

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1986

03.86.02

CNEA-NT 4/86

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación
GERENCIA DE PROCESOS QUIMICOS

EVALUACION EXPERIMENTAL DE UN METODO DE
ANALISIS POR ESPECTROMETRIA GAMMA, APLICADO
A LA DETERMINACION DE RELACIONES ISOTOPICAS
DE PLUTONIO (Ia PARTE)

A. GOLDSCHMIDT - D. CLEIN DE FRANCK

Buenos Aires

1986

EXPERIMENTAL EVALUATION OF GAMMA SPECTROMETRIC METHOD
FOR THE DETERMINATION OF A PLUTONIUM ISOTOPIC RATIOS.
(PART I).

ABSTRACT

The behaviour of a spectral data analysis code, applied to plutonium samples analyzed by gamma ray spectrometry, is evaluated.

Using nuclear data as calculus parameters and intrinsic calibration techniques for the determination of isotopic ratios, the results obtained are compared with data from an international intercalibration exercise previously published.

RESUMEN

Se evalúa el comportamiento de un programa de cálculo de datos espectrales aplicado a muestras de plutonio, analizadas por espectrometría gamma.

Utilizando datos nucleares como parámetros de cálculo y haciendo uso de la técnica de calibración intrínseca para la determinación de relaciones isotópicas, se comparan los resultados obtenidos con aquellos publicados en un ejercicio de intercomparación internacional.

1. INTRODUCCION

A lo largo del ciclo de combustibles nucleares, existen distintas etapas en las cuales es necesario controlar la composición isotópica de los diferentes materiales físi les y fértiles, entre ellas las de uranio y plutonio.

Estos controles permiten asegurar no sólo el correcto desarrollo de los procesos de fabricación o re-conversión de los combustibles, sino también contabilizar el material nuclear especial con fines de Salvaguardia.

Las técnicas de análisis no destructivo, especialmente adecuadas para efectuar mediciones de contabilidad, tienen la ventaja de evitar las pérdidas de material debidas al tratamiento químico y acondicionamiento de la muestra, con la consiguiente disminución de errores analíticos y costos operativos.

La espectrometría gamma de alta resolución, una de las técnicas de análisis no destructivo frecuentemen-

te utilizada, resulta particularmente adecuada para la determinación de relaciones isotópicas de materiales nucleares como el plutonio y el uranio enriquecido.

La medición de relaciones isotópicas de Pu por espectrometría gamma, está basada en la radiación gamma característica emitida por los isótopos ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu y ^{241}Pu . Lamentablemente, el isótopo ^{242}Pu no emite radiación gamma detectable.

Esta técnica permite la calibración intrínseca del sistema de medición, utilizando sólo los parámetros fundamentales de los isótopos. De esta manera, se pueden determinar los datos de interés sin la utilización de patrones de calibración e independizándose de la forma física de la muestra.

Utilizando esta metodología, las relaciones isotópicas se obtienen a partir de la ecuación

$$\frac{N(j)}{N(k)} = \frac{A(j) \cdot I(k) \cdot T(j) \cdot E(k)}{A(k) \cdot I(j) \cdot T(k) \cdot E(j)} \quad (I)$$

en la cual, las áreas netas de los fotopicos, $A(i)$, y las eficiencias relativas de detección, $E(i)$, se determinan a partir del espectro gamma medido. Las intensidades absolutas de desintegración gamma, $I(i)$, y los períodos de semidesintegración, $T(i)$, son los parámetros fundamentales necesarios para completar el cálculo.

La complejidad de los espectros gamma colectados a partir de mezclas de isótopos de plutonio, y la exigencia de altas precisiones en la determinación de su isotopía con fines de salvaguardia, determinaron el uso de un sistema de espectrometría con detectores de muy alta resolución, asociados a electrónica de alta es-

tabilidad y un sofisticado código de cálculo para su resolución (1).

En el presente trabajo, se probará la capacidad de análisis del código de cálculo comercial SPECTRAN F para la determinación de las áreas netas de fotopicos y las eficiencias relativas de detección, como primera parte de un programa de validación del sistema mencionado anteriormente.

Para ello, se utilizaron como referencia datos publicados previamente por el ESARDA (European Safeguards Research and Development Association) (2), como resultado de un ejercicio de intercalibración para la determinación de las relaciones isotópicas $^{238}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$, $^{239}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$, $^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}$ y $^{241}\text{Am}/^{239}\text{Pu}$ por espectrometría gamma.

2. METODOLOGIA

El trabajo se desarrolló aplicando el código de cálculo SPECTRAN F a cada uno de los seis espectros distribuidos entre los participantes del ejercicio de intercalibración (3). Estos espectros corresponden a las mediciones de tres patrones NBS de plutonio de diferente composición isotópica -SRM 946, SRM 947, SRM 948- realizadas con un detector LEPS -planar- y otro COAX -coaxial-. En los gráficos 1 a 6 se muestran los espectros mencionados.

De esta manera, se obtuvieron las áreas netas de los fotopicos estadísticamente significativos, teniendo como variable de análisis, el número de canales a promediar a ambos lados del pico para la determinación de la curva de fondo, el orden del algoritmo para el "suavizado" del espectro y el nivel de confianza requerido

en la determinación de los fotopicos (4).

Los valores utilizados como parámetros para la resolución de espectros LEPS, son los usados habitualmente para el cálculo de espectros colectados con detectores de alta resolución, es decir, cuatro canales a cada lado del pico y un orden cinco para el "suavizado" del mismo. Los espectros COAX, obtenidos con un detector de inferior resolución, exigieron el uso de un orden de "suavizado" mayor, siete en ese caso. También se debió modificar el número de canales que se toman a ambos lados del pico para determinar la curva de fondo, reduciéndolo a dos. En ambos casos el nivel de confianza requerido para la determinación del pico fue de 95 %, valor habitual en espectrometría gamma.

Todos los cálculos se han efectuado para las ocho energías previamente elegidas en el ejercicio de intercalibración usado como referencia, las que se encuentran en la zona que va de 125 a 208 kev.

En las tablas I a VI se presentan las áreas netas calculadas por el SPECTRAN F, el promedio de las áreas netas publicadas con su desviación standard relativa y las diferencias porcentuales relativas encontradas entre ambas series de valores.

A partir de las áreas netas calculadas, y con el uso de las intensidades absolutas de desintegración gamma (5) y los períodos de semidesintegración (6), se obtuvieron los datos que permitieron construir las curvas de eficiencias relativas de detección en función de la energía. Figuras 7 a 12.

Si bien la zona de interés es la que va de 125 a 208 kev, para el cálculo de estas curvas se utilizaron

picos comprendidos en la región de 125 a 450 kev. Esto permitió comparar los valores de eficiencia obtenidos con sus homólogos publicados. Además fue necesario utilizar, en el caso de los espectros LEPS, una mayor cantidad de puntos en la zona de altas energías debido a su menor respuesta de detección.

Los promedios de las eficiencias relativas publicadas en la referencia, su desviación standard, los valores calculados por el SPECTRAN F y el apartamiento porcentual encontrado entre las series de datos, se muestran en las tablas VII a XII.

En la última etapa del trabajo, al comparar el promedio de las relaciones isotópicas relativas publicadas con aquéllas calculadas a partir de los datos proporcionados por el código, se encontró que los apartamientos no guardaban relación con los esperados a partir del examen de los datos primarios obtenidos por el SPECTRAN F. Ello indujo a recalcular las relaciones isotópicas de la referencia en aquellos casos en los que se contaba con los datos primarios. Tablas XIII a XVIII.

La tabla XIX resume las relaciones isotópicas promedio recalculadas y las obtenidas a partir de los datos provistos por el código utilizado, con su apartamiento relativo porcentual.

3. CONCLUSIONES

Del análisis de los datos tabulados, se infiere que el código evaluado permite obtener valores de áreas netas de fotopico cuyos apartamientos respecto del promedio de los datos publicados, resultan inferiores al 3 % en más del noventa por ciento de los casos. En particular, se puede observar que los datos que mayor apar-

tamiento muestran, corresponden al área neta del pico de 160,28 kev (^{240}Pu), dado que en el mismo están sumadas las contribuciones de las líneas de 159,96 kev (^{241}Pu) y 160,19 kev (^{239}Pu).

Con respecto a las eficiencias relativas, se puede observar un comportamiento similar con apartamientos menores que el 3 % en el noventa y cinco por ciento de los casos, obteniéndose con estos valores curvas bien ajustadas a los promedios publicados en la referencia.

Las relaciones isotópicas obtenidas aplicando el mismo criterio de cálculo a todos los datos primarios disponibles, muestran apartamientos menores que el 5 %, excepto en los casos en que el cálculo involucra al pico de 160 kev; en ellos, el apartamiento puede llegar hasta el 8 %.

Esto permite concluir, que el código estudiado tiene una respuesta adecuada dentro de los límites de precisión esperados, ya que los valores promedio tomados como referencia fueron calculados en base a datos que surgen de utilizar funciones de ajuste y métodos de integración distintos entre sí.

El resultado de la evaluación del SPECTRAN F, permitirá completar la validación de este sistema espectrométrico, el que podrá ser utilizado para la determinación de relaciones isotópicas de uranio y plutonio en diferentes etapas del ciclo de combustibles.

REFERENCIAS

1. P. Adelfang, O. Cristallini. Determinación de la relación isotópica de Plutonio por espectrometría gamma, Inf. Int. : 4-81 TECNOPU.
2. H. Ottmar, Results from an Interlaboratory Exercise on the Determination of Plutonium Isotopic Ratios by Gamma Spectrometry, Rep. of the ESARDA Working Group on Techniques and Standards for Nondestructive Analysis, ESARDA 1/81, KfK 3149 (1981).
3. O. Cristallini, P. Adelfang, Comunicación Privada.
4. Technical Reference Manual for SPECTRAN F Versión 2, Canberra Industries, CI-SE-525.
5. R. Gunnink, J.E. Evans, A.L. Prindle, A Reevaluation of The Gamma Ray Energy and Absolute Branching Intensities of ^{237}U , $^{238,239,240,241}\text{Pu}$ and ^{241}Am , Rep. UCRL-52139 (1976).
6. American National Standard ANSI N15.22-1975.

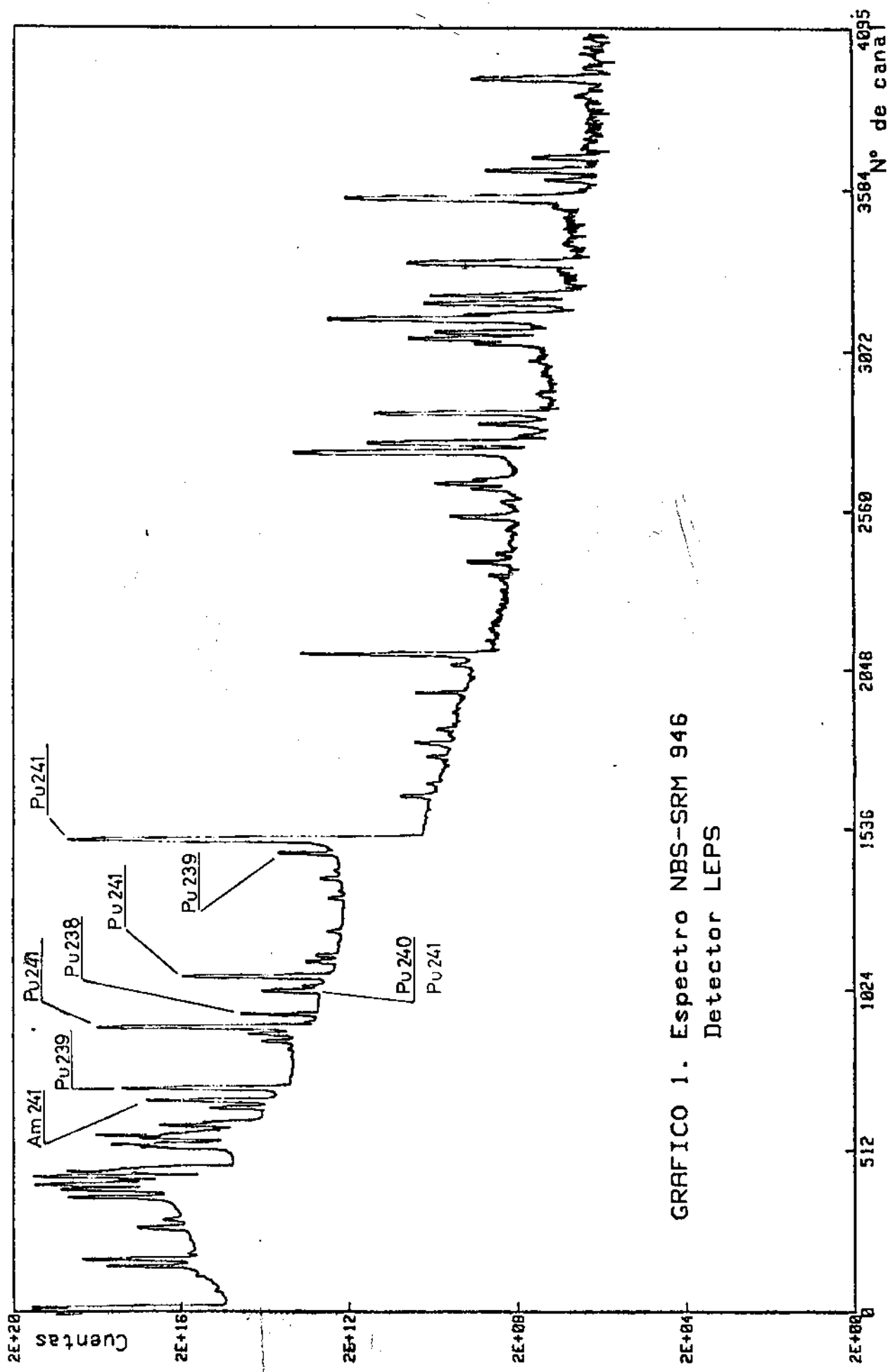
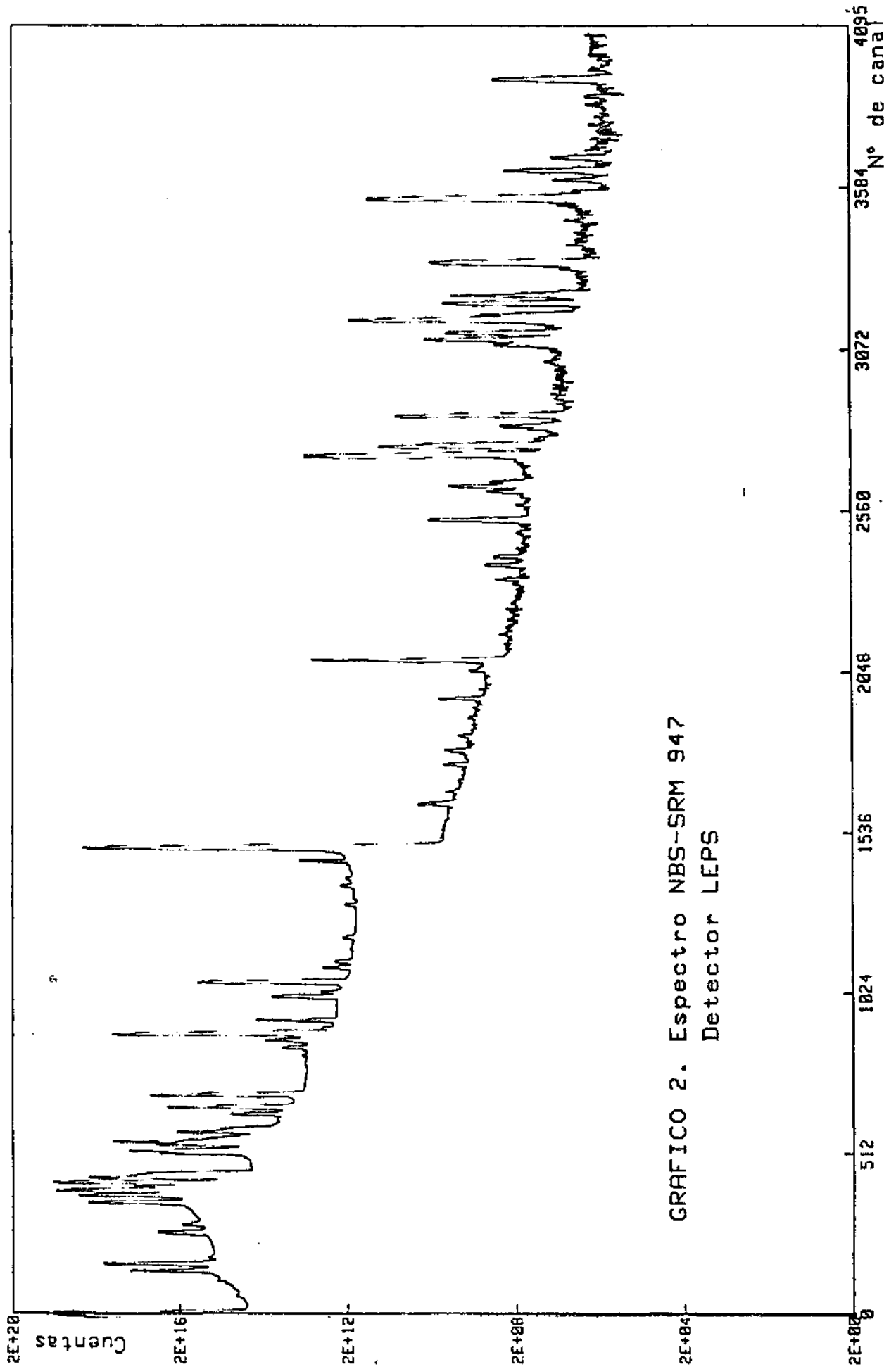


GRAFICO 1. Espectro NBS-SRM 946
Detector LEPS



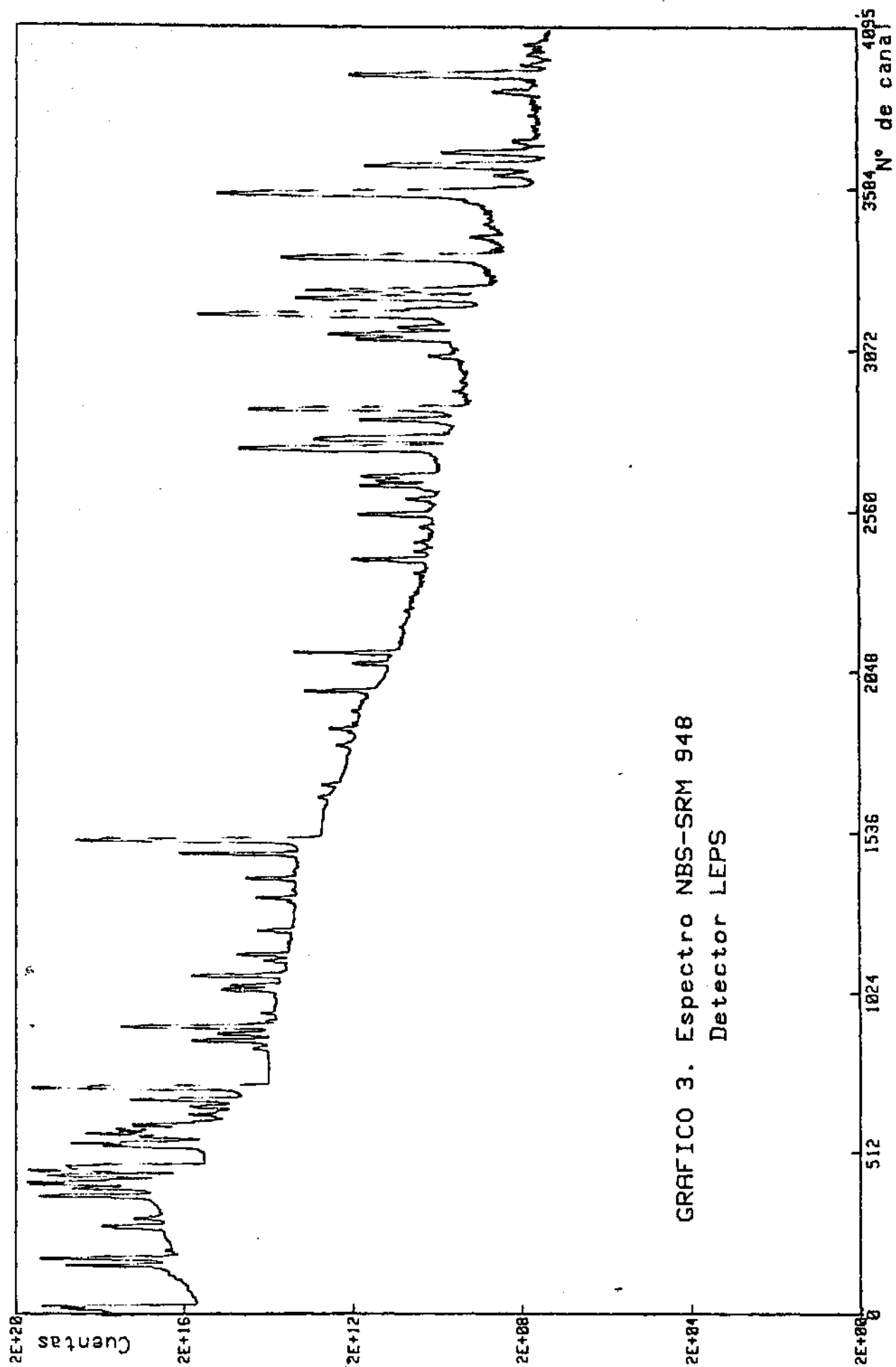
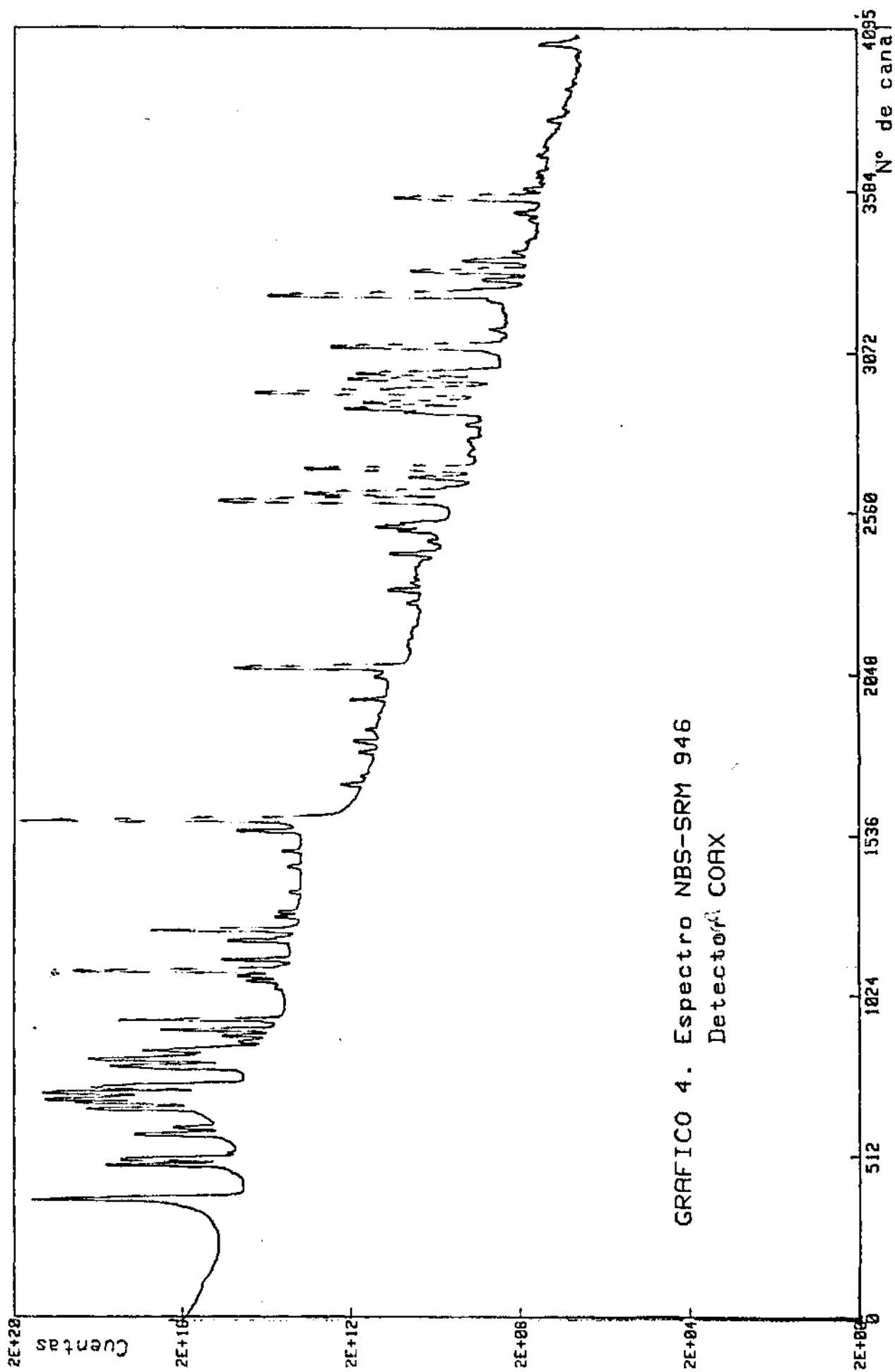
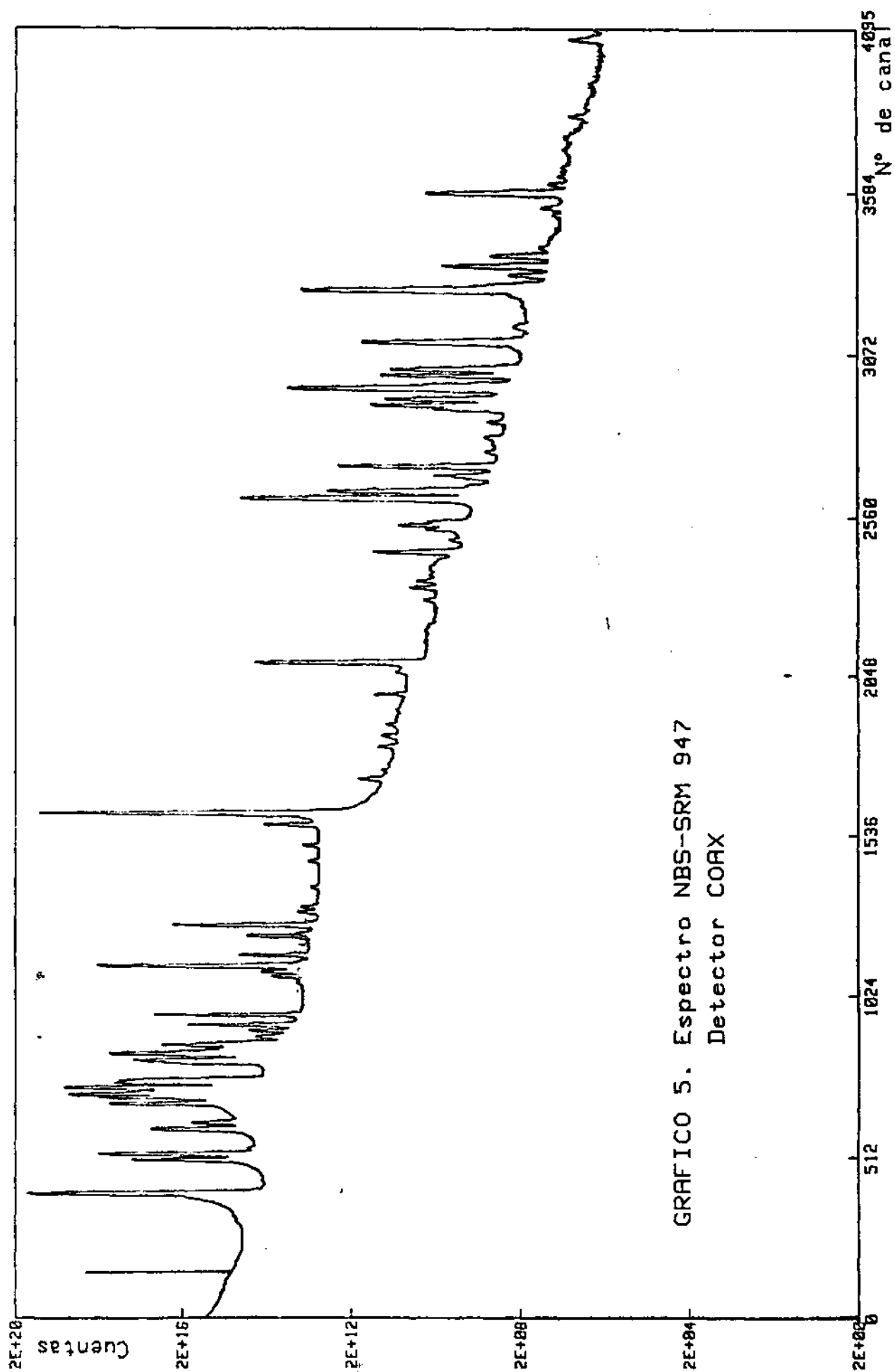
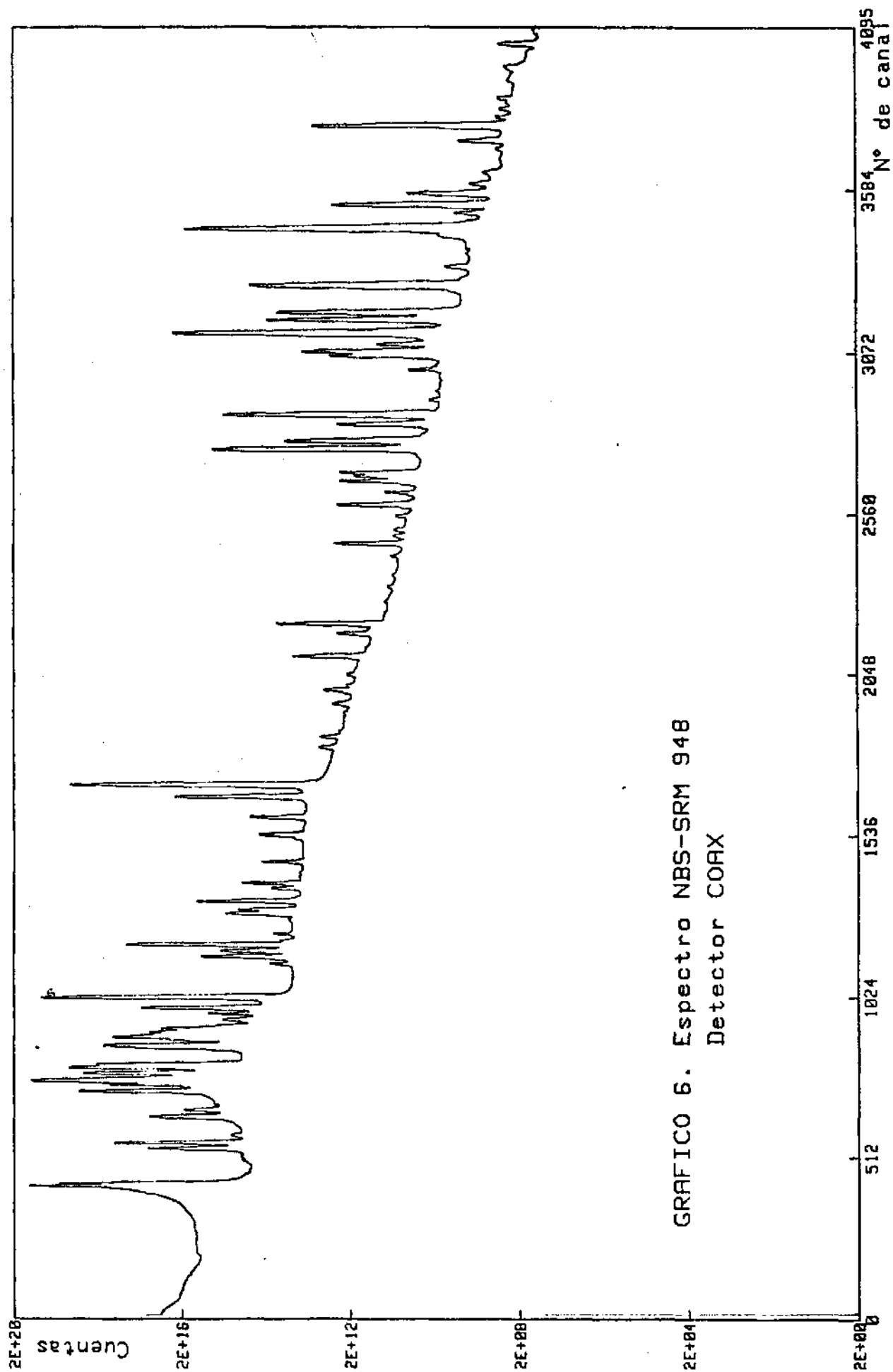


GRAFICO 3. Espectro NBS-SRM 948
Detector LEPS







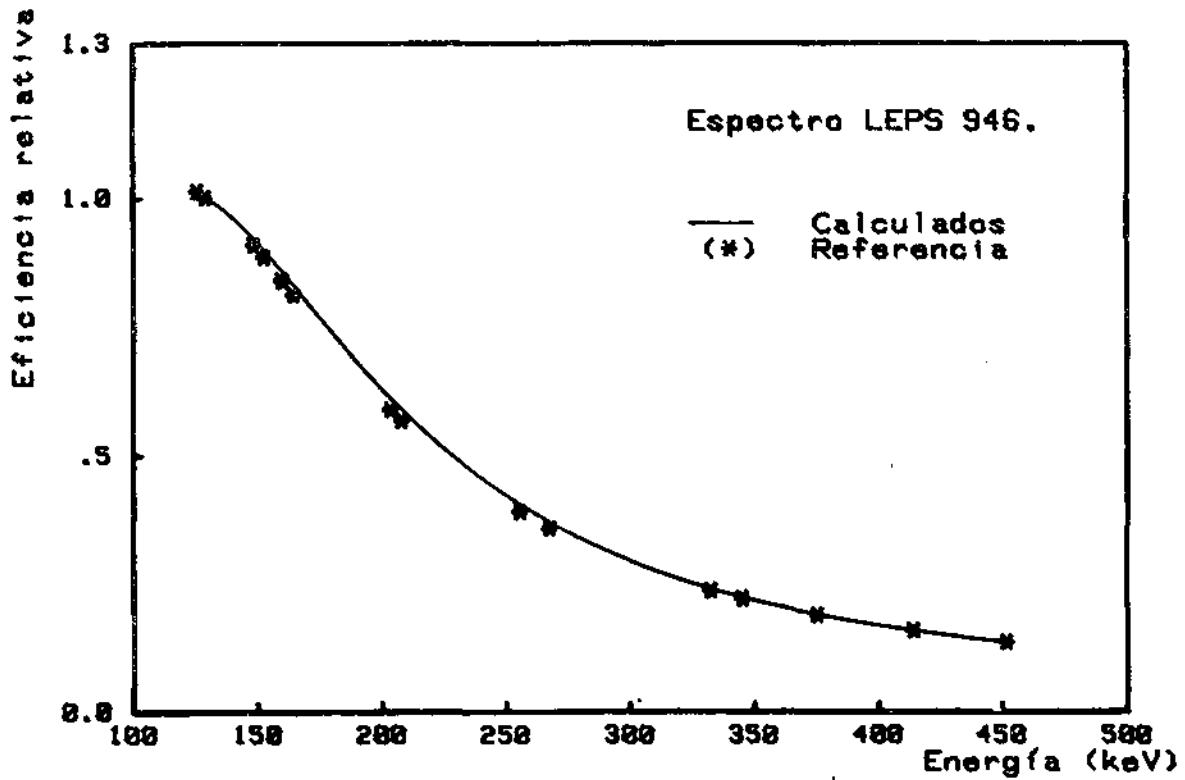


GRAFICO 7 . Curva de eficiencia relativa de detección.

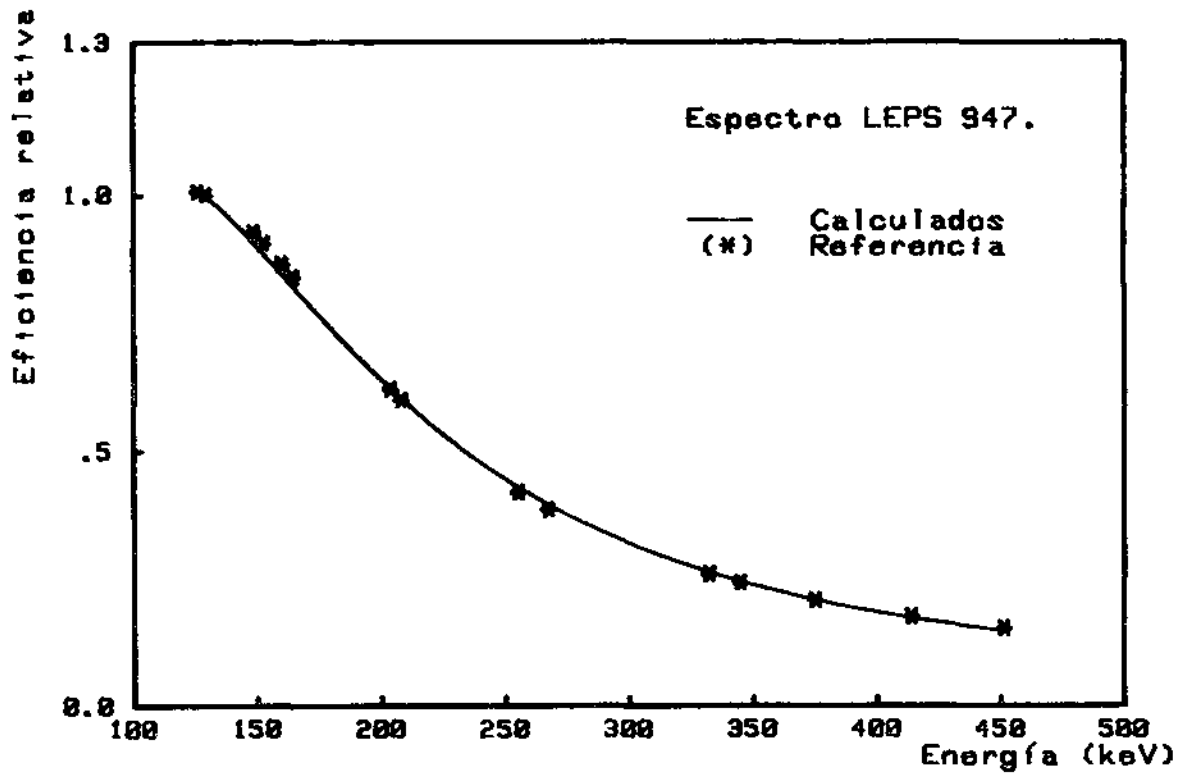


GRAFICO 8 . Curva de eficiencia relativa de detección.

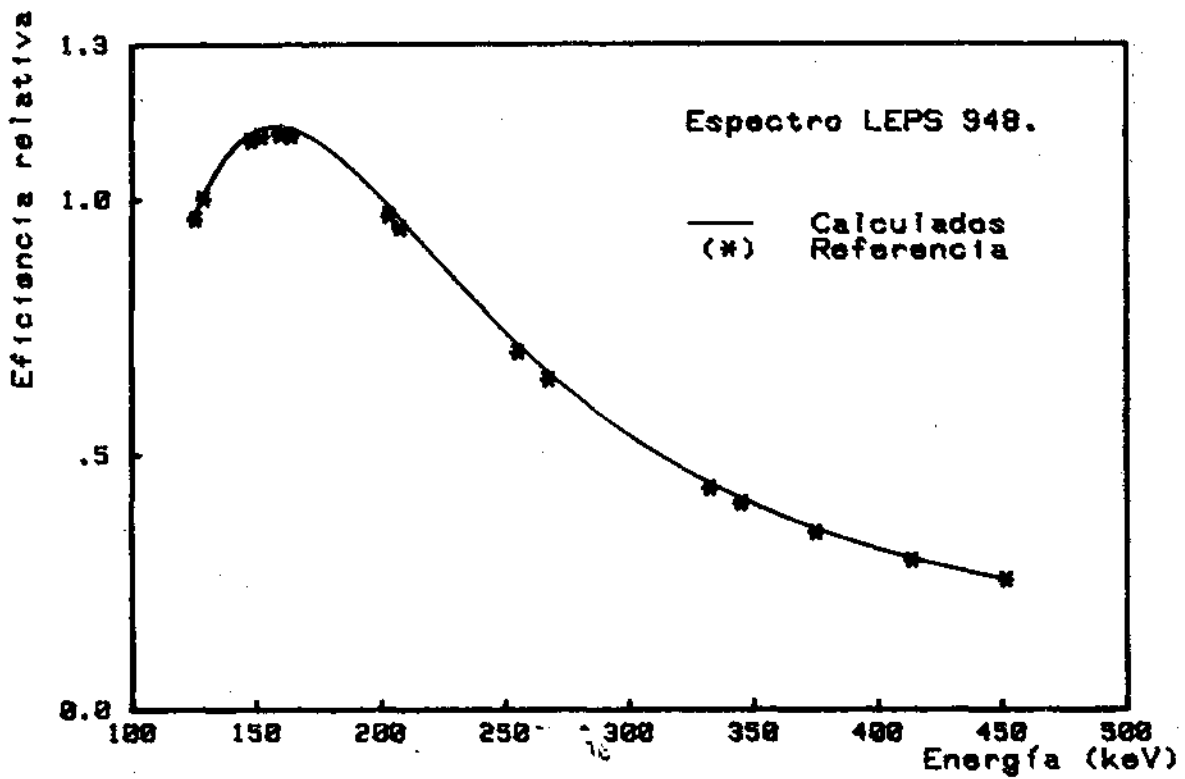


GRAFICO 9 . Curva de eficiencia relativa de detección.

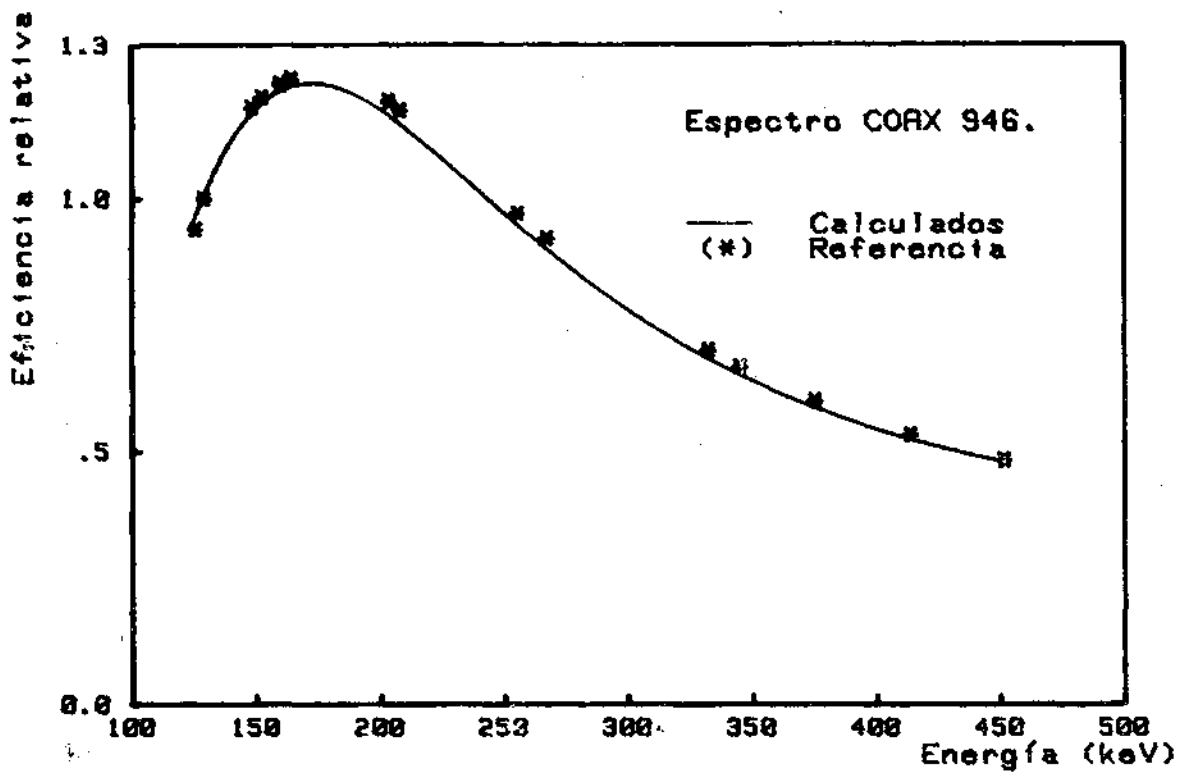


GRAFICO 10 . Curva de eficiencia relativa de detección.

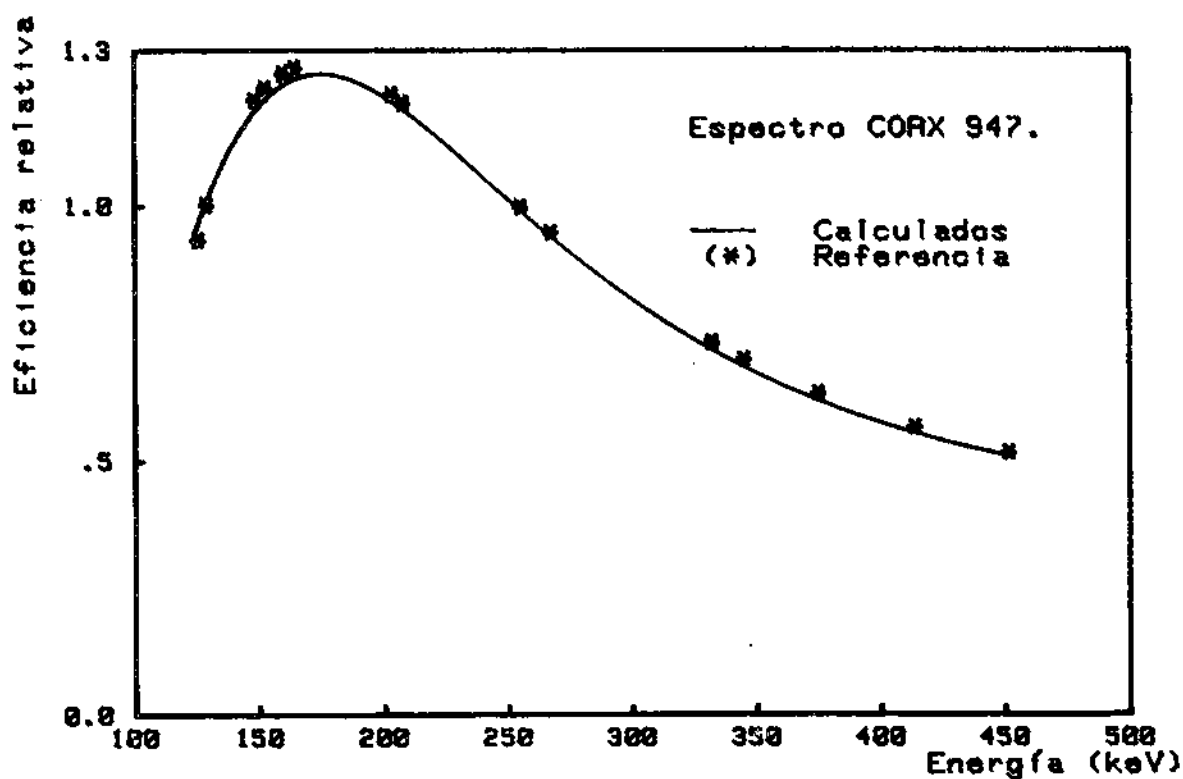


GRAFICO 11 . Curva de eficiencia relativa de detección.

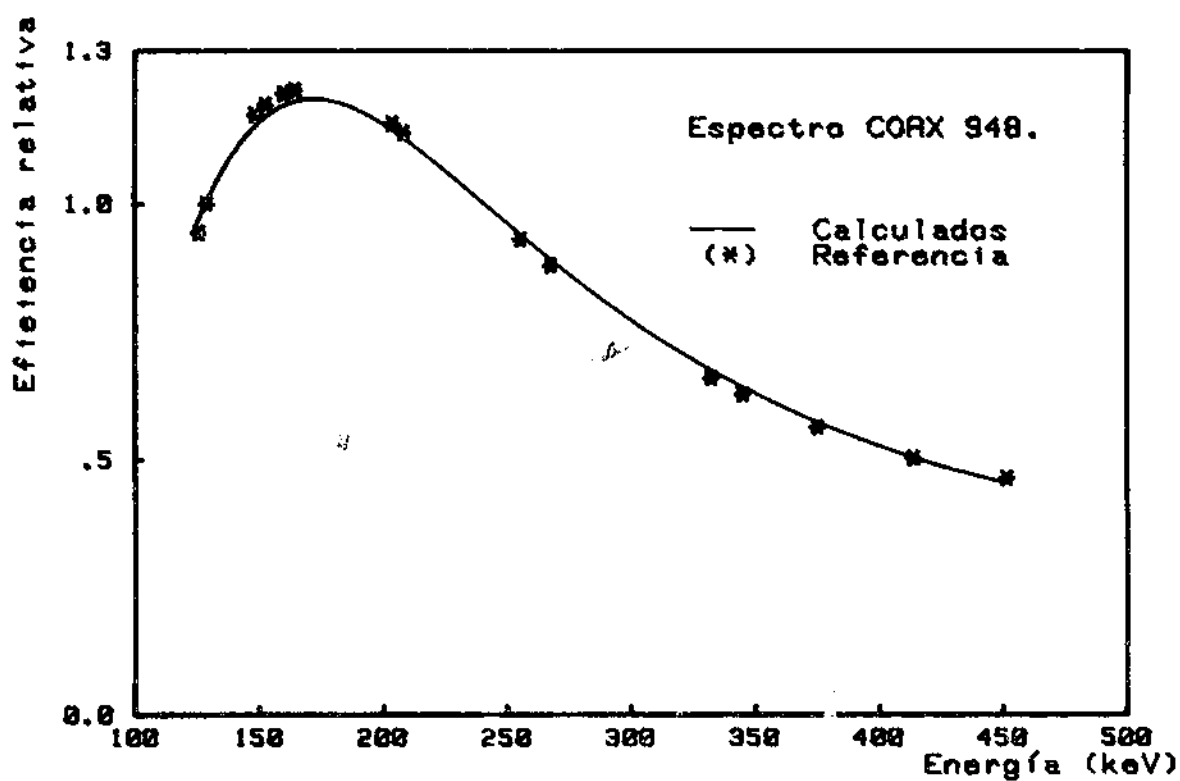


GRAFICO 12 . Curva de eficiencia relativa de detección.

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	6.1910	0.89	6.2360	0.73
129.29	10.2900	0.72	10.2380	0.51
148.52	17.2110	1.99	17.1700	0.24
152.68	1.0920	0.58	1.0850	0.64
160 (b)	0.8756	1.24	0.8557	2.27
164.58	3.8700	0.85	3.8290	1.06
203.54	0.5632	1.23	0.5601	0.55
208.00	31.8870	0.89	31.7950	0.29

Tabla I. Areas netas de fotopicos. Espectro LEPS 946.
Diferencias relativas porcentuales.

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	4.1120	0.88	4.1410	0.71
129.29	6.0210	0.74	6.0010	0.33
148.52	12.7160	1.98	12.7320	0.13
152.68	0.8510	0.68	0.8490	0.24
160 (b)	0.7264	1.53	0.7038	3.11
164.58	2.8880	0.89	2.8770	0.38
203.54	0.3416	3.86	0.3311	3.07
208.00	24.0190	0.90	24.1260	0.45

Tabla II. Areas netas de fotopicos. Espectro LEPS 947.
Diferencias relativas porcentuales.

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	8.2090	2.23	8.0430	2.02
129.29	50.9310	0.70	51.1580	0.45
148.52	11.1560	0.86	10.9570	1.78
152.68	0.2935	3.33	0.2964	0.99
160 (b)	1.6100	1.54	1.5720	2.36
164.58	2.8940	0.86	2.8420	1.80
203.54	4.4840	0.58	4.4770	0.16
208.00	28.3830	0.73	28.3010	0.29

Tabla III. Areas netas de fotopicos. Espectro LEPS 948.
Diferencias relativas porcentuales.

(a) (125.21 + 125.29) kev

(b) (159.96 + 160.19 + 160.28) kev

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	2.7510	1.20	2.7110	1.45
129.29	6.1240	1.02	6.0890	0.57
148.52	14.3510	1.64	14.3390	0.08
152.68	0.8842	1.84	0.8751	1.03
160 (b)	0.7914	2.31	0.7737	2.24
164.58	3.7370	0.83	3.7270	0.27
203.54	0.6549	2.01	0.6473	1.16
208.00	40.9560	0.75	40.6080	0.85

Tabla IV. Areas netas de fotopicos. Espectro COAX 946.
Diferencias relativas porcentuales.

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	2.9120	1.60	2.8400	2.47
129.29	5.8580	1.02	5.8150	0.73
148.52	17.4030	1.62	17.3550	0.28
152.68	1.1274	1.20	1.1173	0.90
160 (b)	1.0775	1.23	1.0506	2.50
164.58	4.5650	0.63	4.5500	0.33
203.54	0.6434	2.15	0.6361	1.13
208.00	50.8340	0.77	50.2210	1.21

Tabla V. Areas netas de fotopicos. Espectro COAX 947.
Diferencias relativas porcentuales.

Energía Utilizada (kev)	Area Neta Promedio (x10E6)	Desviación Standard %	Area Neta Calculada (x10E6)	Diferencia Porcentual
125 (a)	7.3970	1.87	7.4490	0.70
129.29	46.8870	0.81	46.7480	0.30
148.52	10.7170	1.72	10.6970	0.19
152.68	0.2795	3.64	0.2644	5.40
160 (b)	1.6090	2.20	1.5360	4.54
164.58	2.8810	1.22	2.8180	2.19
203.54	4.8900	0.94	4.8730	0.35
208.00	31.5560	0.73	31.3420	0.68

Tabla VI. Areas netas de fotopicos. Espectro COAX 948.
Diferencias relativas porcentuales.

(a) (125.21 + 125.29) kev

(b) (159.96 + 160.19 + 160.28) kev

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	1.0116	1.70	1.0074	0.42
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	0.9070	4.40	0.9221	1.66
152.68	0.8828	4.90	0.8999	1.94
159.95	0.8383	5.40	0.8584	2.40
160.28	0.8363	5.50	0.8565	2.42
164.58	0.8098	5.70	0.8313	2.65
203.54	0.5873	5.60	0.6121	4.22
208.00	0.5661	5.40	0.5901	4.24
255.38	0.3878	3.80	0.4043	4.25
267.54	0.3555	3.30	0.3688	3.74
332.35	0.2350	1.80	0.2389	1.66
345.01	0.2189	1.80	0.2218	1.32
375.04	0.1871	1.80	0.1886	0.80
413.71	0.1565	2.00	0.1570	0.32
451.47	0.1345	2.30	0.1346	0.07

Tabla VII. Eficiencias relativas de detección.
Apartamientos porcentuales. Espectro LEPS 946.

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	1.0064	1.20	1.0145	0.80
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	0.9269	3.20	0.9097	1.86
152.68	0.9055	3.50	0.8880	1.93
159.95	0.8653	3.80	0.8488	1.91
160.28	0.8634	3.80	0.8470	1.90
164.58	0.8386	3.90	0.8236	1.79
203.54	0.6211	3.20	0.6252	0.66
208.00	0.5994	3.00	0.6051	0.95
255.38	0.4182	2.40	0.4302	2.87
267.54	0.3844	2.40	0.3952	2.81
332.35	0.2576	1.80	0.2620	1.71
345.01	0.2406	1.70	0.2437	1.29
375.04	0.2071	1.50	0.2073	0.10
413.71	0.1749	2.10	0.1719	1.72
451.47	0.1520	3.70	0.1463	3.75

Tabla VIII. Eficiencias relativas de detección
Apartamientos porcentuales. Espectro LEPS 947.

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	0.9599	0.80	0.9557	0.44
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	1.1125	1.40	1.1243	1.06
152.68	1.1209	1.50	1.1338	1.15
159.95	1.1248	1.60	1.1388	1.24
160.28	1.1245	1.60	1.1386	1.25
164.58	1.1206	1.80	1.1353	1.31
203.54	0.9659	2.50	0.9856	2.04
208.00	0.9411	2.60	0.9619	2.21
255.38	0.6993	4.00	0.7170	2.53
267.54	0.6460	4.20	0.6620	2.48
332.35	0.4332	4.40	0.4442	2.54
345.01	0.4038	4.30	0.4138	2.48
375.04	0.3458	4.00	0.3536	2.26
413.71	0.2907	3.40	0.2953	1.58
451.47	0.2524	2.80	0.2537	0.52

Tabla IX. Eficiencias relativas de detección.
Apartamentos porcentuales. Espectro LEPS 948.

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	0.9401	4.30	0.9512	1.18
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	1.1771	4.40	1.1630	1.20
152.68	1.1972	4.30	1.1834	1.15
159.95	1.2227	3.90	1.2085	1.16
160.28	1.2237	3.90	1.2093	1.18
164.58	1.2329	3.70	1.2179	1.22
203.54	1.1888	2.70	1.1623	2.23
208.00	1.1717	2.70	1.1464	2.16
255.38	0.9698	2.80	0.9498	2.06
267.54	0.9198	2.60	0.9000	2.15
332.35	0.6991	2.30	0.6830	2.30
345.01	0.6662	2.40	0.6507	2.33
375.04	0.5989	2.60	0.5856	2.22
413.71	0.5316	2.40	0.5223	1.75
451.47	0.4812	2.10	0.4781	0.64

Tabla X. Eficiencias relativas de detección.
Apartamentos porcentuales. Espectro COAX 946.

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	0.9322	3.60	0.9483	1.73
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	1.2030	3.70	1.1776	2.11
152.68	1.2258	3.60	1.2008	2.04
159.95	1.2538	3.40	1.2305	1.86
160.28	1.2548	3.40	1.2315	1.86
164.58	1.2645	3.40	1.2425	1.74
203.54	1.2128	3.70	1.2004	1.02
208.00	1.1952	3.70	1.1854	0.82
255.38	0.9953	4.40	0.9901	0.52
267.54	0.9463	4.30	0.9396	0.71
332.35	0.7315	4.30	0.7179	1.86
345.01	0.6987	4.30	0.6846	2.02
375.04	0.6321	4.50	0.6178	2.26
413.71	0.5644	4.40	0.5527	2.07
451.47	0.5142	4.30	0.5075	1.30

Tabla XI. Eficiencias relativas de detección.
Apartamientos porcentuales. Espectro COAX 947.

Energía Utilizada	Eficiencia Promedio	Desviación Standard %	Eficiencia Calculada	Diferencia Porcentual
125.29	0.9432	2.30	0.9552	1.27
129.29	1.0000	0.00	1.0000	0.00
148.57	1.1745	2.50	1.1493	2.15
152.68	1.1936	2.10	1.1679	2.15
159.95	1.2151	1.40	1.1907	2.01
160.28	1.2156	1.40	1.1914	1.99
164.58	1.2223	1.10	1.1992	1.89
203.54	1.1563	2.10	1.1458	0.91
208.00	1.1388	2.40	1.1308	0.70
255.38	0.9301	5.70	0.9414	1.21
267.54	0.8786	6.20	0.8927	1.60
332.35	0.6580	7.00	0.6748	2.55
345.01	0.6260	6.80	0.6414	2.46
375.04	0.5625	5.80	0.5731	1.88
413.71	0.5027	3.70	0.5045	0.36
451.47	0.4638	2.10	0.4541	2.09

Tabla XII. Eficiencias relativas de detección.
Apartamientos porcentuales. Espectro COAX 948.

Am241/Pu239					
Espectros LEPS			Espectros COAX		
LEPS 946 125/129	LEPS 947 125/129	LEPS 948 125/129	COAX 946 125/129	COAX 947 125/129	COAX 948 125/129
0.01610	0.01847	0.00447	0.01293	0.01429	0.00466
0.01624	0.01863	0.00460	0.01305	0.01445	0.00454
***	***	***	***	***	***
0.01667	0.01899	0.00481	0.01363	***	0.00484
0.01668	0.01905	0.00468	0.01363	0.01517	0.00470
0.01675	0.01914	0.00479	0.01371	0.01519	0.00471
0.01689	0.01904	0.00456	0.01430	0.01557	0.00476
0.01649	0.01865	0.00459	0.01312	0.01462	0.00452
***	***	0.00465	***	***	0.00458
***	***	***	***	***	***
***	***	***	***	***	0.00455
***	***	0.00459	***	***	***
0.01653	0.01884	0.00461	0.01295	0.01444	0.00458
***	***	***	0.01318	0.01475	0.00459
0.01654	0.01885	0.00464	0.01339	0.01481	0.00464
1.60%	1.29%	2.23%	3.42%	3.06%	2.20%

Tabla XIII. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard relativas.

Pu238/Pu241					
Espectros LEPS			Espectros COAX		
LEPS 946 152/148	LEPS 947 152/148	LEPS 948 152/148	COAX 946 152/148	COAX 947 152/148	COAX 948 152/148
0.991	0.986	1.011	0.984	0.985	1.017
0.984	0.983	1.041	0.977	0.977	1.053
***	***	***	***	***	***
0.915	0.929	1.093	0.945	0.947	1.129
0.981	0.983	1.023	0.970	0.967	1.044
0.987	0.980	1.044	0.979	0.985	1.062
0.984	0.981	1.046	0.979	0.977	1.009
0.978	0.978	1.002	0.972	0.976	1.013
***	***	1.024	***	***	1.038
***	***	***	***	***	***
0.987	0.983	1.073	0.995	0.995	0.985
0.991	0.989	0.967	1.035	0.977	1.007
0.985	0.991	1.121	0.971	0.971	1.038
0.982	0.992	1.053	0.994	0.997	0.989
0.979	0.980	1.041	0.982	0.978	1.032
2.19%	1.79%	3.99%	2.25%	1.42%	3.78%

Tabla XIV. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard relativas.

(***) Se careció de datos primarios para su cálculo.

Pu239/Pu241					
Espectros LEPS					
LEPS 946		LEPS 947		LEPS 948	
129/148	203/208	129/148	203/208	129/148	203/208
0.939	0.977	0.959	0.968	0.980	0.958
0.944	0.972	0.967	0.975	0.972	0.957
***	***	***	***	***	***
0.964	***	0.974	***	1.019	***
1.018	***	1.025	***	1.021	***
1.016	***	1.016	***	0.999	***
1.012	0.974	1.011	0.963	1.003	0.954
0.979	0.978	0.966	0.968	0.973	0.958
***	***	***	***	0.984	0.959
***	***	***	***	***	***
0.897	0.942	0.944	1.001	0.994	***
0.941	0.964	0.946	0.952	0.915	0.960
1.008	0.985	1.019	0.988	0.988	0.945
1.003	***	0.998	***	0.998	***
0.975	0.970	0.984	0.974	0.987	0.956
4.16%	1.46%	3.09%	1.68%	2.81%	0.54%

Tabla XV. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard.

Pu239/Pu241					
Espectros COAX					
COAX 946		COAX 947		COAX 948	
129/148	203/208	129/148	203/208	129/148	203/208
0.943	0.988	0.933	0.982	1.029	0.945
0.969	0.996	0.951	0.947	0.981	0.952
***	***	***	***	***	***
1.001	***	1.001	***	1.082	***
1.030	***	1.021	***	1.036	***
1.035	***	1.043	***	1.042	***
1.009	1.023	1.022	1.022	1.028	0.961
0.974	0.978	0.972	0.974	0.989	0.953
***	***	***	***	0.981	0.953
***	***	***	***	***	***
1.036	0.969	1.033	0.949	1.003	0.957
0.903	0.999	0.991	0.995	0.986	0.956
0.979	0.982	0.975	0.979	0.967	0.944
1.001	0.958	0.996	0.960	1.006	0.947
0.989	0.987	0.994	0.976	1.011	0.952
4.15%	2.03%	3.47%	2.58%	3.30%	0.58%

Tabla XVI. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard.

***) Se careció de datos primarios para su cálculo.

Pu240/Pu241					
Espectros LEPS					
LEPS 946		LEPS 947		LEPS 948	
160/148	160/164	160/148	160/164	160/148	160/164
1.067	0.900	1.052	0.931	1.006	0.908
0.999	0.811	0.974	0.821	0.974	0.851
***	***	***	***	***	***
***	***	***	***	***	***
0.979	***	1.002	***	1.004	***
0.941	***	0.977	***	0.987	***
0.973	0.780	0.964	0.837	0.955	0.861
1.022	0.922	1.054	0.966	0.993	0.916
***	***	***	***	0.990	0.901
***	***	***	***	***	***
1.027	0.829	***	***	0.960	***
1.039	0.884	0.968	0.830	0.934	0.851
0.993	0.914	1.000	0.937	0.986	0.928
0.998	***	0.990	***	0.991	***
1.004	0.863	0.998	0.887	0.980	0.888
3.60%	6.43%	3.42%	7.27%	2.27%	3.67%

Tabla XVII. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard.

Pu240/Pu241					
Espectros COAX					
COAX 946		COAX 947		COAX 948	
160/148	160/164	160/148	160/164	160/148	160/164
1.007	0.878	1.040	0.921	1.011	0.923
0.900	0.849	0.932	0.874	0.934	0.861
***	***	***	***	***	***
0.894	0.894	***	***	***	***
1.020	0.867	1.004	0.869	1.019	0.898
1.018	0.851	1.016	0.881	1.021	0.883
0.956	0.792	0.976	0.833	0.980	0.874
0.945	0.868	0.977	0.915	0.994	0.912
***	***	***	***	0.982	0.918
***	***	***	***	***	***
0.924	0.806	0.948	0.822	***	***
***	***	0.992	0.930	0.955	0.897
0.911	0.912	0.968	0.963	0.916	0.882
1.008	0.928	1.000	0.946	0.999	0.906
0.958	0.864	0.985	0.895	0.981	0.895
5.32%	4.94%	3.26%	5.29%	3.64%	2.23%

Tabla XVIII. Relaciones Isotópicas Relativas utilizadas como referencia, con sus promedios y desviaciones standard.

(***) Se careció de datos primarios para su cálculo.

Relaciones Isotópicas	Energías Utilizadas	Espectro Gamma	Referencia Internac	Desviación Standard %	Factor Calculado	Diferencia Porcentual
Pu238/Pu241	152/148	LEPS 946	0.979	2.19	0.972	0.69
		COAX 946	0.982	2.25	0.970	1.20
		LEPS 947	0.980	1.79	0.977	0.30
		COAX 947	0.978	1.42	0.970	0.75
		LEPS 948	1.041	3.99	1.078	3.54
		COAX 948	1.032	3.78	0.980	5.00
Pu239/Pu241	129/148	LEPS 946	0.975	4.16	0.979	0.48
			0.970	1.46	0.966	0.50
	203/208	COAX 946	0.989	4.15	0.963	2.66
			0.987	2.03	0.978	0.83
	129/148	LEPS 947	0.984	3.09	0.954	3.06
			0.974	1.68	0.944	3.11
	203/208	COAX 947	0.994	3.47	0.960	3.46
			0.976	2.58	0.971	0.47
	129/148	LEPS 948	0.987	2.81	1.022	3.51
			0.956	0.54	0.959	0.38
	203/208	COAX 948	1.011	3.30	0.980	2.99
			0.952	0.58	0.956	0.44
Pu240/Pu241	160/148	LEPS 946	1.004	3.60	0.914	8.57
			0.863	6.43	0.828	4.07
	160/164	COAX 946	0.958	5.32	0.872	8.98
			0.864	4.94	0.801	7.29
	160/149	LEPS 947	0.998	3.42	0.922	7.59
			0.887	7.27	0.824	7.08
	160/164	COAX 947	0.985	3.26	0.914	7.20
			0.895	5.29	0.853	4.78
	160/148	LEPS 948	0.980	2.27	0.943	3.74
			0.888	3.67	0.880	0.92
	160/148	COAX 948	0.981	3.64	0.931	5.06
			0.895	2.23	0.878	1.98
Am241/Pu239	125/129	LEPS 946	0.01654	1.60	0.01672	1.09
		COAX 946	0.01339	3.42	0.01295	3.31
		LEPS 947	0.01885	1.29	0.01881	0.20
		COAX 947	0.01481	3.06	0.01424	3.83
		LEPS 948	0.00464	2.23	0.00455	1.86
		COAX 948	0.00464	2.20	0.00461	0.56

Tabla XIX. Relaciones Isotópicas Relativas. Cuadro Resumen.