones siguientes que proceden de las anteriores al aplicarles el factor de conversión de cuentas a concentración de actividad:

$$LD_a = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \cdot \sqrt{n_{0a}}$$

$$LD_b = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0b} + g^2 \cdot (n_{ga} - n_{0a})}$$

- $n_{0\alpha}$ : Cuentas totales brutas alfa correspondiente al fondo en un tiempo t.
- $n_{0\beta}$ : Cuentas totales brutas beta correspondiente al fondo en tiempo t.
- $n_{g\alpha}$ : Cuentas totales alfa correspondiente a la muestra en el mismo tiempo de recuento que el fondo..

El término w varía dependiendo del tipo de muestra:

$$w_l = \frac{1}{E \cdot 60 \cdot Y \cdot T \cdot f} \quad \text{y} \quad w_f = \frac{1}{E \cdot 60 \cdot Y \cdot T}$$

Donde:

- $w_l$ : para muestras líquidas.
- $w_f$ : para muestras de filtros y frotis.
- E: eficiencia.
- T: tiempo de medida.
- Y: tamaño de muestra.
- f: factor de autoabsorción.

### 5.3.2 Criterio ISO

La norma ISO-11929 define el umbral de decisión  $y^*$ , de un mensurando no negativo, como aquel que cuantifica si existe el efecto físico de interés, definiéndose como:

$$y^* = k_{1-a} \cdot \tilde{u}(0)$$

Donde  $\tilde{u}(0)$  = incertidumbre del fondo o blanco

$k_{1-a}$  = Cuantil de la distribución estándar normalizada para un valor  $a = 5 \%$

El límite de detección  $y^\#$ , como el valor más pequeño del mensurando que satisface la ecuación:

$$y^\# = y^* + k_{1-b} \cdot u(y^\#)$$

La aplicación de este criterio al cálculo de la actividad alfa y beta total se realiza a partir de las ecuaciones de incertidumbres calculadas según el apartado 5.2. 1 y 5.2.2. Estas ecuaciones permiten obtener tanto el umbral de decisión como el límite de detección.

- a) Umbral de decisión para el cálculo de la actividad alfa y beta total definidos como  $A_a^*$  y  $A_b^*$  respectivamente.

Según la fórmula anterior y teniendo en cuenta que:

$$u(A_a) = \sqrt{w^2 \cdot \left[ u^2(r_{ga}) + u^2(r_{0a}) \right] + A_a^2 \cdot u_{rel}^2(w)}$$

Cuando  $A_a = 0$  se cumple que  $r_{ga} = r_{0a}$  o lo que es lo mismo  $n_{ga} = n_{0a} \frac{t_g}{t_0}$

Sustituyendo en la ecuación de incertidumbre anterior:

$$\tilde{u}(0) = \sqrt{w^2 \cdot \left[ \frac{r_{ga}}{t_g} + \frac{r_{0a}}{t_0} \right]} = \sqrt{w^2 \cdot \left[ \frac{n_{0a}}{t_0 t_g} + \frac{n_{0a}}{t_0 t_0} \right]}$$

Para tiempos iguales de recuento de fondo y muestra la anterior expresión se convierte en :

$$A_a^* = k_{1-a} w \sqrt{\frac{2n_{0a}}{t_0^2}}$$

similar a la expresión de Currie.

Siguiendo el mismo procedimiento para el cálculo del umbral de la concentración de actividad beta.

$$u(A_b) = \sqrt{w^2 \cdot \left[ u^2(r_{gb}) + u^2(r_{0b}) + T(\mathbf{g}) \right]} + A_b^2 \cdot u_{rel}^2(w)$$

En este caso, cuando la actividad beta es cero se cumple que :  $r_{gb} = \mathbf{g}(r_{ga} - r_{0a}) + r_{0b}$

$$\tilde{u}(0) = \sqrt{w^2 \cdot \left[ \frac{\mathbf{g}(r_{ga} - r_{0a}) + r_{0b}}{t_{gb}} + \frac{r_{0b}}{t_{0b}} + \mathbf{g}^2 \cdot \left( \frac{r_{ga}}{t_{ga}} + \frac{r_{0a}}{t_{0a}} \right) + (r_{ga} - r_{0a})^2 u^2(\mathbf{g}) \right]}$$

Para tiempos iguales de recuento de la muestra y el fondo y del recuento del cross-talk:

La ecuación general

$$A_b^* = k_{1-a} \sqrt{w^2 \cdot \left[ \frac{\mathbf{g}(r_{ga} - r_{0a}) + r_{0b}}{t_{gb}} + \frac{r_{0b}}{t_{0b}} + \mathbf{g}^2 \cdot \left( \frac{r_{ga}}{t_{ga}} + \frac{r_{0a}}{t_{0a}} \right) + (r_{ga} - r_{0a})^2 u^2(\mathbf{g}) \right]}$$

Se convierte en :

$$A_b^* = k_{1-a} \sqrt{w^2 \cdot \left[ \frac{\mathbf{g}(r_{ga} - r_{0a}) + 2r_{0b}}{t_{0b}} + \mathbf{g}^2 \cdot \left( \frac{r_{ga} + r_{0a}}{t_{0a}} \right) + (r_{ga} - r_{0a})^2 u^2(\mathbf{g}) \right]}$$

b) Los límites de detección para la concentración de actividad alfa y beta se definen como  $A_a^\#$  y  $A_b^\#$  y tienen la ecuación general:

$$\boxed{A_a^\# = \frac{2 \cdot A_a^* + w \cdot k_{1-b}^2}{\left( 1 - k_{1-b}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2 \right)}} \quad \boxed{A_b^\# = \frac{2 \cdot A_b^* + w \cdot k_{1-b}^2}{\left( 1 - k_{1-b}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2 \right)}}$$



Dado que en el LMPR, la medida de la actividad alfa y beta total se realiza para tres tipos distintos de muestras, uno de los requisitos establecidos dentro del programa de control de calidad establecido es la comprobación manual de todos los cálculos descritos en los apartados anteriores. En el Anexo-1 de este informe se presentan tres ejemplos correspondientes a los tres tipos de muestra considerados en el LMPR.

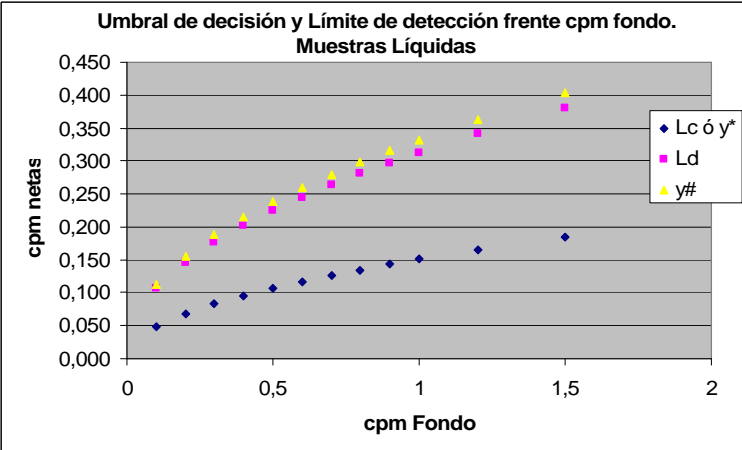


Figura 7. Comparación entre los límites característicos (muestras líquidas).

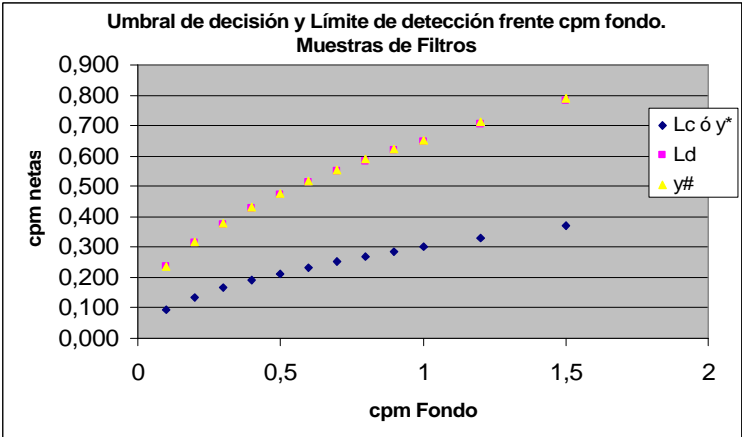


Figura 8. Comparación entre los límites característicos (muestras de aerosoles).

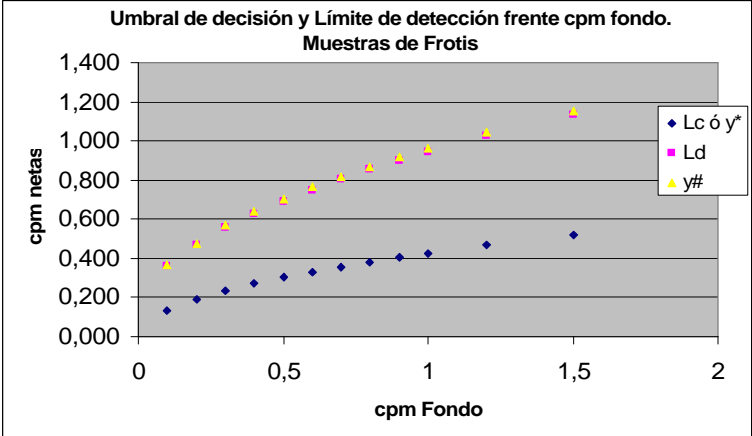


Figura 9. Comparación entre los límites característicos (muestras de frotis).

La comparación para estos tres ejemplos de los valores numéricos obtenidos para el límite de detección de acuerdo con el criterio de Currie<sup>8</sup> y con la aplicación de la norma ISO-11929<sup>3</sup> se presenta en la Tabla-1.

Tabla-1. Comparación de criterios para obtención del límite de detección

Tipo de muestra	Criterio Currie	Criterio ISO
Líquido	$L_{C\alpha} = 1.3E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$	$L_{C\alpha} = 1.3E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
	$L_{D\alpha} = 2.9E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$	$L_{D\alpha} = 3.1E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
	$L_{C\beta} = 1.3E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$	$L_{C\beta} = 1.6E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
	$L_{D\beta} = 2.7E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$	$L_{D\beta} = 3.3E-01 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$
Aerosoles	$L_{C\alpha} = 1.1E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$L_{C\alpha} = 1.1E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
	$L_{D\alpha} = 2.6E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$L_{D\alpha} = 2.6E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
	$L_{C\beta} = 4.5E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$L_{C\beta} = 6.3E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
	$L_{D\beta} = 9.2E-03 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$L_{D\beta} = 1.3E-02 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$
Frotis	$L_{C\alpha} = 1.8E-02 \text{ Bq}$	$L_{C\alpha} = 1.8E-02 \text{ Bq}$
	$L_{D\alpha} = 4.2E-02 \text{ Bq}$	$L_{D\alpha} = 4.3E-02 \text{ Bq}$
	$L_{C\beta} = 5.2E-02 \text{ Bq}$	$L_{C\beta} = 7.0E-02 \text{ Bq}$
	$L_{D\beta} = 1.07E-01 \text{ Bq}$	$L_{D\beta} = 1.45E-01 \text{ Bq}$

Los valores de los límites dependen fundamentalmente del valor del fondo ambiental. En las figuras 7,8 y 9 se presentan las comparaciones (para los tres tipos de muestra considerados en el LMPR) entre los valores de los límites característicos establecidos por la ISO y el valor del  $L_D$  calculado de acuerdo con el criterio de Currie<sup>8</sup>.

## 6.- PROGRAMA DE CALIDAD

### 6.1.- Procedimiento de ensayo y calibración

El LMPR dispone de un procedimiento de ensayo para determinación de actividad alfa y beta total en líquidos, frotis y filtros ambientales, donde se describe la preparación de las muestras, el sistema de medida, su calibrado y los cálculos a realizar. Este procedimiento forma parte de la documentación gestionada por el Servicio de Garantía de Calidad del CIEMAT.

### 6.2.- Verificación y mantenimiento del sistema de medida.

De acuerdo con el Manual de Calidad del laboratorio<sup>9</sup>, se ha establecido para este sistema de medida un programa de Calibración, Verificación y Mantenimiento.

La calibración se realiza con los materiales de referencia certificados por la Unidad de Metrología de Radiaciones del CIEMAT. Semestralmente se realiza una verificación de eficiencias, curva característica y cross-talk cuyo resultado es archivado por el responsable de calidad del laboratorio.

### 6.3.- Control de los indicadores

El control del fondo se realiza semanalmente con una medida de al menos 30 minutos con los detectores vacíos para controlar posibles contaminaciones. Además cada vez que se cambia la bala de gas argón-metano se realiza un recuento de los blancos para verificar que el fondo se mantiene dentro de los niveles fijados. La configuración del equipo es tal que antes de realizar la medida de una muestra, se realiza un recuento de fondo utilizando “muestras blanco”. El responsable de las medidas alfa-beta total verifica que los fondos de cada detector están dentro del intervalo establecido de acuerdo con el criterio descrito en el apartado 4.2.

El control del resto de los indicadores está incluido en el programa de verificación descrito en el apartado 6.2.

### 6.4.- Comprobación de los cálculos

La verificación de los cálculos se realiza con una muestra de cada tipo como se presenta en el Anexo I siguiendo la formulación del apartado 5. Se incluyen los cálculos manuales de tres ejemplos numéricos (uno para cada tipo de muestra) donde se verifica que los resultados reportados por el programa de cálculo coinciden con el cálculo manual.

### 6.5.- Programa de seguimiento de la calidad

La existencia en el LMPR de otras técnicas de medida (espectrometría alfa, espectrometría gamma con detectores de semiconductor y espectrometría de centelleo en fase líquida) permite para determinados radionucleidos la obtención de resultados de concentración de actividad en muestras de forma independiente representando una verificación adicional de los procedimientos de medida de la actividad alfa y beta total.

El responsable de calidad del LMPR selecciona una muestra de comprobación, de acuerdo con el programa establecido, al menos cada seis meses y cuyos resultados se incluyen en el archivo de calidad.

Tabla-2: Comparación de resultados de muestras reales

Ref.Lab.	Espectrometría ALFA		Alfa total (c.proporcional)	
	Actividad ALFA ? 2?		Actividad ALFA ? 2?	
	Bq/L		Bq/L	
<b>RL-4440</b>	2,90E+00	± 0,50E+00	3,04E+00	± 0,69E+00
<b>RL-6782</b>	7,97E-01	± 0,89E-01	6,04E-01	± 2,36E-01
<b>RL-6785</b>	8,11E-01	± 0,85E-01	8,24E-01	± 2,48E-01
<b>RL-6793</b>	8,24E-01	± 1,30E-01	8,64E-01	± 2,92E-01
<b>RL-6886</b>	2,30E+00	± 0,22E+00	1,78E+00	± 0,43E+00
<b>RL-6895</b>	8,40E-01	± 0,64E-01	8,43E-01	± 2,44E-01
<b>RL-7217-2</b>	6,82E-01	± 0,94E-01	7,97E-01	± 2,56E-01
<b>RL-7350</b>	2,58E+00	± 0,34E+00	3,11E+00	± 0,70E+00
<b>RL-7422</b>	1,30E+00	± 0,16E+00	1,70E+00	± 0,41E+00

En la Tabla-2 se presenta una comparación de resultados de actividad alfa total en muestras reales obtenidas mediante determinación de actividad alfa total y mediante espectrometría alfa. En todos los casos los resultados son coherentes considerando las incertidumbres asociadas a ambas técnicas de medida.

## **7.- CONCLUSIONES**

Se ha realizado una revisión de los requisitos básicos de calidad que afectan a la medida de la actividad alfa y beta total en un laboratorio radiológico de acuerdo con la normativa internacional (ISO/IEC 17025:2005).

El diseño del programa de calidad a establecer en este caso particular, además de cumplir con la norma general, incluye la identificación y verificación de los indicadores de la calidad del proceso. Los criterios para establecer el control de estos indicadores se han realizado de acuerdo con las recomendaciones de la guía MARLAP.

## **8.- BIBLIOGRAFÍA**

- (1) Norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2005. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- (2) International Standard ISO10704:2009. Water quality -- Measurement of gross alpha and gross beta activity in non-saline water -Thin source deposit method.
- (3) International Standard ISO11929:2010. Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurement of ionizing radiation. Fundamentals and application.
- (4) MARLAP. MultiAgency Radiological Laboratory Analytical Protocols Manual.
- (5) Pérez, C., Sujar, H., Gascó, C., Trinidad, J.A., Yagüe, L. "Aplicaciones Informáticas para el cálculo de la actividad alfa y beta total con contadores proporcionales". XII Congreso Nacional de la Sociedad Española de Protección Radiológica, Alicante Junio 2009.
- (6) Procedimiento para la evaluación de incertidumbres en la determinación de la radiactividad ambiental. Colección Informes Técnicos CSN 11.2003, Serie Vigilancia Radiológica Ambiental Procedimiento 1.3.
- (7) Determinación de la incertidumbre de medida de agentes químicos. CR-04(2008). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- (8) Currie, LL. "Limits for qualitative detection and quantitative determination", Anal. Chem. 40 (3), 586-593, 1968.
- (9) Manual de calidad del Laboratorio de Medidas de Protección Radiológica.
- (10) C. Gascó, M. Martínez, M<sup>a</sup> Heras. "Métodos para la Resolución del Problema de la Detección de Radiactividad en Muestras Ambientales. Límites característicos". Report CIEMAT-1166. Ed. CIEMAT. Madrid. Abril 2008 .ISSN: 1135-9420

## **ANEXO I**

**“Comprobación manual de los cálculos. Ejemplos numéricos”**

## EJEMPLO NUMÉRICO 1:

Tipo de muestra: **LIQUIDO**  
 Volumen: **0,05 l**  
 Peso residuo sólido: **39,4 mg**

Eficiencia alfa: **0,22**  
 Eficiencia beta: **0,40**  
 Tiempo de recuento: **240 min**

Recuento:

FONDO ALFA  $r_{0a}$ : **0,104 cpm**  
 FONDO BETA  $r_{0b}$ : **0,613 cpm**

MUESTRA ALFA  $r_{ga}$ : **0,679 cpm**  
 MUESTRA BETA  $r_{gb}$ : **31,570 cpm**

$$A_a = \frac{r_{ga} - r_{0a}}{E \cdot 60 \cdot V \cdot f} = 1,53 \text{ Bq/l}$$

$$LD_a = 2,71 \cdot w_l + 4,65 \cdot w_l \sqrt{n_{0a}} = 0,29 \text{ Bq/l}$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0216$  para líquidos y actividad alfa:

$$u(A_a) = A_a \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{ga} + n_{0a}}{(n_{ga} - n_{0a})^2} \right]} = 0,27 \quad (2 \text{ sigma}) : 0,27 \cdot 2 = 0,54$$

$$\boxed{A_a = 1,53 \pm 0,54 \text{ Bq/l} \quad (LD = 0,29 \text{ Bq/l})}$$

$$A_b = \frac{r_{gb} - r_{0b} - [(r_{ga} - r_{0a}) \cdot g]}{E \cdot 60 \cdot Y \cdot f} = 27,58 \text{ Bq/l}$$

$$LD_b = 2,71 \cdot w_l + 3,3 \cdot w_l \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0b} + g^2 \cdot (n_{ga} - n_{0a})} = 0,27 \text{ Bq/l}$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0078$  para líquidos y actividad beta:

$$u(A_b) = A_b \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{gb} + n_{0b} + n_{ga} \cdot g^2 + n_{0a} \cdot g^2}{((n_{gb} - n_{0b}) - g \cdot (n_{ga} - n_{0a}))^2} \right]} = 2,46$$

$$(2 \text{ sigma}) : 2,46 \cdot 2 = 4,92$$

$$\boxed{A_b = 27,58 \pm 4,92 \text{ Bq/l} \quad (LD = 0,27 \text{ Bq/l})}$$

### SALIDA DEL PROGRAMA PARA EJEMPLO NUMÉRICO 1 (líquidos):

REFERENCIA DE LABORATORIO	Tamaño de muestra	Peso del residuo (mg)	Detector	Actividad ALFA $\pm 2\sigma$		AMD ALFA	Actividad BETA $\pm 2\sigma$		AMD BETA
				Bq/l			Bq/l		
Ejemplo numérico 1	0,05	39,4	1	1,532E+00	± 5,436E-01	2,880E-01	2,758E+01	± 4,921E+00	2,697E-01
			2	Detector vacío			Detector vacío		
			3	Detector vacío			Detector vacío		
			4	Detector vacío			Detector vacío		
			5	Detector vacío			Detector vacío		
			6	Detector vacío			Detector vacío		
			7	Detector vacío			Detector vacío		
			8	Detector vacío			Detector vacío		
			9	Detector vacío			Detector vacío		
			10	Detector vacío			Detector vacío		

**-Comparación del AMD con el Umbral de Decisión y Límite de Detección (Ejemplo 1):**

**EJEMPLO 1: ACTIVIDAD ALFA TOTAL (MUESTRA LIQUIDA)**

$A_{\alpha} = \frac{n_g - n_0}{V \cdot \epsilon \cdot f \cdot T \cdot 60}$	$w_l = \frac{1}{V \cdot \epsilon \cdot f \cdot T \cdot 60}$
$r_g =$ gross count rate =	0,679
$r_0 =$ backg. count rate =	0,104
$E =$ eficiencia =	0,22
$f =$ factor autoabs. =	0,569
$V =$ volumen =	0,05
$t =$ tiempo medida =	240

$A_{\alpha} =$	1,53	$\pm$	0,54	Bq/l	(k=2)
<b>AMD =</b>	<b>0,29 Bq/l</b>				
ISO 11929					
$y^* =$	0,13	Bq/l	<b>Umbral decisión</b>		
$y^{\#} =$	0,31	Bq/l	<b>Limite detección</b>		

$$AMD_{\alpha} = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \sqrt{n_{0\alpha}}$$

$A_{\alpha} =$	<b>1,53 Bq/l</b>
----------------	------------------

$$u^2_{rel}(w) = 0,0216$$

$$u(A_{\alpha}) = A_{\alpha} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \left[ \frac{n_g + n_0}{(n_g - n_0)^2} \right]}$$

$$u(A_{\alpha}) = 0,2716$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w_l \cdot k_{1-\beta}^2}{\left( 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w_l)}{w_l} \right)^2 \right)}$$

$y^{\#} =$	<b>0,31 Bq/l</b>
------------	------------------

**EJEMPLO 1: ACTIVIDAD BETA TOTAL (MUESTRA LIQUIDA)**

$A_{\beta} = \frac{n_{\beta} - n_{0\beta} - (n_{\alpha} - n_{0\alpha}) \cdot \gamma}{V \cdot \epsilon \cdot 60 \cdot f \cdot T}$	$w = \frac{1}{V \cdot \epsilon \cdot f \cdot T \cdot 60}$
--	---

	Beta	Alfa
$r_g =$ gross count rate =	31,57	0,679
$r_0 =$ backg. count rate =	0,613	0,104
$E =$ eficiencia =	0,4	
$f =$ factor autoabs. =	0,918	
$V =$ volumen =	0,05	
$t =$ tiempo medida =	240	

$A_{\beta} =$	27,6	$\pm$	4,9	Bq/l	(k=2)
<b>AMD =</b>	<b>0,27 Bq/l</b>				
ISO 11929					
$y^* =$	0,16	Bq/l	<b>Umbral decisión</b>		
$y^{\#} =$	0,33	Bq/l	<b>Limite detección</b>		

$$AMD_{\beta} = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0\beta} + \gamma^2 \cdot (n_{\alpha} - n_{0\alpha})}$$

$A_{\beta} =$	<b>27,6 Bq/l</b>
---------------	------------------

$$u^2_{rel}(w) = 0,0078$$

$$u(A_{\beta}) = A_{\beta} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \left[ \frac{n_{\beta} + n_{0\beta} + n_{\alpha} \cdot \gamma^2 + n_{0\alpha} \cdot \gamma^2}{(n_{\beta} - n_{0\beta}) - \gamma \cdot (n_{\alpha} - n_{0\alpha})} \right]^2}$$

$$u(A_{\beta}) = 2,4589$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w_l \cdot k_{1-\beta}^2}{\left( 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w_l)}{w_l} \right)^2 \right)}$$

$y^{\#} =$	<b>0,33 Bq/l</b>
------------	------------------

## EJEMPLO NUMÉRICO 2:

Tipo de muestra: FILTRO

Volumen: 10 m<sup>3</sup>

Eficiencia alfa: 0,24

Eficiencia beta: 0,41

Tiempo de recuento: 60 min

Recuento:

FONDO ALFA r<sub>0a</sub>: 0,300 cpm

FONDO BETA r<sub>0b</sub>: 0,983 cpm

MUESTRA ALFA r<sub>ga</sub>: 25,380 cpm

MUESTRA BETA r<sub>gb</sub>: 948,900 cpm

$$A_a = \frac{r_{ga} - r_{0a}}{E \cdot 60 \cdot V} = 1,74 \cdot 10^{-1} \text{ Bq/m}^3$$

$$LD_a = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \sqrt{n_{0a}} = 2,60 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0030$  para filtros y actividad alfa:

$$u(A_a) = A_a \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{ga} + n_{0a}}{(n_{ga} - n_{0a})^2} \right]} = 1,06 \cdot 10^{-2} \quad (2 \sigma) : 1,06 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 2,12 \cdot 10^{-2}$$

$$\boxed{A_a = 1,74 \cdot 10^{-1} \pm 0,21 \cdot 10^{-1} \text{ Bq/m}^3 \quad (LD = 2,60 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3)}$$

$$A_b = \frac{r_{gb} - r_{0b} - [(r_{ga} - r_{0a}) \cdot g]}{E \cdot 60 \cdot V} = 3,75 \text{ Bq/m}^3$$

$$LD_b = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0b} + g^2 \cdot (n_{ga} - n_{0a})} = 9,2 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0027$  para filtros y actividad beta:

$$u(A_b) = A_b \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{gb} + n_{0b} + n_{ga} \cdot g^2 + n_{0a} \cdot g^2}{(n_{gb} - n_{0b}) - g \cdot (n_{ga} - n_{0a})} \right]^2} = 0,195$$

$$(2 \text{ sigma}) : 0,195 \cdot 2 = 0,391$$

$$\boxed{A_b = 3,75 \pm 0,39 \text{ Bq/m}^3 \quad (LD = 9,20 \cdot 10^{-3} \text{ Bq/m}^3)}$$

### SALIDA DEL PROGRAMA PARA EJEMPLO NUMÉRICO 2 (Filtro):

REFERENCIA DE LABORATORIO	Tamaño de muestra	Detector	Actividad ALFA ± 2σ	AMD ALFA	Actividad BETA ± 2σ	AMD BETA
			Bq/m3		Bq/m3	
		1	Detector vacío		Detector vacío	
Ejemplo numérico 2	10	2	1,740E-01 ± 2,111E-02	2,597E-03	3,751E+00 ± 3,912E-01	9,185E-03
		3	Detector vacío		Detector vacío	
		4	Detector vacío		Detector vacío	
		5	Detector vacío		Detector vacío	
		6	Detector vacío		Detector vacío	
		7	Detector vacío		Detector vacío	
		8	Detector vacío		Detector vacío	
		9	Detector vacío		Detector vacío	
		10	Detector vacío		Detector vacío	



**-Comparación del AMD con el Umbral de Decisión y Límite de Detección (Ejemplo 2):**

**EJEMPLO 2: ACTIVIDAD ALFA TOTAL (MUESTRA FILTRO)**

$$A_{\alpha} = \frac{n_g - n_0}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60} \quad w = \frac{1}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60}$$

$r_g$ = gross count rate =	25,38
$r_0$ = backg. count rate =	0,3
E = eficiencia =	0,24
V = volumen =	10
t = tiempo medida =	60

$$A_{\alpha} = 0,17 \text{ Bq/m}^3$$

$$u^2_{rel}(w) = 0,0030$$

$$u(A_{\alpha}) = A_{\alpha} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \frac{n_g + n_0}{(n_g - n_0)^2}}$$

$$u(A_{\alpha}) = 0,0106$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w \cdot k_{1-\beta}^2}{1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2}$$

$$y^{\#} = 0,0026 \text{ Bq/m}^3$$

$A_{\alpha} =$	0,17	$\pm$	0,02	Bq/m <sup>3</sup>	(k=2)
AMD =	0,0026 Bq/m <sup>3</sup>				
ISO 11929					
$y^*$ =	0,0011	Bq/m <sup>3</sup>	Umbral decisión		
$y^{\#}$ =	0,0026	Bq/m <sup>3</sup>	Límite detección		

$$AMD_{\alpha} = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \sqrt{n_{0_{\alpha}}}$$

**EJEMPLO 2: ACTIVIDAD BETA TOTAL (MUESTRA FILTRO)**

$$A_{\beta} = \frac{n_{g\beta} - I_{b\beta} - (n_{g\alpha} - I_{b\alpha}) \cdot \gamma}{V \cdot \varepsilon \cdot 60 T} \quad w = \frac{1}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60}$$

	Beta	Alfa
$r_g$ = gross count rate =	948,9	25,38
$r_0$ = backg. count rate =	0,983	0,3
E = eficiencia =	0,41	
V = volumen =	10	
t = tiempo medida =	60	

$$A_{\beta} = 3,75 \text{ Bq/m}^3$$

$$u^2_{rel}(w) = 0,0027$$

$$u(A_{\beta}) = A_{\beta} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \frac{n_{g\beta} + n_{0\beta} + n_{g\alpha} \cdot \gamma^2 + n_{0\alpha} \cdot \gamma^2}{(n_{g\beta} - n_{0\beta}) - \gamma(n_{g\alpha} - n_{0\alpha})^2}}$$

$$u(A_{\beta}) = 0,1956$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w \cdot k_{1-\beta}^2}{1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2}$$

$$y^{\#} = 0,013 \text{ Bq/m}^3$$

$A_{\beta} =$	3,75	$\pm$	0,39	Bq/m <sup>3</sup>	(k=2)
AMD =	0,009 Bq/m <sup>3</sup>				
ISO 11929					
$y^*$ =	0,006	Bq/m <sup>3</sup>	Umbral decisión		
$y^{\#}$ =	0,013	Bq/m <sup>3</sup>	Límite detección		

$$AMD_{\beta} = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0\beta} + \gamma^2 \cdot (n_{g\alpha} - n_{0\alpha})}$$

### EJEMPLO NUMÉRICO 3:

Tipo de muestra: FROTIS  
 Tamaño muestra: 1 frotis  
 Eficiencia alfa: 0,25

Eficiencia beta: 0,41  
 Tiempo de recuento: 30 min

Recuento:

FONDO ALFA  $r_{0a}$ : 0,400 cpm  
 FONDO BETA  $r_{0b}$ : 1,400 cpm

MUESTRA ALFA  $r_{ga}$ : 14,000 cpm  
 MUESTRA BETA  $r_{gb}$ : 2148,000 cpm

$$A_a = \frac{r_{ga} - r_{0a}}{E \cdot 60 \cdot V} = 0,91 \text{ Bq/frotis}$$

$$LD_a = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \sqrt{n_{0a}} = 4,2 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/m}^3$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0068$  para frotis y actividad alfa:

$$u(A_a) = A_a \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{ga} + n_{0a}}{(n_{ga} - n_{0a})^2} \right]} = 8,79 \cdot 10^{-2} \quad (2\sigma) : 8,790 \cdot 10^{-2} \cdot 2 = 0,18$$

$$\boxed{A_a = 0,91 \pm 0,18 \text{ Bq/frotis} \quad (LD = 4,20 \cdot 10^{-2} \text{ Bq/frotis})}$$

$$A_b = \frac{r_{gb} - r_{0b} - [(r_{ga} - r_{0a}) \cdot g]}{E \cdot 60 \cdot V} = 8,67 \cdot 10^1 \text{ Bq/frotis}$$

$$LD_b = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot n_{0b} + g^2 \cdot (n_{ga} - n_{0a})} = 0,10 \text{ Bq/frotis}$$

En el cálculo de la incertidumbre  $u_{rel}^2(w) = 0,0065$  para frotis y actividad beta:

$$u(A_b) = A_b \sqrt{u_{rel}^2(w) + \left[ \frac{n_{gb} + n_{0b} + n_{ga} \cdot g^2 + n_{0a} \cdot g^2}{(n_{gb} - n_{0b}) - g \cdot (n_{ga} - n_{0a})} \right]^2} = 7,00$$

Multiplicamos por 2 (2 sigma) :  $7,00 \cdot 2 = 14,00$

$$\boxed{A_b = 86,7 \pm 14,0 \text{ Bq/frotis} \quad (LD = 0,10 \text{ Bq/frotis})}$$

### SALIDA DEL PROGRAMA PARA EJEMPLO NUMÉRICO 3 (frotis):

REFERENCIA DE LABORATORIO	Tamaño de muestra	Detector	Actividad ALFA $\pm 2\sigma$			AMD ALFA	Actividad BETA $\pm 2\sigma$			AMD BETA
			Bq/frotis				Bq/frotis			
		1	Detector vacío				Detector vacío			
		2	Detector vacío				Detector vacío			
Ejemplo numérico 3	1	3	9,067E-01	±	1,758E-01	4,182E-02	8,671E+01	±	1,400E+01	1,029E-01
		4	Detector vacío				Detector vacío			
		5	Detector vacío				Detector vacío			
		6	Detector vacío				Detector vacío			
		7	Detector vacío				Detector vacío			
		8	Detector vacío				Detector vacío			
		9	Detector vacío				Detector vacío			
		10	Detector vacío				Detector vacío			

**-Comparación del AMD con el Umbral de Decisión y Límite de Detección (Ejemplo 3):**

**EJEMPLO 3: ACTIVIDAD ALFA TOTAL (MUESTRA FROTIS)**

$$A_{\alpha} = \frac{n_g - n_0}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60} \quad w = \frac{1}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60}$$

$r_g$ = gross count rate =	14
$r_0$ = backg. count rate =	0,4
$E$ = eficiencia =	0,25
$V$ = volumen =	1
$t$ = tiempo medida =	30

$A_{\alpha} =$	0,91	$\pm$	0,18	Bq/frotis	(k=2)
<b>AMD =</b>	<b>0,042 Bq/frotis</b>				
ISO 11929					
$y^*$ =	0,018	Bq/frotis	Umbral decisión		
$y^{\#}$ =	0,043	Bq/frotis	Limite detección		

$$AMD_{\alpha} = 2,71 \cdot w + 4,65 \cdot w \sqrt{n_{0_{\alpha}}}$$

$$A_{\alpha} = 0,91 \text{ Bq/frotis}$$

$$u^2_{rel}(w) = 0,0068$$

$$u(A_{\alpha}) = A_{\alpha} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \left[ \frac{n_g + n_0}{(n_g - n_0)^2} \right]}$$

$$u(A_{\alpha}) = 0,0879$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w \cdot k_{1-\beta}^2}{\left( 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2 \right)}$$

$$y^{\#} = 0,043 \text{ Bq/frotis}$$

**EJEMPLO 3: ACTIVIDAD BETA TOTAL (MUESTRA FROTIS)**

$$A_{\beta} = \frac{n_{g\beta} - I_{b\beta} - [(n_{g\alpha} - I_{b\alpha}) \cdot \gamma]}{V \cdot \varepsilon \cdot 60 T} \quad w = \frac{1}{V \cdot \varepsilon \cdot T \cdot 60}$$

	Beta	Alfa
$r_g$ = gross count rate =	2148	14
$r_0$ = backg. count rate =	1,4	0,4
$E$ = eficiencia =	0,41	
$V$ = volumen =	1	
$t$ = tiempo medida =	30	

$A_{\beta} =$	86,7	$\pm$	14,0	Bq/frotis	(k=2)
<b>AMD =</b>	<b>0,10 Bq/frotis</b>				
ISO 11929					
$y^*$ =	0,07	Bq/frotis	Umbral decisión		
$y^{\#}$ =	0,14	Bq/frotis	Limite detección		

$$AMD_{\beta} = 2,71 \cdot w + 3,3 \cdot w \sqrt{2 \cdot n_{0\beta} + \gamma^2 \cdot (n_{g\alpha} - n_{0\alpha})}$$

$$A_{\beta} = 86,7 \text{ Bq/frotis}$$

$$u^2_{rel}(w) = 0,0065$$

$$u(A_{\beta}) = A_{\beta} \sqrt{u^2_{rel}(w) + \left[ \frac{n_{g\beta} + n_{0\beta} + n_{g\alpha} \cdot \gamma^2 + n_{0\alpha} \cdot \gamma^2}{(n_{g\beta} - n_{0\beta}) - \gamma \cdot (n_{g\alpha} - n_{0\alpha})} \right]^2}$$

$$u(A_{\beta}) = 6,9991$$

$$y^{\#} = \frac{2 \cdot y^* + w \cdot k_{1-\beta}^2}{\left( 1 - k_{1-\beta}^2 \cdot \left( \frac{u(w)}{w} \right)^2 \right)}$$

$$y^{\#} = 0,14 \text{ Bq/frotis}$$