

Revisión de los criterios
para la determinación de la
concentración de la actividad
mínima detectable (AMD)
de radionucleidos alfa
en muestras ambientales

C. Gascó
M.P. Antón

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.

Depósito Legal: M-14226-1995

NIPO: 238-96-001-0

ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

540130, 540230, 540330

ENVIRONMENT, RADIONUCLIDE MIGRATION, ALPHA DETECTION, COMPUTER CALCULATIONS, AIR POLLUTION MONITORING, SOILS, AQUATIC ECOSYSTEMS, RADIOACTIVITY

"Revisión de los criterios para la determinación de la concentración de actividad mínima detectable (AMD) de radionucleidos emisores alfa en muestras ambientales"

Gascó, C.; Antón, M.P.
51 págs., 2 figs. 9 refs.

Resumen

Los diferentes criterios para el cálculo de la actividad mínima detectable (AMD) de un emisor alfa en niveles ambientales son revisados en este trabajo, presentándose ejemplos de su aplicación a muestras reales.

Las autoras proponen un criterio basado en los anteriores que se ajusta a la práctica común del laboratorio radioquímico.

El procedimiento para el cálculo del AMD ha sido discutido con científicos de diversos laboratorios, intentando fijar un criterio general de cálculo.

"Critical review for the determination of the minimum detectable activity (MDA) of alpha-emitter radionuclides in environmental samples"

Gascó, C.; Antón, M.P.
51 págs., 2 figs. 9 refs.

Abstract

Different criteria for the calculation of the Minimum Detectable Activity (MDA) of an alpha emitter in environmental levels are reviewed in this report. Practical examples of its application to previously analyzed samples are shown.

The authors propose a criterium based on prior calculations that applies to the radiochemical activities performed in the laboratory. The calculation procedure has been discussed with scientist from other laboratories in order to establish a general criterium to calculate the MDA.

INDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	3
2. CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD MÍNIMA DETECTABLE (AMD)	3
2.1 Definición general del AMD	4
2.2 Criterio de Currie aplicado a medidas de bajo fondo.....	5
2.3 Criterio del departamento de Energía de USA (DOE-EML).....	6
2.4 Criterio del laboratorio de Rockwell de USA	8
2.5 Criterio del National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido.....	9
3. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE AMD A UN CASO REAL. COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	14
3.1 Criterio de Currie.....	16
3.2 Criterio DOE-EML.....	16
3.3 Criterio Rockwell	18
3.4 Criterio NRPB.....	18
4. CRITERIO DEL LABORATORIO DE RADIOECOLOGÍA ACUÁTICA	22
4.1 AMD en el caso de un trazador con impureza	23
4.2 AMD en el caso de fondo detectables de un blanco.....	24
4.3 AMD en el caso de fondo detectables de un blanco e impureza del trazador.....	26
4.4 AMD en el caso de fondo del detector.....	26
5. CONCLUSIONES	27
6. REFERENCIAS	27
7. TABLAS	29
8. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	35
9. APÉNDICE	39

1. INTRODUCCIÓN

Los criterios desarrollados por diversos laboratorios para calcular la actividad mínima detectable (AMD) se basan en la estadística aplicada a las medidas de radiactividad.

La emisión de partículas radiactivas es un proceso aleatorio. La probabilidad de emisión es directamente proporcional a la constante de desintegración de sus núcleos. La detección de estas emisiones tiene por lo tanto comportamiento estadístico. En la práctica [1,2], se aplica la distribución binomial cuando el número de emisiones detectadas es muy bajo (<10), la distribución de Poisson cuando las detecciones están comprendidos entre 10 y 30 sucesos y la distribución de Gauss si los sucesos detectados son superiores a 30.

En este informe se revisan alguno de los criterios existentes para determinar el AMD: Currie, DOE, Rockwell y NRPB, comparándose los resultados obtenidos al aplicar al mismo caso real, las expresiones matemáticas correspondientes a cada uno de ellos.

Se presentan, por último, cuatro casos significativos de cálculo de AMD en el laboratorio de Radioecología Acuática, que pueden ser extendidos a otros laboratorios de medidas de actividad alfa en muestras ambientales.

2. CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ACTIVIDAD MÍNIMA DETECTABLE (AMD)

En las medidas de muy baja actividad (casos en que la actividad total es solo ligeramente superior al fondo) el valor numérico resultante de la diferencia entre el recuento total de sucesos y el fondo, puede carecer de significado ya que existe la posibilidad de que proceda de una simple fluctuación estadística. Por este motivo, es necesario definir claramente el concepto de límite de detección [1].

El examen de las definiciones pertinentes al límite de detección que se encuentran en trabajos publicados, revelan la existencia de una plétora de definiciones matemáticas, así como una terminología de significado, desde variable hasta ambigua.

Entre las definiciones propuestas se encuentran varias, tales como límite inferior de detección, sensibilidad de detección, sensibilidad, actividad mínima detectable, y límite de garantía de pureza, usándose todas ellas con significados muy análogos.

El problema de la nomenclatura cobra una especial dificultad, en los casos en que los diversos autores usan los mismos conceptos con distintos significados. Expresiones tales como "límite de detección con un nivel de confianza del 95%" se usan sin expresiones claras que definan dicho concepto.

También existen definiciones de naturaleza no estadística, en las que se toman como límites de detección la expresión de magnitudes arbitrarias tales como el 40% del valor de fondo, 100 dps, etc.

La magnitud que se calcula en un laboratorio radioquímico es el AMD, encontrándose las mismas dificultades y problemas que en la determinación del Límite Inferior de Detección (LID) en el que se basa.

La descripción del AMD basándose en ejemplos prácticos de su aplicación a muestras reales facilita su comprensión.

Se han seleccionado para su revisión cuatro de los criterios más utilizados para la determinación del AMD: Currie [3], Rockwell [4], DOE [5] y NRPB [6]. El primero profundiza en los conceptos estadísticos de la detección de la radiación en medidas de fondo bajo, los restantes son eminentemente prácticos asumiendo el criterio de Currie pero aplicándolo al recuento de muestras.

2.1 Definición general del AMD

Se define el AMD como la mínima concentración de actividad de un emisor alfa en una muestra que podría ser detectada con una fiabilidad estadística de un 95% en un determinado tiempo de recuento después del proceso de separación radioquímica.

Esta definición implica que el AMD depende de:

- tamaño de la muestra
- tiempo de recuento de la muestra
- tiempo de recuento del blanco y del fondo
- rendimiento químico
- fondo real conocido. Se considera que el fondo sólo está adecuadamente estimado cuando se ha determinado en un tiempo de recuento 10 veces superior al de recuento de la muestra. En la práctica, la determinación de un emisor alfa (radionucleido artificial) en una muestra ambiental requiere un tiempo de medida superior a una semana. La determinación exacta de un fondo requeriría un tiempo de 10 semanas-obviamente tiempo no disponible en un laboratorio donde se procesan cientos de muestras al año-.

Una correcta determinación del AMD requiere el conocimiento de la concentración de actividad del elemento a analizar en un blanco y de la impureza del elemento a determinar en el trazador.

El blanco será analizado con el mismo procedimiento normalizado con que se analiza la muestra problema, con su mismo trazador y no contendrá el radionucleido a determinar aunque su matriz será similar a la de la muestra. La impureza del trazador para el elemento a cuantificar debe estar certificada.

2.2 Criterio de Currie aplicado a medidas de bajo fondo.

En su criterio, Currie no considera el AMD como tal, si no que utiliza la expresión de “ límite inferior de detección” (LID) que corresponde a la definición del AMD mencionada en el apartado 2.1.

El límite inferior de detección (LID) es la mínima concentración de un elemento radiactivo en una muestra que dará cuentas netas por encima del blanco, que será detectado con al menos un 95% de fiabilidad y una probabilidad de falsear la medida no superior al 5%, estableciendo que un blanco representa una señal real.

La expresión matemática que define el LID (X_D) es la siguiente:

$$AMD = LID = X_D = \frac{(Y_D - B)}{2.22(YEVT)} \quad (1)$$

Donde:

Y_D = Cuentas del nivel de detección

B = Cuentas reales de fondo

Y = Rendimiento químico del proceso

E = Eficiencia del detector

V = Volumen de la muestra

T = Tiempo de recuento

El valor de Y_C (nivel crítico) y Y_D (nivel de detección) aparecen tabulados (Tabla 1) para un fondo comprendido entre 0 a 5.42 cuentas. Cuando las cuentas atribuidas al fondo son superiores a 5.42 los valores de Y_C e Y_D se calculan matemáticamente de la siguiente forma¹:

$$Y_C = S_C + B \quad Y_D = S_D + B \quad (2)$$

Donde :

S_C = Nivel crítico para juzgar cuando la radiactividad está presente con un riesgo de falso positivo α

S_D = Nivel de decisión para juzgar cuando la radiactividad está presente con un riesgo de falso negativo β

B = Cuentas reales de fondo

El valor de S_D se obtiene a partir del valor de S_C . Estos valores pueden ser calculado a partir del fondo de la siguiente manera:

¹Estas fórmulas se derivan de diversas aproximaciones hechas por Currie en su trabajo original que aparece resumido en español en el Apéndice.

$$S_D = 2.71 + 2S_C \quad \text{donde} \quad S_C = 1.645\sqrt{B} \quad (3)$$

Por lo tanto la expresión que calcula el Y_C y el Y_D en función de las cuentas del fondo

$$Y_C = 1.645\sqrt{B} + B \quad Y_D = 2.71 + 2(1.645\sqrt{B}) + B \quad (4)$$

Ejemplo en el caso de recuentos alfa muy bajos

Asumiendo que para el proceso de medida del ^{239}Pu se ha obtenido los siguientes resultados:
Tasa de recuento del blanco $R_b = 0.01$ cpm Eficiencia del detector $E = 0.30$ $Y = 0.80$ $t = 1$ hora

Referidos a la Tabla 1.

$$B = 0.01 \times 60 = 0.6 \text{ cuentas} \quad Y_C = 2 \quad Y_D = 6.3 \text{ cuentas}$$

Esto quiere decir que si en 60 minutos observamos más de 2 cuentas brutas el Pu podría ser considerado detectado. El límite inferior de detección se obtendrá aplicando (1):

$$X_D = \frac{(Y_D - B)}{2.22(YEVT)} = \frac{(6.30 - 0.60)}{2.22(0.80)(0.30)(60)} = 0.18 \text{ pCi} \quad (5)$$

Si R_b fuera de un 10 % (basada en una observación de 100 cuentas) podríamos dejar los límites :

$$B = 0.60 \pm 0.06 \text{ cuentas} \quad (6)$$

Así es que Y_C y Y_D permanecen invariables pero

$$X_D = \frac{6.30 - (0.60 \pm 0.06)}{2.22(0.80)(0.30)(60)} = 0.178 \text{ pCi} \pm 0.0019 \quad (7)$$

El nivel superior conservador es X_D igual a 0.18 pCi

Cuestiones que se plantean con este criterio : por qué se ha de suponer una distribución de Poisson aproximada y no una binomial cuando el número de cuentas en una muestra ambiental es muy bajo

2.3 Criterio del departamento de Energía de USA (DOE-EML)

Este criterio aplica la estadística gaussiana, considerando que la actividad de la muestra es muy próxima al fondo.

Se define el AMD como

$$AMD = (K_\alpha + K_\beta) \sigma_0 \quad (8)$$

Donde:

K_α = El valor del percentil superior de la variación normal correspondiente a un riesgo preseleccionado para la conclusión falsa que hay actividad presente α

K_β = El valor correspondiente para un determinado grado de confianza para la detección de presencia de actividad $(1-\beta)$

σ_0 = Error estimado de la actividad neta de la muestra

Suponiendo que los riesgos para e falso positivo y negativo son iguales K_α y K_β son iguales con lo que se llega a la expresión:

$$AMD = 2k\sigma_0 \quad (9)$$

El valor de σ_0 se ha obtenido de considerar como error estimado de la actividad neta el siguiente:

$$\sigma_{neta} = \sqrt{\sigma_{brutas}^2 + \sigma_{fondo}^2} = \sqrt{2}\sigma_b = \sigma_0 \quad (10)$$

Considerando medidas de actividad baja, cercanas al fondo del detector

$$\sigma_0 = \sqrt{2}\sigma_b = 1.414 \sigma_b \quad (11)$$

Pudiéndose reescribir la ecuación (9) de la siguiente forma:

$$AMD = 2\sqrt{2} k \sigma_b \quad (12)$$

El valor de $2\sqrt{2} k$ aparece tabulado en función de los valores de α . Para un valor $\alpha = 0.05$ (fiabilidad del 95 %)

α	$1-\beta$	k	$2\sqrt{2} k$
0.01	0.99	2.327	6.59
0.02	0.98	2.054	5.81
0.05	0.95	1.645	4.66

α	$1-\beta$	k	$2\sqrt{2} k$
0.10	0.90	1.282	3.63
0.20	0.80	0.842	2.38
0.50	0.50	0	0

Para este caso el AMD

$$AMD = 4.66 \sigma_b \quad (13)$$

$$AMD = 4.66 \text{ Incertidumbre debida al fondo} \quad (14)$$

Este criterio no especifica claramente si la incertidumbre debida al fondo se refiere al fondo del detector o al fondo debido al blanco

2.4 Criterio del Rockwell Laboratory de USA

El AMD se determina con la siguiente expresión:

$$AMD = \frac{4.66}{Y.E_s V} \left[\frac{C_{Bi}^2}{T_s T_b} + \left(\frac{a_{ri} E_s}{1.96} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Donde:

AMD = Actividad mínima detectable

Y = Rendimiento químico en % (56.6 % p.e)

E_s = Eficiencia absoluta de detección para el detector (0.24)

a_{ri} = Incertidumbre asociada al reactivo blanco expresada en Bq por unidad de peso

V = Peso o volumen de muestra

C_{Bi} = Cuentas brutas del detector de fondo para el isótopo i

T_s = Tiempo de recuento de la muestra expresado en segundos

T_b = Tiempo de recuento del fondo expresado en segundos

a_{si} = Incertidumbre asociada a la muestra expresada en unidades de actividad

Esta expresión proviene de considerar, según el criterio de Currie, que la actividad mínima detectable es 4,66 la incertidumbre de la actividad corregida por el blanco, es decir:

$$AMD = 4,66 b_{si} \quad (16)$$

$$b_{si} = \sqrt{a_{si}^2 + a_{ri}^2} \quad (17)$$

Donde a_{si} tendría la expresión (18)

$$a_{si}^2 = \frac{C_{Bi}^2}{E_s^2 T_s T_B} \quad (18)$$

En este criterio no se determina claramente el cálculo de las incertidumbres debidas al blanco y a la muestra

2.5 Criterio del National Radiological Protection Board (NRPB) del Reino Unido

El criterio de la NRPB se aplica a dos casos comunes en un laboratorio radioquímico que analiza emisores alfa en muestras ambientales:

- a) Bajo recuento y fondo poco conocido
- b) Bajo recuento y fondo bien conocido

En el caso a) se aplica la distribución binomial para calcular los niveles críticos y de decisión dado que el número de sucesos es bajo. Se asume que se puede utilizar el criterio de Gauss estricto, sin aproximaciones, obteniéndose unos valores de actividad mínima detectable muy similares a los calculados por la distribución binomial.

En el caso b) se aplica la distribución de Poisson, asumiendo que la tasa de recuento de fondo verdadera B , es conocida, ya que el tiempo empleado en la medida del fondo es más de diez veces el tiempo de recuento de la muestra.

En la Tabla 2, se resumen esquemáticamente los procedimientos para calcular los niveles de decisión, detección e intervalos de confianza para los casos de tasa de recuento de fondo poco/bien conocido extraídos del documento original [6].

Se exponen a continuación dos ejemplos prácticos que aparecen reflejados en el informe de la NRPB

para el cálculo del AMD que ayudan a la comprensión de las fórmulas utilizadas.

Caso a) Recuento bajo y fondo poco conocido

Se han medido dos muestras electrodepositadas en un detector de barrera de silicio. Las muestras y el fondo se han contado durante 1000 minutos. Una vez calibrado el espectro son identificados los picos de los diversos isótopos del plutonio. Se obtuvieron las siguientes cuentas brutas.

	²⁴² Pu trazador	²³⁹ Pu	²³⁸ Pu
Muestra 1	705	109	18
Muestra 2	647	20	14
Fondo	4	3	7

Aplicando la distribución binomial y teniendo en cuenta el fondo detectado para el ²³⁹Pu y ²³⁸Pu (3 y 7 Ct), de la Tabla 3 se obtienen las cuentas brutas para los distintos niveles de decisión (90%, 95% y 99%).

	90 %	95%	99%
²³⁹ Pu (Ct =3)	9	10	14
²³⁸ Pu (Ct = 7)	14	16	20

Observando las cuentas brutas obtenidas y los niveles de decisión, se puede deducir que en las dos muestras, el ²³⁹Pu sería detectado con un 99% de fiabilidad. El ²³⁸Pu, aun siendo los resultados no concluyentes, podría ser detectado en la primera muestra, aunque no en la segunda.

	²³⁹ Pu	²³⁸ Pu
Muestra 1	$x >_{0.01} X_c$	$_{0.05} X_c < x >_{0.01} X_c$
Muestra 2	$x >_{0.01} X_c$	$_{0.10} X_c < x <_{0.05} X_c$

Las cuentas brutas del nivel de detección se calculan según la ecuación :

$${}_{\alpha, \beta} X_D = \frac{Q_A}{1 - Q_A} B u \quad \text{Donde } B = \frac{y}{u} \quad (19)$$

y= cuentas brutas del fondo

Sustituyendo su valor, se obtendría

$${}_{\alpha,\beta}X_D = \frac{Q_A}{1-Q_A} \cdot y \quad (20)$$

Por ejemplo, en el caso del ^{238}Pu ($C_F = 7$), nivel de decisión 95%, el valor de Q_A (Tabla 4) es 0.81. De esta manera el nivel de detección para el ^{238}Pu es el siguiente:

$${}_{0.05,0.05}X_D(\text{Pu-238}) = 4.3 \text{ Bu} = (4.3) \cdot 7 = 29.8 \quad (21)$$

Tomado como cuentas enteras

$${}_{0.05,0.05}X_D(\text{Pu-238}) \approx 30 \quad (22)$$

Aplicando una distribución normal estricta (estadística de Gauss) el nivel de decisión (p.e para el ^{238}Pu) se obtendría con la siguiente ecuación:

$$b = \frac{y}{u} \quad (24)$$

$${}_{\alpha}X_c = bt + f_1 + k_{\alpha} \left(b \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{t} \right) t^2 + f_2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{donde} \quad (23)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{t}{u} + k_{\alpha}^2 \frac{t}{u} \right) \quad (25)$$

$$f_2 = \frac{t}{2u} \left(1 + \frac{t}{u} + \frac{k_{\alpha}^2 t}{2u} \right) \quad (26)$$

Sustituyendo los valores de fondo para el ^{238}Pu en las ecuaciones anteriores:

Obteniéndose para los valores de f_1 y f_2 :

$$f_1 = \frac{1}{2}(1 + 1 + 1.64^2) = 2.34 \quad (28)$$

$$f_2 = \frac{1}{2}\left(1 + 1 + \frac{1.64^2}{2}\right) = 1.67 \quad (29)$$

Como solamente se observan las cuentas integradas, estas son efectivamente 16 para el nivel de decisión

$${}_{0.05}X_c = 15.8 \approx 16 \quad (30)$$

El nivel de detección viene dado para esta distribución normal por la expresión :

$${}_{\alpha,\beta}X_D = {}_{\alpha}X_c + k_{\beta}^2 \frac{{}_{\alpha}X_c + y}{2y} + k_{\beta} \left[\frac{({}_{\alpha}X_c + y) {}_{\alpha}X_c}{y} + \frac{({}_{\alpha}X_c + y)^2 k_{\beta}^2}{4y^2} \right]^{1/2} \frac{Bu}{y} \quad (31)$$

Obteniéndose para este caso

$${}_{0.05,0.05}X_D = 33 \quad (32)$$

Como puede observarse, los niveles de detección obtenidos aplicando una distribución binomial ($X_D=30$) y una normal ($X_D=33$) son similares.

La obtención de la actividad mínima detectable expresada en mBq para cada una de las muestras se indica a continuación.

Las cuentas netas ,x-y, y sus desviaciones estandar , $(x+y)^{1/2}$, se muestran en la tabla (en el caso de la muestra 2, la actividad del ${}^{238}\text{Pu}$ se da por no detectada y se da el recuento neto del nivel de detección)

	${}^{242}\text{Pu}$		${}^{239}\text{Pu}$		${}^{238}\text{Pu}$	
	(x-y)	Desviación estandar $(x+y)^{1/2}$	(x-y)	Desviación estandar $(x+y)^{1/2}$	(x-y)	Desviación estandar $(x+y)^{1/2}$
Muestra 1	701	26.6	106	10.6	11	5.0
Muestra 2	643	25.5	17	4.8	AND*	27

* Actividad no detectada

Sabiendo que la actividad de trazador añadida es 0.20 Bq de ${}^{242}\text{Pu}$ para la muestra 1 se obtiene:

Muestra 1, ${}^{239}\text{Pu}$:

$$A_{\text{Mejor estimación}} = 0.20 \frac{106}{701} = 0.030 \text{ Bq} = 30\text{mBq} \quad (33)$$

Con una desviación standard:

$$\text{Desviación estándar} \approx \left[\left(\frac{26.6}{701} \right)^2 + \left(\frac{10.6}{106} \right)^2 \right]^{1/2} 30 = 3.2 \text{ mBq} \quad (34)$$

Obteniendo de esta manera el intervalo de confianza

$$\text{Intervalo del 95\% de confianza} = \pm 1.96 (3.2) = 6.3 \text{ mBq} \quad (35)$$

Los otros resultados se calculan de la misma manera obteniendo la siguiente tabla:

	^{239}Pu (mBq)	^{238}Pu (mBq)
Muestra 1	30±6.3	3.1±2.8
Muestra 2	5.3±3.0	AND*,7.2
		$7.2 = \frac{(30-7)}{643} 0.20$

Las incertidumbres estadísticas mostradas están basadas en un intervalo de confianza del 95%. AND, indica que la actividad no ha sido detectada y va seguida por la actividad de detección (7.2) que es la verdadera actividad que, si estuviera presente en la muestra, habría sido detectada en el 95% de las ocasiones.

Tener en cuenta que el 95% del nivel de detección dado arriba es específico para esta muestra y no puede ser usado como un nivel de detección general a priori. Para calcular un nivel de detección a priori, el experimentador debe estimar (conservadoramente) el rendimiento químico medio y el fondo esperado de previas experiencias y usar esos valores en el cálculo.

Caso b) Bajo recuento y un fondo bien conocido

En el caso anterior, el fondo se consideró estable y se contó durante 10.000 minutos ($u = 10t$). Los resultados fueron de 40, 30 y 70 cuentas en las regiones del ^{242}Pu , ^{239}Pu y ^{238}Pu respectivamente. El fondo se trató como bien conocido según el criterio anteriormente explicado.

Aplicando la estadística de Poisson:

De la Tabla 5 los niveles de decisión para las cuentas brutas son:

	90 %	95%	99%
^{239}Pu (Bt=3)	6	7	9
^{238}Pu (Bt=7)	11	13	15

Todas las cuentas detectadas de las muestras dadas en el anterior caso ahora exceden el número de cuentas

del nivel de decisión del 95%. Los niveles de detección aparecen en la Tabla 6. Por ejemplo, en el caso del ^{239}Pu para un nivel de decisión del 95%, con siete cuentas brutas, el nivel de detección es 11.8 cuentas.

Los intervalos de confianza (X_L, X_U) se extraen de la Tabla 7 para las observaciones $x \leq 20$, o mediante $(x - k_{\alpha/2} x^{1/2}, x + k_{\alpha/2} x^{1/2})$ para observaciones $x > 20$. Las cuentas netas $x - B_t$, y los intervalos correspondientes de confianza se pueden calcular de la siguiente manera:

	x Cuenta s brutas	(X_L, X_U) Intervalos de confianza	B_t Cuenta s netas	x - B_t	$(X_L - B_t, X_U - B_t)$ Intervalos de confianza
Muestra 1, ^{239}Pu	109	(88.5, 129.5)	3	106	(85.5, 126.5)
Muestra 1, ^{238}Pu	18	(10.7, 28.5)	7	11	(3.7, 21.5)
Muestra 2, ^{239}Pu	20	(12.2, 30.9)	3	17	(9.2, 27.9)
Muestra 2, ^{238}Pu	14	(7.6, 23.5)	7	7	(0.6, 16.5)

Si consideramos el trazador añadido de ^{242}Pu (200 mBq), se puede calcular la actividad en el caso tercero multiplicando las cuentas netas por 200/701 mBq por cuenta para la muestra 1 y 200/643 mBq por cuenta para la muestra 2. Como la incertidumbre estadística de la eficiencia es pequeña (desviación estandar <4%) comparada con las incertidumbres de las cuentas para el ^{239}Pu y ^{238}Pu , los intervalos de confianza para la actividad se pueden calcular multiplicando los intervalos de confianza para las cuentas netas por el mismo factor para hallar los siguientes resultados

	^{239}Pu (mBq)	^{238}Pu (mBq)
Muestra 1	30 (24, 37)	3.1 (1.0, 6.2)
Muestra 2	5.3 (2.8, 8.7)	2.2 (0.1, 5.2)

Las incertidumbres mostradas representan los enlaces superior e inferior de los intervalos de confianza basados exclusivamente en la estadística del recuento

3. APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS A UN CASO REAL

Se aborda un ejemplo práctico de una medida de laboratorio, indicando los problemas en la aplicación de los diferentes criterios. Este ejemplo corresponde al caso A) del laboratorio de Radioecología Acuática (Apartado 4.1).

Un análisis para determinar la concentración de actividad del ^{241}Am en 10 gramos de sedimentos aportó los siguientes resultados.

Cantidad de trazador añadida: 16.3 mBq

Tiempo de recuento de la muestra y fondo : 600.000 s

Eficiencia del detector de medida determinada con un patrón calibrado: 24%

Rendimiento químico 56.6%

Impureza certificada del trazador: 0.6%

	²⁴³ Am	Fondo ²⁴³ Am	²⁴¹ Am	Fondo ²⁴¹ Am	Impureza ²⁴¹ Am estimadas para el trazador recuperado
Ct	1334	5	12	3	(1334*0,6%)= 8

¿Cuál sería el AMD para la determinación del americio según los diversos criterios?.

La actividad de la muestra será:

$$Actividad_{muestra} = Actividad_{medida} - Actividad_{impureza} = \frac{(12-3) \cdot 0.0163}{(1334-5) \cdot 0.010} - \frac{(8-3) \cdot 0.0163}{(1334-5) \cdot 0.010} = 0.011 - 0.006 = 0.0049 \text{ Bq/kg} \quad (37)$$

Su incertidumbre asociada vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_{muestra} = \sqrt{\sigma_{medida}^2 + \sigma_{impureza}^2} = \sqrt{0.0047^2 + 0.004^2} = 0.0062 \text{ Bq/kg} \quad (38)$$

Donde la incertidumbre debida a la medida² es :

$$\sigma_{medida} = Actividad_{medida} \cdot \varepsilon = 0.011 \sqrt{\frac{12+3}{(12-3)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.0047 \text{ Bq/kg} \quad (39)$$

La incertidumbre debida a la impureza:

$$\sigma_{impureza} = Actividad_{impureza} \cdot \varepsilon = 0.006 \sqrt{\frac{8+3}{(8-3)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.004 \text{ Bq/kg} \quad (40)$$

Con lo que la expresión de la actividad será:

$$Actividad \text{ de la muestra} = 0.0049 \text{ Bq/kg} \pm 0.0062 (1\sigma)$$

²La descripción del cálculo de las incertidumbres estadísticas debidas al recuento se haya descrita en la literatura [9]

Este es un caso típico en el que la actividad se aproxima a la incertidumbre de la actividad. ¿Cuál será el AMD para los diversos criterios?

3.1 AMD según Currie

Se parte del hecho que no se conocen las cuentas verdaderas debidas a la impureza del trazador, puesto que se calcula como la resta de dos magnitudes estimadas, por un lado las cuentas de ^{241}Am debidas a la impureza del trazador (8 Ct) y las cuentas de fondo del detector para el pico de este isótopo.

El AMD se puede calcular de dos formas:

a) Considerando sólo las cuentas del fondo del detector (3 Ct) en cuyo caso, y aplicando la fórmula (1) se obtiene :

$$x_D = \frac{11.84 - 3(\pm 0.3)}{(1334 - 5)0.010} \cdot 0.0163 = 0.0108 \text{ Bq/kg} \quad (41)$$

El valor de Y_D (11.84) se obtiene en la Tabla 1 para un fondo de 3 Ct.

b) Considerando las cuentas debidas a la impureza del trazador (8 Ct). En este caso, y aplicando la fórmula (1) se obtiene

$$x_D = \frac{20.01 - 8(\pm 0.8)}{(1334 - 5)0.010} \cdot 0.0163 = 0.015 \text{ Bq/kg} \pm 0.001 \quad (42)$$

Los valores de Y_C y Y_D se calculan mediante las expresiones de Poisson dadas por Currie para los niveles críticos y de detección (4) ya que la Tabla 1 no muestra los resultados para 8 Ct.

$$y_C = 1.641\sqrt{8} + 8 = 12.64 \quad (43)$$

$$y_D = 2.71 + 2(1.641\sqrt{8}) + 8 = 20.01 \quad (44)$$

Los AMD calculados para los casos a) y b) difieren entre sí ; siguiendo el criterio más conservador se escoge el segundo.

$$AMD_{(95\%)} = 0.015 \text{ Bq/kg} \quad (45)$$

3.2 AMD según DOE-EML

La actividad mínima detectable viene dada por la siguiente expresión .

$$AMD \approx 4.66\sigma_B \quad (46)$$

Donde :

σ_B = Incertidumbre asociada al fondo

También se obtenía la expresión (8)

$$AMD \approx (K_\alpha + K_\beta)\sigma_0 \approx 2k\sigma_0 \quad (47)$$

Donde en este caso :

σ_0 = Incertidumbre asociada a la actividad neta

El cálculo de las incertidumbres asociadas a las actividades del fondo y la actividad de la muestra marca una ligera variación del AMD.

La actividad debida al fondo se obtiene

$$Actividad_{fondo} = \frac{(8-3)}{(1334-5)} \frac{0.0163}{0.010} = 0.00613 Bq/kg \quad (48)$$

Su incertidumbre asociada :

$$\sigma_{fondo} = Actividad_{fondo} \cdot \varepsilon = 0.00613 \sqrt{\frac{8+3}{(8-3)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.0041 \quad (49)$$

Con lo que el AMD que se aplica es el primero

$$AMD = 4.66(0.004) = 0.019 Bq/kg \quad (50)$$

El cálculo de la incertidumbre de la actividad neta sería:

$$Actividad_{neta} = \frac{(12-8)}{(1334-5)} \frac{0.0163}{0.010} = 0.0049 Bq/k \quad (51)$$

Y el de su incertidumbre asociada:

$$\sigma_{neta} = Actividad_{neta} \cdot \epsilon = 0.0049 \sqrt{\frac{12+8}{(12-8)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.0055 Bq/kg \quad (52)$$

Con lo que el AMD aplicando la segunda fórmula:

$$AMD = 2k\sigma_{neta} = 3.29(0.0055) = 0.018 Bq/kg \quad (53)$$

El valor de k (para $\alpha = 0.05$) aparece tabulado

Obsérvese que en ambos casos la definición de la fórmula es ambigua. No se precisa si es el fondo debido al blanco o es el fondo del detector.

3.3 AMD según Rockwell

En este caso la aplicación de la fórmula daría como resultado la siguiente ecuación:

$$AMD = L_{si} = \frac{4.66}{(56.6)(0.24)(0.01)} \left[\frac{3^2}{600000.600000} + (0.0041 \ 0.24)^2 \right]^{1/2} = 0.0338 Bq/kg \quad (54)$$

Como puede observarse el valor de 1.96 desaparece de la fórmula original ya que en este laboratorio las incertidumbres se expresan como 1.96 σ y en esta expresión sólo debe intervenir 1 σ . El problema que subyace en esta expresión es si los porcentajes estarán expresados adecuadamente y si el cálculo de la incertidumbre debida al blanco se habrá realizado con el criterio de las autoras de este informe.

3.4 AMD según NRPB

Se aplicarán las tres distribuciones : binomial, Poisson y Gaussiana para la obtención del límite de detección que pasará a ser AMD cuando se divida por la cuentas del trazador y se multiplique por su actividad. Hay que tener en cuenta que el fondo debido a la impureza del trazador debe considerado por lo que se plantean dos casos el a) cuando se considera sólomente el fondo del detector y el b) cuando se considera el fondo debido a la impureza del trazador.

Distribución Binomial

Las cuentas detectadas del ^{241}Am son 12 (Ct) , siendo la impureza de este trazador 5 cuentas (8 -3 = 5) y el fondo del detector 3 cuentas . Observando la tabla 3 para este número de cuentas se obtienen los siguientes niveles de decisión

Cuentas observadas de fondo	Nivel de decisión 90%	Nivel de decisión 95%	Nivel de decisión 99%
Impureza (5)	12	13	17
Fondo detector(3)	9	10	14

Es decir si se tienen 12 cuentas para el caso de la impureza -como el del ejemplo- no se detectaría el americio con un nivel de confianza del 95%, sin embargo con un fondo del detector de 3 cuentas sí se detectaría. Para calcular el límite de detección se aplica la fórmula (19)

a) Fondo del detector

$${}_{0.05,0.05}X_D = \frac{Q_A}{1-Q_A} Bu = \frac{0.89}{(1-0.89)} 3 = 24.27 \quad (55)$$

$$AMD_{\text{fondo detector}} = \frac{24.27-3}{1334-5} \frac{0.0163}{0.01} = 0.026 \text{ Bq/kg} \quad (56)$$

b) Impureza

$${}_{0.05,0.05}X_D = \frac{Q_A}{1-Q_A} Bu = \frac{0.84}{(1-0.84)} 5 = 26.25 \quad (57)$$

$$AMD_{\text{impureza}} = \frac{26.5-3}{1334-5} \frac{0.0163}{0.01} = 0.029 \text{ Bq/kg} \quad (58)$$

Distribución de Poisson

Suponiendo que se haya contado el fondo un tiempo diez veces más alto y que las cuentas obtenidas son proporcionales a las encontradas en el tiempo de medida de la muestra, aplicando la Tabla 5 para los niveles de decisión de un 95% se obtienen 7 y 10 cuentas que se buscan en la Tabla 6.

Nivel de decisión en cuentas brutas	Nivel de detección 50%	Nivel de detección 90%	Nivel de detección 95%
Impureza (10)	9.7	14.2	15.7
Fondo detector(7)	6.7	10.5	11.8

Con este número de cuentas para el nivel de detección se calcula el AMD para ambos casos

a) Fondo del detector

$$AMD_{\text{fondo detector}} = \frac{(11.8-3) 0.0163}{1334-5 \cdot 0.01} = 0.011 \text{ Bq/kg} \quad (59)$$

b) Impureza

$$AMD_{\text{impureza}} = \frac{(15.7-3) 0.0163}{1334-5 \cdot 0.01} = 0.016 \text{ Bq/kg} \quad (60)$$

Distribución Normal (Gauss)

Para calcular el nivel de decisión se puede proceder como en los casos anteriores, con la impureza y con el fondo del detector. Recordemos la fórmulas utilizadas

$$\alpha X_c = bt + f_1 + k_x \left(b \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{t} \right) t^2 + f_2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (61) \quad \text{Donde} \quad f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{t}{u} + k_x^2 \frac{t}{u} \right), \quad f_2 = \frac{t}{2u} \left(1 + \frac{t}{u} + \frac{k_x^2 t}{2u} \right) \quad (62)$$

Para determinar el nivel de detección podemos aplicar una de las aproximaciones que facilitan el cálculo:

$$\alpha, \beta X_D \approx \alpha X_c + k_\beta \left[\alpha X_c + \frac{\alpha X_c^2}{y} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (63)$$

a) Fondo del detector

Aplicando las expresiones anteriores obtenemos el siguiente valor para el nivel de decisión:

$${}_{0,05}X_c = 3 + 2.35 + 1.645 \left(\frac{3}{600000} \left(\frac{1}{600000} + \frac{1}{600000} \right) 600000^2 + 1.67 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (64)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{600000}{600000} + 1.645^2 \frac{600000}{600000} \right) = 2.35 \quad (65)$$

$$f_2 = \frac{600000}{2(600000)} \left(1 + \frac{600000}{600000} + \frac{1.645^2 600000}{2(600000)} \right) = 1.67 \quad (66)$$

Una vez calculado el nivel de decisión se calcula el nivel de detección

$${}_{\alpha,\beta}X_D \approx {}_{\alpha}X_c + k_{\beta} \left[{}_{\alpha}X_c + \frac{{}_{\alpha}X_c^2}{y} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 9.9 + 1.645 \left(9.9 + \frac{9.9^2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} = 20.6 \quad (67)$$

De esta manera obtenemos el AMD para el fondo del detector:

$$AMD_{fondo\ detector} = \frac{(20.6 - 3) 0.0163}{(1334 - 5) 0.010} = 0.022 Bq/kg \quad (68)$$

b) Impureza

Este sería el nivel de decisión:

$${}_{0,05}X_c = 5 + 2.35 + 1.645 \left(\frac{5}{600000} \left(\frac{1}{600000} + \frac{1}{600000} \right) 600000^2 + 1.67 \right)^{\frac{1}{2}} = 12.96 \quad (69)$$

Este sería el nivel de detección:

$${}_{\alpha,\beta}X_D \approx {}_{\alpha}X_c + k_{\beta} \left[{}_{\alpha}X_c + \frac{{}_{\alpha}X_c^2}{y} \right]^{\frac{1}{2}} \approx 12.96 + 1.645 \left(12.96 + \frac{12.96^2}{5} \right)^{\frac{1}{2}} = 24.18 \quad (70)$$

Y el AMD para el caso de impureza

$$AMD_{impureza} = \frac{(24.18 - 3) 0.0163}{(1334 - 5) 0.010} = 0.026 Bq/kg \quad (71)$$

Se resumen a continuación los AMD obtenidos aplicando los diversos criterios

AMD Bq/kg		AMD Bq/kg		AMD Bq/kg	AMD Bq/kg					
Fondo	Impureza	Impureza	Neto	Impureza	Binomial		Poisson		Normal	
					Fondo	Impureza	Fondo	Impureza	Fondo	Impureza
0.0108± 0.0004	0.015± 0.001	0.019	0.018	0.034	0.026	0.029	0.011	0.016	0.022	0.026

$$AMD_{media} = 0.019 \pm 0.006$$

4. CRITERIO DEL LABORATORIO DE RADIOECOLOGÍA ACUÁTICA

El resultado numérico procedente de la diferencia entre el recuento total y el recuento de fondo de una muestra ambiental puede carecer de significado cuando las medidas de actividad son bajas (actividad de la muestra ligeramente superior a la del fondo). Es necesario, por tanto definir claramente el concepto de actividad mínima detectable.

Según se ha observado en los apartados anteriores y bajo la interpretación en algunos casos subjetiva se obtienen diversos AMD. El criterio más conservador es el que resulta de la aplicación de la estadística binomial de la NRPB, que se ajusta también a la estadística del escaso número de cuentas obtenido para el recuento alfa en muestras ambientales.

La magnitud definida debe ser aplicada a un análisis de un emisor alfa en una muestra ambiental, dado que el AMD requiere el conocimiento de la incertidumbre asociada a la actividad debida al blanco - como mostraremos posteriormente- hay que destacar cuatro tipo de posibilidades en la práctica común del laboratorio: trazador con impureza, blanco detectable, trazador con impureza y blanco detectable y fondo del detector

A) Trazador con impureza

En la determinación de un emisor alfa en una muestra ambiental se ha utilizado un trazador que contiene una cantidad del radionucleido a determinar en concentraciones de tres o cuatro magnitudes por debajo de su concentración ambiental. En una medida prolongada (800000 s) se produce detección sobre el fondo de los detectores ¿ Hasta que límite es fiable esta detección y no procede del trazador? (El cálculo del rendimiento químico se realiza a partir de este trazador así como la concentración de actividad de la muestra y su incertidumbre asociada).

La realización del blanco en las condiciones mencionadas con anterioridad pondría de manifiesto la presencia de esta impureza en el tiempo de recuento, sin embargo el tiempo de recuento de la muestra y blanco no fué el mismo y se debe emplear funciones intermedias para corregir la actividad de la muestra.

En este caso el AMD estará relacionado con la incertidumbre debida a la impureza del trazador. Apartado 4.1.

B) Blanco

En la determinación de un emisor alfa en una muestra ambiental el trazador no contiene impurezas del radionucleido objeto del análisis, y sin embargo el blanco manifiesta detección fiable de éste, lo que demuestra una posible contaminación del laboratorio o una impureza de los reactivos utilizados.

En este caso el AMD estará relacionado con la incertidumbre del reactivo blanco. Apartado 4.2.

C) Impureza y Blanco con actividad detectable

En la determinación de un emisor alfa en una muestra ambiental el trazador contiene una impureza del elemento a determinar certificada y el blanco manifiesta la detección del elemento. La impureza del trazador se puede incluso modificar con el tiempo (P.e: ^{210}Po presente en un trazador de ^{209}Po).

En este caso el AMD estará relacionado con la incertidumbre de la concentración de actividades de ambos. Apartado 4.3.

D) Fondo del detector

En la determinación de un emisor alfa en una muestra ambiental el trazador no contiene impurezas del radionucleido objeto del análisis ni el blanco manifiesta actividad detectable del radionucleido de interés.

En este caso el AMD estará relacionado con la incertidumbre del fondo de los detectores para el pico de interés. Apartado 4.4.

Una vez definidos los casos más significativos debemos conseguir una expresión que nos simplifique el cálculo del AMD bajo el prisma de los diferentes criterios.

4.1 AMD en el caso de un trazador con impureza.

Si el trazador tiene como impureza una cantidad conocida y certificada del elemento a determinar la actividad mínima detectable esta influida por la cantidad de trazador añadido. Generalmente el trazador se añade en una cantidad tal que se permite optimizar el AMD deseado.

En este caso se supone que existe proporcionalidad entre las cuentas obtenidas después del análisis químico del trazador y las que se obtendrían de impureza. Si el tiempo de medida del trazador, la muestra y el fondo ha sido igual, la actividad de esta impureza introducida por el trazador se resta de la de la muestra y se calcula la

$$Actividad_{muestra} = \frac{(12-3)}{(1334-5)} \frac{0.0163}{0.010} = 0.011 \text{ Bq/kg} \quad (72)$$

incertidumbre para esta impureza. La concentración actividad mínima detectable será 4.66 veces la incertidumbre debida a esta impureza.

La incertidumbre asociada a la actividad de la muestra sería:

$$\sigma_{muestra} = Actividad_{muestra} \cdot \varepsilon = 0.011 \sqrt{\frac{12+3}{(12-3)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.005 \text{ Bq/kg} \quad (73)$$

La actividad debida a la impureza del trazador sería:

$$Actividad_{impureza} = \frac{(8-3)}{(1334-5)} \frac{0.0163}{0.010} = 0.006 Bq/kg \quad (74)$$

Y su incertidumbre asociada:

$$\sigma_{impureza} = Actividad_{impureza} \cdot \varepsilon = 0.006 \sqrt{\frac{8+3}{(8-3)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.004 Bq/kg \quad (75)$$

La actividad neta de la muestra sería :

$$A_{neta} = A_{muestra} - A_{impureza} \quad (0.005 \pm 0.006(1\sigma))$$

La incertidumbre asociada a la actividad neta es mayor que la actividad neta

Esto indica que el ^{241}Am no se detecta por encima del AMD que sería:

$$AMD = 4.66 \sigma_{impureza} = 4.66(0.004) = 0.018 Bq/kg \quad (76)$$

$A_{neta} < AMD$ por lo tanto, esta muestra no sería detectable con una fiabilidad estadística del 95%.

4.2 AMD en el caso de fondo detectable de un blanco

En este caso el trazador no contiene impureza del isótopo a analizar. En la misma serie se ha analizado un blanco al que se ha añadido la misma cantidad de trazador. El rendimiento químico de la muestra y el del blanco no es el mismo, y la cantidad de isótopo correspondiente al blanco no va a ser proporcional al trazador ya que depende de la introducción en el proceso analítico de reactivos químicos y uso de electrodos que en una determinada fase puedan incorporar el elemento. El trazador se añade para calcular la actividad del blanco.

El tiempo de recuento de la muestra y el blanco no han sido el mismo. Estos datos se aplicarán posteriormente para el ejemplo problema.

En primer lugar se determina la actividad correspondiente a este blanco simplemente por las cuentas obtenidas en la zona del espectro del ^{241}Am , sin tener en cuenta su rendimiento químico.

La muestra y el blanco se han medido en distinto detector y con distinto tiempo.
El AMD se calcula como

$$AMD = 4.66 \sigma_{blanco} = 4.66 \text{ Incertidumbre debida a la actividad del blanco} \quad (77)$$

Esta incertidumbre debida al blanco es

$$\sigma_{blanco} = A_{blanco} \cdot \varepsilon_{blanco} \quad (78)$$

El cálculo de la actividad del blanco viene dada por la siguiente expresión:

$$A_{blanco} = A_{trazador} \frac{C_{blanco}}{C_{trazador}} \frac{1}{Volumen} \quad (79)$$

Donde:

C_{blanco} = cuentas obtenidas del blanco medidas en su detector

$C_{trazador}$ = cuentas del trazador del blanco

Las cuentas obtenidas para el blanco C_{blanco} se corrigen por eficiencia y tiempo de recuento respecto al detector ($C_{b(\varepsilon,t)}$) en el que se ha medido la muestra, ya que es en este detector donde interesa determinar el AMD

$$A_{blanco} = A_{trazador} \frac{C_{b(\varepsilon,t)}}{C_{trazador_{muestra}}} \frac{1}{Volumen} \quad (80)$$

Estas cuentas del blanco corregidas para el detector y tiempo de la muestra son:

$$C_{b(\varepsilon,t)} = \frac{C_{blanco} E_{muestra} t_{muestra}}{E_{blanco} t_{blanco}} \quad (81)$$

Donde:

$C_{b(\varepsilon,t)}$ = Cuentas en el pico del ^{241}Am del blanco en el detector de la muestra y al tiempo de recuento de la muestra

C_{blanco} = Cuentas en el pico del ^{241}Am del blanco medidas en su detector

t_{blanco} = Tiempo de recuento del blanco expresado en segundos

$t_{muestra}$ = Tiempo de medida de la muestra expresado en segundos

$E_{muestra}$ = Eficiencia absoluta del detector donde se ha medido la muestra expresada en tanto por uno

E_{blanco} = Eficiencia absoluto del detector donde se ha medido el blanco

Sustituyendo la ecuación (81) en (79) se obtiene

$$A_{blanco} = A_{trazador} \frac{\frac{C_{blanco} E_{muestra} t_{muestra}}{E_{blanco} t_{blanco}}}{C_{trazador}} \frac{1}{Volumen} = A_{trazador} \frac{C_{blanco} E_{muestra} t_{muestra}}{E_{blanco} t_{blanco} C_{trazador}} \frac{1}{Volumen} \quad (82)$$

El valor de la incertidumbre de este blanco:

$$\sigma_{blanco} = A_{blanco} \cdot \varepsilon_{blanco} = A_{trazador} \frac{C_{blanco} E_{muestra} t_{muestra}}{E_{blanco} t_{blanco} C_{trazador} Volumen} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{C_{blanco}} + \frac{1}{C_{trazador}}}} \quad (83)$$

En el ejemplo precedente se han obtenido 16 cuentas en la zona del espectro del ^{241}Am en un blanco en un tiempo de recuento de 800.000 segundos, este segundo detector tenía una eficiencia de 16%. El trazador no contiene impureza de Americio como en el anterior caso.

$$\sigma_{blanco} = 0.0163 \frac{16(0.24)(600000)}{(0.16)(800000)1334} \frac{1}{0.010} \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{1}{1334}} = 0.0055 \text{Bq/kg} \quad (84)$$

El AMD será por consiguiente

$$AMD = 4.66 \sigma_{blanco} = 4.66(0.0055) = 0.0256 \text{Bq/kg} \quad (85)$$

La concentración de actividad detectada de la muestra estaría por debajo del AMD
 $A_{muestra} < AMD$

4.3 AMD en el caso de fondo detectable de un blanco e impureza del trazador

En el caso que se produzca un caso como los dos precedentes unidos en las mismas condiciones ahora el AMD sería:

$$AMD = 4.66 \sqrt{\sigma_{impureza}^2 + \sigma_{blanco}^2} = 4.66 \sqrt{0.004^2 + 0.0055^2} = 0.032 \text{Bq/kg} \quad (86)$$

Esta muestra no sería detectable con una fiabilidad estadística del 95%, ya que su actividad es menor que el AMD.

4.4 AMD en el caso de fondo del detector

En este caso no existe impureza del trazador y tampoco la muestra blanco ha dado cuentas por encima del fondo de detector. En este caso se calcula la actividad debida a ese fondo y su incertidumbre estadística.

$$Actividad_{fondo\ del\ detector} = \frac{3}{(1334-5)} \frac{0.0163}{0.010} = 0.0036 \text{Bq/kg} \quad (87)$$

$$\sigma_{\text{fondo del detector}} = 0.00368 \sqrt{\frac{3-0}{(3+0)^2} + \frac{1334+5}{(1334-5)^2}} = 0.0021 \text{ Bq/kg} \quad (88)$$

$$\text{AMD} = 4.66 \sigma_{\text{fondo del detector}} = 0.01 \text{ Bq/kg} \quad (89)$$

La actividad de la muestra ($A_{\text{muestra}} > \text{AMD}_{\text{detector}}$) se daría por detectada con una fiabilidad estadística del 95%.

En el caso de querer utilizar el criterio más conservador se utiliza el (56), 0.026 Bq/kg de la distribución binomial.

Resumen de los AMD utilizados por el laboratorio de radioecología acuática para el ejemplo en sus cuatro casos A), B), C) y D) mencionados.

Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
$\text{AMD}_{\text{impureza}}$	$\text{AMD}_{\text{blanco}}$	$\text{AMD}_{\text{blanco+impureza}}$	$\text{AMD}_{\text{fondodetector}}$
0.018 Bq/kg	0.026 Bq/kg	0.032 Bq/kg	0.01 Bq/kg

6. CONCLUSIONES

De los criterios revisados para el cálculo del AMD es el de la NRPB para una distribución binomial el que resulta más conservador

La aplicación de las diversas funciones estadísticas para el cálculo del AMD en el caso de bajo fondo no da resultados significativamente diferentes

Los criterios utilizados por el laboratorio de radioecología acuática para estimar los AMD para los diferentes casos más representativos que se pueden producir en un laboratorio, evitan el uso profuso de las tablas y fórmulas estadísticas; recomendándose en el caso de litigio el uso del AMD más conservador aplicando la distribución binomial

7. REFERENCIAS

[1] Tratamiento de datos experimentales. Lección IV del Curso Superior de Protección Radiológica Especialista en P.R. para Instalaciones Médicas. R.Gaeta. I.E.E. CIEMAT. 1990.

- [2] Criterios Estadísticos para la presentación de resultados. J.A. González González. E.T.S.I Caminos Canales y Puertos. Madrid 1995. Comunicación personal.
- [3] Lower Limit of Detection: Definition and Elaboration of a Proposed Position for Radiological Effluent and Environmental Measurements. L.A. Currie. NUREG/CR-4007. 1984.
- [4] Health, Safety and Environmental Laboratories Procedures and Practises Manual. W.F. Williams & L.F. Smith. RFP-3315. 1982.
- [5] EML Procedures Manual. Environmental Measurements Laboratory. HASL 300, 27th Edition. Volume 1.
- [6] Statistical Aspects of the Interpretation of Counting Experiments Designed to Detect Low Levels of Radioactivity. T.J. Sumerling & S.C. Darby. NRPB -R113. 1981.
- [7] The Measurement of environmental levels of rare gas nuclides and the treatment of very low-level counting data. L.A. Currie IEEE Trans. Nucl.Sci. NS-19:119. 1972.
- [8] What Can be detected. Developments in Applied Spectroscopy, v.6. W.L. Nicholson Plenum Press. 101-113. 1968. Nucleonics 24 (1966) 118.
- [9] Cálculo de la incertidumbre asociada al recuento en medidas de radiactividad ambiental y funciones basadas en ella. Procedimiento Práctico. C. Gascó y M. Paz Antón. CIEMAT-775. 1995. Madrid.

TABLAS

Tabla 1
 Niveles Críticos y Niveles de Detección para Recuentos muy bajos de actividad
 (Asumiendo B conocido)

Cuentas de fondo Rango B	$Y_c = S_c + B$	$Y_D = S_D + B$
0 - 0.051	0	3
0.052-0.35	1	4.74
0.36-0.81	2	6.30
0.82-1.36	3	7.75
1.37-1.96	4	9.15
1.97 -2.60	5	10.51
2.61 - 3.28	6	11.84
3.29 - 3.97	7	13.15
3.98 - 4.69	8	14.43
4.70 - 5.42	9	15.71

Tabla 2

Resumen de las fórmulas para los niveles de decisión, detección e intervalos de confianza de la NRPB

Caso		Nivel de decisión	Nivel de detección	Intervalos de confianza
Si B es desconocido y $x \leq 5$ ó $y \leq 5$	Usando cuentas brutas	Si $u=t$ referirse a la tabla 3, de otra manera ver la sección 4.1 (i) y referirse a las tablas normales $x_c = bt \cdot f_1 \cdot k_\alpha \left[b \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{t} \right) t^2 \cdot f_2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$	${}_{\alpha, \beta} X_D = \frac{Q_\lambda}{1 - Q_\lambda} bu \quad (2)$ Si $u=t$ ver tabla 4 para Q_λ Sino consultar la Sección 4.1 (ii) y referirlo a la tablas normales	Ver la sección 4.1 (iii)
	Usando la tasa de recuento neta	Usar cuentas brutas	Usar cuentas brutas	$\left(c - k_{\frac{1}{2}\alpha} \left(\frac{x}{t^2} + \frac{y}{u^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right), \left(c + k_{\frac{1}{2}\alpha} \left(\frac{x}{t^2} + \frac{y}{u^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (3)$ o ver sección 4.1 (iii) si el número de cuentas es muy bajo
Caso		Nivel de decisión	Nivel de detección	Intervalos de confianza
Si B es desconocido y $x, y > 5$	Usando cuentas brutas	Si $y > 20$ y $bt > 20$, $x_c = bt \cdot \left[b \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{t} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$	Si $y > 20$ ${}_{\alpha, \beta} X_D = x_c \cdot k_\beta \left[x_c \cdot \frac{x_c^2}{y} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$ Si no utilizar la ecuación (42) del texto original	$\left(x - k_{\frac{1}{2}\alpha} x^{\frac{1}{2}}, x + k_{\frac{1}{2}\alpha} x^{\frac{1}{2}} \right) \quad (6)$
	Usando la tasa de recuento neta	Si $y > 20$ y $bt > 20$, $L_c = k_\alpha \left[b \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{t} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$ Sino utilizar la ecuación (37) del texto original	Si $y > 20$ Sino ver ecuación (42) del texto original ${}_{\alpha, \beta} X_D = x_c \cdot k_\beta \left[\frac{x_c^2 \cdot b}{t} + \frac{(x_c^2 \cdot b)^2}{t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$	$\left(c - k_{\frac{1}{2}\alpha} \left(\frac{x}{t^2} + \frac{y}{u^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right), \left(c + k_{\frac{1}{2}\alpha} \left(\frac{x}{t^2} + \frac{y}{u^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$

* Si los enlaces bajos de los intervalos de confianza son negativos se debería reemplazar por cero $k_{0.50} = 0.0, k_{0.10} = 1.28, k_{0.05} = 1.64, k_{0.025} = 1.96, k_{0.01} = 2.33,$

Tabla 3

Niveles de decisión para fondo poco conocido calculado por la distribución binomial (para tiempos de recuento de la muestra y de fondo iguales $u= t$)

<i>Cuentas observadas de fondo, y</i>	<i>Nivel de decisión 90 %</i>	<i>Nivel de decisión 95 %</i>	<i>Nivel de decisión 99 %</i>
0	4	5	7
1	6	7	10
2	7	9	12
3	9	10	14
4	10	12	15
5	12	13	17
6	13	15	19
7	14	16	20
8	16	18	22
9	17	19	24
10	18	20	25

Tabla 4

Valores de Q_A derivados de la distribución binomial para calcular el nivel de detección como en el caso de la tabla 3.

<i>Cuentas observadas de fondo, y</i>	0.10, 0.10^{Q_A}	0.05, 0.05^{Q_A}	0.01, 0.01^{Q_A}	0.01, 0.05^{Q_A}
0	0.97	0.99	0.999	0.99
1	0.92	0.95	0.98	0.97
2	0.87	0.92	0.97	0.94
3	0.84	0.89	0.95	0.92
4	0.82	0.87	0.93	0.89
5	0.80	0.84	0.91	0.87
6	0.78	0.83	0.90	0.86
7	0.76	0.81	0.88	0.84
8	0.76	0.80	0.87	0.83
9	0.75	0.79	0.86	0.83
10	0.73	0.78	0.85	0.81

Tabla 5

Niveles de decisión en cuentas brutas para un fondo bien conocido calculado por la distribución de Poisson

Cuentas medias de fondo en el tiempo de recuento de la muestra \bar{X}	Nivel de detección del 90%	Nivel de detección del 95%	Nivel de detección del 99%
	$0.10 \bar{X}_0$	$0.05 \bar{X}_0$	$0.01 \bar{X}_0$
0.1	1	2	2
0.2	2	2	3
0.4	2	3	3
0.6	3	3	4
0.8	3	3	4
1.0	3	4	5
2.0	5	6	7
3.0	6	7	9
4.0	8	9	10
5.0	9	10	12
6.0	10	11	13
7.0	11	13	15
8.0	13	14	16
9.0	14	15	18
10.0	15	16	19
12.0	18	19	22
14.0	20	21	24
16.0	22	24	27
18.0	25	26	30
20.0	27	29	32

Tabla 6

Niveles de detección en cuentas brutas para un fondo bien conocido, calculado por la distribución de Poisson

Nivel de decisión en cuentas brutas empleado \bar{X}_0	Nivel de detección 50%	Nivel de detección 90%	Nivel de detección 95%
1	0.7	2.3	3.0
2	1.7	3.9	4.7
3	2.7	5.3	6.3
4	3.7	6.7	7.8
5	4.7	8.0	9.2
6	5.7	9.3	10.5
7	6.7	10.5	11.8
8	7.7	11.8	13.2
9	8.7	13.0	14.5
10	9.7	14.2	15.7
12	12	17	18
14	14	19	21
16	16	21	23
18	18	24	26
20	20	26	28
22	22	28	30
24	24	30	33
26	26	33	35
28	28	35	37
30	30	37	40

Tabla 7

Intervalos de confianza para las cuentas brutas verdaderas calculadas por la distribución de Poisson

Número de cuentas brutas observadas de la muestra	Intervalo de confianza 90 %		Intervalo de confianza 95 %		Intervalo de confianza 99 %	
	Nivel inferior \bar{X}_L	Nivel superior \bar{X}_U	Nivel inferior \bar{X}_L	Nivel superior \bar{X}_U	Nivel inferior \bar{X}_L	Nivel superior \bar{X}_U
0	0.000	3.00	0.000	3.69	0.000	5.30
1	0.051	4.74	0.025	5.57	0.005	7.43
2	0.355	6.30	0.242	7.22	0.103	9.27
3	0.818	7.75	0.619	8.77	0.338	10.98
4	1.37	9.15	1.09	10.24	0.672	12.59
5	1.97	10.51	1.62	11.67	1.08	14.15
6	2.61	11.84	2.20	13.06	1.54	15.66
7	3.29	13.15	2.81	14.42	2.04	17.13
8	3.98	14.43	3.45	15.76	2.57	18.58
9	4.70	15.71	4.12	17.08	3.13	20.00
10	5.43	16.96	4.80	18.39	3.72	21.40
11	6.17	18.21	5.49	19.68	4.32	22.78
12	6.92	19.44	6.20	20.96	4.94	24.14
13	7.69	20.67	6.92	22.23	5.58	25.50
14	8.46	21.89	7.65	23.49	6.23	26.84
15	9.25	23.10	8.40	24.74	6.89	28.16
16	10.04	24.30	9.15	25.98	7.57	29.48
17	10.83	25.50	9.90	27.22	8.25	30.79
18	11.63	26.69	10.67	28.45	8.94	32.09
19	12.44	27.88	11.44	29.67	9.64	33.38
20	13.25	29.06	12.22	30.89	10.35	34.67

GLOSARIO DE TÉRMINOS

1. Glosario de términos para la sección 2.2, Tabla 1 y Apéndice

Y = Valor de y observado, caracterizado por su error e_y
 σ = Desviación estandar (SD); σ/\sqrt{n} = SD (Su error estandar, SE) RSD = Desviación estandar relativa
S = Valor neto de la señal (cuentas) ("valor esperado")
B = Valor verdadero del fondo o blanco o línea base (cuentas) B_k = blanco; B_1 = cuentas de interferencia
BEA = Actividad equivalente del fondo = B/A
x = concentración verdadera de la actividad por unidad de masa o volumen
A = Factor general de calibración ; para un recuento simple con x en pCi/g o L $A = 2.22$ (YEVT) donde:
 Y = recuperación química o radioquímica
 E = Eficiencia del detector
 V = Volumen o masa
 T = Factor de tiempo apropiado o función
 V_y, V_x = Varianzas de esa cantidad
 σ_y, σ_x = SD de esa cantidad = \sqrt{v}

η = Factor de multiplicación que convierte σ_B a σ_0 : $\sigma_0 = \sigma_B \sqrt{\eta}$
Su valor depende del diseño del proceso de medida
b = relación de los tiempos de recuento o canales blanco/ (señal + blanco) entonces
 $\eta = 1 + 1/b$

S_C, X_C = niveles críticos o de decisión para juzgar cuando la radiactividad está presente con un riesgo de falso positivo α
 S_D, X_D = niveles críticos o de decisión para juzgar cuando la radiactividad está presente con un riesgo de falso negativo β

$z_{1-\alpha}, z_{1-\beta}$ = percentiles de la distribución normal igual a 1.645 para un valor de $\alpha, \beta = 0.05$

LLD = Límite inferior de detección (para una medida de concentración de actividad) = x_D
 ρ = Actividad reducida $\rho = S/B$

μ_B = Media de las cuentas de fondo ($\alpha = \beta = 0.05$)
n = Cuentas netas
 ρ_D = Límite de detección
 n_C = Cuentas críticas
C = Crítico
D = Detección
Q = Cuantitativo

2. Glosario de términos para el criterio de la NRPB sección 2.5, y las tablas 2, 3, 4, 5, 6, 7.

x = cuentas brutas observadas de la muestra
y = cuentas brutas observadas del fondo
t = tiempo de recuento de la muestra
u = tiempo de recuento del fondo
b = tasa de recuento de fondo observada = y/u
c = tasa de recuento neta observada (= $(x/t)-B$ si B es conocido, = $x/t - y/u$ en el caso que no)
B = tasa de recuento de fondo verdadera (Como media 10 veces el recuento de la muestra)
C = tasa de recuento neta verdadera
 k_α, k_β = Los puntos superiores 100α y 100β de la distribución normal
 L_c = El $100(1-\alpha)\%$ Nivel de decisión por comparación con la tasa de recuento neta observada c

${}_{\alpha}X_c$ = El 100 (1- α)% Nivel de decisión por comparación con las cuentas brutas de la muestra x observada

${}_{\alpha,\beta}L_D$ = El 100(1- β)% Nivel de detección(tasa de recuento neta)correspondiente a 100 (1- α)% nivel de decisión

${}_{\alpha,\beta}X_D$ = El 100(1- β)% Nivel de detección (cuentas de la muestra brutas) correspondiente a 100(1- α)% nivel de decisión

APÉNDICE

Desarrollo pormenorizado del criterio de Currie aplicado a un fondo menor de 70 cuentas

El concepto de LID se emplea rutinariamente por la Nuclear Reactor Regulation (NRC) americana en la especificaciones técnicas para establecer la concentración de los efluentes de una Central Nuclear y las muestras ambientales de sus alrededores. La definición de LID está sujeta a diferentes interpretaciones por los diversos laboratorios participantes en el control de efluentes, lo que se producen dificultades para aplicar uniformemente los criterios de licenciamiento. El documento de la NRC utiliza los criterios del LID desarrollados por otras agencias para otros propósitos. Existe claramente una necesidad de evaluar los conceptos e interpretaciones del LID de la bibliografía, determinando su uso y aplicaciones a las especificaciones técnicas de operación de las CCNN. El Dr. Currie del NBS (National Bureau of Standard) ha discutido los conceptos y problemas del LID para el licenciamiento de las CCNN y para los contratos de medida de laboratorios, integrando los conceptos y su experiencia a las medidas de baja actividad desarrollando un documento al menos comprensible.

Se ha resumido el aspecto técnico estadístico del documento para el caso de interés del laboratorio radioquímico de emisores alfa en una muestra ambiental. Basicamente el autor empieza desarrollando la estadística de Poisson adaptándola posteriormente para medidas de fondo bajas. No se trata en este apartado de hacer un estudio exhaustivo de su trabajo (porque las autoras no son especialistas en esta materia) sino de introducir su criterio práctico de la medida del AMD de un emisor alfa en una muestra ambiental

LID para los recuentos de extrema baja actividad ¹

En una muestra real se han detectado sobre el fondo del detector una serie de cuentas. Se debe determinar los niveles críticos (C) y de detección para este caso (D). Al final de este apartado se resume el glosario de términos empleados.

Se obtienen las soluciones (1) y (2) respectivamente para la señal de decisión crítica y de detección cuando existe un número determinado de cuentas esperadas del blanco (B >5). La expresión proviene de la sustitución de las varianzas para V₁ y V₂ en S = 0 y S = S_D en las ecuaciones de Poisson.

$$S_C = 1.645 \sqrt{B_n} = 1.645 \sqrt{B \left(\frac{b+1}{b} \right)} \quad (1)$$

$$S_D \approx z^2 + 2 S_C = 2.71 + 2 S_C \quad (2)$$

La constante z² de la ecuación (2) proviene de la ecuación de Poisson , resultando evidente que el límite de detección es finito aún en el caso de que el número de cuentas del blanco sea cero.

¹Consultar el glosario de términos

Cuando se obtiene un fondo o cuentas en la línea base menor de 70 cuentas (B), la fórmula de

$$(S_D \approx 3.29\sqrt{B}) \quad (3)$$

recuento simple para S_D tiene que añadir el término $z^2 = 2.71$ (para $\alpha=\beta=0.05$ Riesgos de falso positivo o falso negativo) para tener en cuenta las mínimas desviaciones de la distribución de Poisson de la Normal (Obviamente este término se puede conservar para valores de número de cuentas de fondo mayores que 70 aunque su contribución a la cantidad total es insignificante)

Cuando la media esperada del número de cuentas de fondo es menor que 5, hecho que ocurre frecuentemente en medidas alfa de baja actividad, se deben tomar

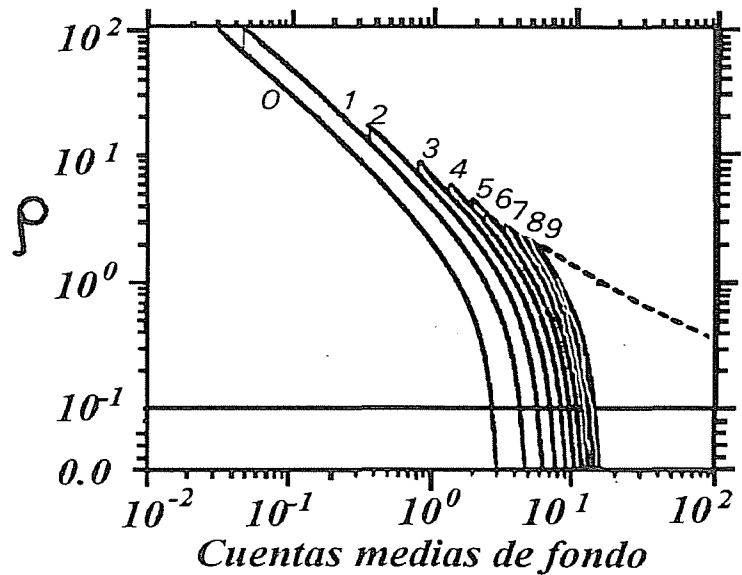


Figura 1: Actividad reducida (ρ) frente a Cuentas medias de fondo (μ_B) y Cuentas netas observadas (n). Cada curva continua representa el límite superior para ρ frente a μ_B , dado un valor de n . La curva envolvente de las curvas representada por la línea punteada representa el límite de detección (ρ_D) y las cuentas críticas (n_C) como función de μ_B ($\alpha=\beta=0.05$).

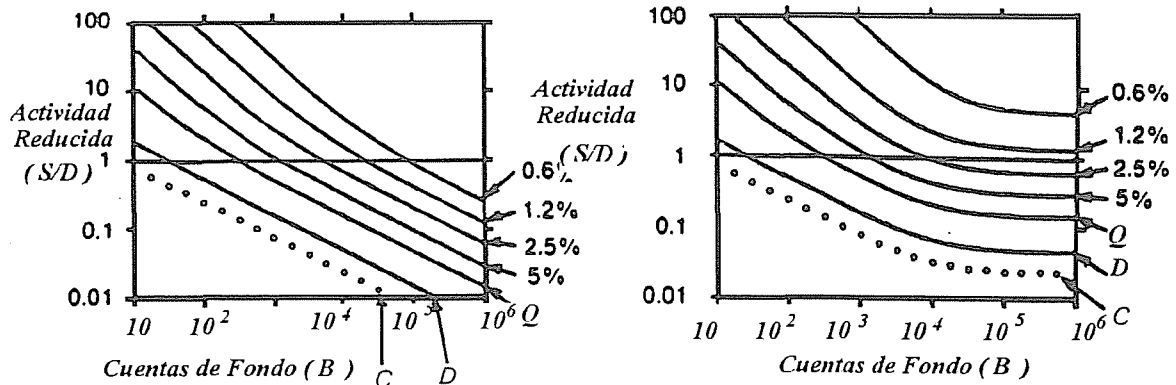


Figura 2: Curvas de actividad reducida. Curvas de actividad reducida ($S/B = \rho$) frente a cuentas de fondo (B) y precisión de recuento (θ). La parte a) incluye solo los errores de Poisson; la parte b) incorpora el error al azar (0.5% para la eficiencia de recuento, 1% para la variabilidad del fondo).

precauciones debido a la desviación evidente de la curva Normal. La discusión detallada de este aspecto se hace en la bibliografía [6,7].

El caso extremo se produce obviamente cuando la cuentas de fondo son aproximadamente cero ($B \approx 0$). En este caso la fórmula asintótica (3) daría como límite de detección cero cuentas y en la fórmula intermedia (2) un número de cuentas de 2.71.

En este caso, como se mostrará posteriormen-te, el límite de detección verdadero en el caso de fondo

indetectable es 3 cuentas (para $\alpha=\beta=0.05$).

La fórmula intermedia (2) no resulta tan mala en este caso (un 10% para S_D), la precisión para S_D y S_C fluctúa cuando B crece de cero a ~5 cuentas.; pero cuando es superior a este número de cuentas (B ≈5 cuentas) las desviaciones relativa esta comprendida entre un 10%(observar que el símbolo B se refiere al valor verdadero o esperado del blanco y B' se refiere a uno determinado experimentalmente).

Para establecer los niveles críticos (para las decisiones de detección) y los límites de detección, cuando $B < 5$ cuentas, se recomienda usar estrictamente la distribución de Poisson. Los resultados de su aplicación se muestran en la tabla 1 y en las figuras 1 y 2 (a) y (b). Hay que realizar las siguientes consideraciones:

a) Se asume como conocida la media del número de cuentas del fondo. Esta asunción es razonable y necesaria. Es razonable porque, incluso en los niveles más bajos de recuento, se deberían alcanzar un número de cuentas próximas a las cien (100 Cuentas) en periodos de tiempo muy largo . Se puede asumir un RS_D de un 10% porque no se podría establecer un riguroso limite de detección a partir de la diferencia entre dos variables de Poisson estimadas. Aún así se podrían obtener decisiones rigurosas de detección y sus límites relativos [6,7,8]

b) La figura 1 presenta los límites de detección en unidades BEA (Actividad equivalente del fondo) en función del fondo B. Para pequeñas incertidumbres de B, uno puede deducir los valores limitantes de la curva.

c) Las integrales debajo de la curva envolvente indican el número crítico de cuentas brutas ($Y_C = S_C + B$) (De manera que B, S e Y valores verdaderos o esperados son números reales) el nivel crítico para y (Y_C) así como todas las cuentas brutas observadas son integrales.

d) La estructura dentada de la envolvente refleja la naturaleza discreta de la distribución de Poisson. Como consecuencia de ello es que el riesgo del falso positivo da una desigualdad $\leq \alpha 0.05$. En cada pico $\alpha \approx 0.05$ y decrece gradualmente hasta que la siguiente integral satisface la condición $\alpha \approx 0.05$

e) La curva punteada representa a la expresión intermedia (4)

f) El valor extremo del nivel más bajo se aplica cuando el límite de detección de Poisson excede el BEA. De hecho, esto ocurre cuando B es menor que ≈ 16 cuentas. Se recomienda en este caso las figuras 2 para las decisiones de detección ($S_C + B =$ integra bajo la envolvente de la curva) y para la estimación de los límites de detección (ordenada = límite de detección en unidades BEA). La curva se usa eficazmente para diseñar procesos de medida. Por ejemplo, si el BEA para un particular radionucleido es 1 pCi/l y se desea medir 5 pCi/l resulta claro que el valor esperado de cuentas de fondo debe ser al menos 1.3. Si la tasa de recuento del fondo es 3 cuentas /hora significa que son necesarios 26 minutos de medida para alcanzar este límite.

$$S_D \approx 2.71 + 1.645 \sqrt{B} \quad (4)$$

g) Un uso de la figs. 2 (a) y (b) es fijar el limite superior cuando $y < y_C$. La secuencia de curvas debajo de la envolvente del límite de detección, que representa las integrales menores que Y_C , nos muestra todos los errores posibles que se comenten cuando la actividad no es detectada. Por ejemplo , si el valor esperado de B es ≈ 1.0 cuentas , $Y_C \approx 3$ (así $S_C \approx 2.0$) y el límite de detección normalizados es 6.75 BEA. Si el valor experimental resulta ser $y = 1$ cuenta , la segunda curva debajo (etiquetada 1) intercepta con $B \approx 1.0$ y la ordenada en el (5%) del limite superior de 3.74 BEA.

h) La tabla 1 se da como alternativa a la Fig.1. La media de la $(1.645\sqrt{B})$ (5)

tasa del fondo se asume conocida y $\alpha \leq 0.05$ mientras $\beta \approx 0.05$. Para el caso discutido con anterioridad ($B \approx 1.3$ cuentas) observamos que el número crítico de cuentas netas es 1.7 (entre 3 - 1.3) donde Y_C es necesariamente una integral y el límite de detección es $7.75 - 1.30 \approx 6.45$ cuentas, que es 5 BEA. (Así es que β es 0.05 para este caso y α se deduce que es 0.043). La fórmula intermedia daría 1.88 cuentas para S_C y 6.46 para S_D resultados que son casualmente cercanos a los valores correctos (Lo casual resulta obvio cuando se calcula S_C y S_D para $B=2$ por ejemplo)