

Vigilancia Radiológica en la Región Centro-Sur de Cuba

Cartas, H.A.¹, Alonso, C.M.¹, Martín, J.A.¹, Sibello, R.Y.¹, Guillén, A.¹ y Morera, Y.¹

1: Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Cuba.

hector@ceac.cu

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la vigilancia radiológica atmosférica, realizada durante 1994-2014 por el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, situado en los 22 ° 03 ' N y 80 ° 29 ' W. Se midió directamente la tasa de dosis gamma ambiental con una sonda Gamma Tracer GF1588, se recolectaron los aerosoles del aire a nivel del suelo con una instalación aspiradora y filtradora de 1106 m³h⁻¹ de flujo y aquellos provenientes de las precipitaciones atmosféricas, con un sistema de 1,50 m² de superficie colectora. Se midió la concentración de actividad y el flujo de actividad de los radionúclidos Be-7, K-40, Cs-137 y Pb-210 mediante espectrometría gamma de alta resolución. Se analizaron en conjunto con la concentración de aerosoles, el flujo de aerosoles y la cantidad de lluvia mediante el análisis estadístico multivariante. La tasa de dosis gamma ambiental mantuvo una tendencia constante con media 89 nSv h⁻¹ y desviación estándar 11 nSv h⁻¹, se evidenció un patrón fundamental en el comportamiento anual de los radionúclidos, determinado por las lluvias; el mismo está caracterizado por el máximo de concentración de actividad y el mínimo de flujo de actividad durante enero-mayo; el mínimo de concentración de actividad y el máximo de flujo de actividad en junio-octubre y por un período de tránsito en los meses noviembre y diciembre, con valores bajos en ambas variables. Se demostró la tendencia decreciente del Cs-137 atmosférico. Se evidenció la tendencia decreciente inmediata del I-131 proveniente del accidente de Fukushima en Japón.

1. INTRODUCCIÓN

La vigilancia radiológica ambiental es útil para conocer el fondo radiológico, identificar la contaminación radiactiva y adoptar medidas de protección en caso de situaciones de emergencia. La medición sistemática de la tasa de dosis gamma equivalente ambiental y particularmente, el análisis combinado de la concentración de actividad y el flujo de actividad de los radionúclidos emisores gamma en aerosoles, la concentración de aerosoles, el flujo de aerosoles y la cantidad de lluvia, perfecciona el conocimiento sobre el fondo radiológico y constituye una herramienta poderosa para evaluar la situación radiológica en el ambiente [1].

El objetivo principal de este trabajo es mostrar los resultados de la vigilancia radiológica ambiental en la región centro-sur de Cuba durante el período 1994-2014. Se presentan la tendencia fundamental de la tasa de dosis de gamma equivalente ambiental, el patrón fundamental en el comportamiento anual de los radionúclidos emisores gamma Be-7, K-40, Cs-137 y Pb-210 en la atmósfera, la tendencia general del Cs-137 proveniente de la precipitación radiactiva global y el comportamiento del I-131 proveniente del accidente de Fukushima en Japón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La tasa de dosis de gamma equivalente ambiental se midió diariamente cada treinta minutos con una sonda Gamma Tracer GF1588, colocada a 1m sobre el nivel de suelo en el Centro de Estudios Ambientales. El promedio, la desviación estándar, el mínimo y el máximo se calcularon mensualmente.

Se recolectaron los aerosoles del aire a nivel del suelo cada diez días durante el período 1994-2002, con un equipo aspirador y filtrador de $1106 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ de flujo medio y filtro Petrianov FPP-15-1.5, el cual posee 99% eficiencia para los aerosoles con dimensiones entre 0,3 y 1,5 micrómetros. Los filtros se incineraron a 350°C durante 72 horas. La concentración de aerosoles se determinó dividiendo la diferencia entre las masas final e inicial del filtro, por el volumen de aire filtrado:

$$\Delta_A = \frac{M_f - M_i}{V} \quad (1)$$

donde:

Δ_A : concentración de aerosoles (μgm^{-3})

M_f : masa final del filtro (g)

M_i : masa inicial del filtro (g)

V : volumen de aire filtrado (m^3)

Los aerosoles provenientes de las precipitaciones atmosféricas se recolectaron mensualmente, con un sistema de $1,50 \text{ m}^2$ de superficie colectora, compuesto por seis tanques plásticos azules para almacenar las lluvias. El agua se evaporó gradualmente en una cápsula de porcelana de 500 ml puesta en una plancha caliente, hasta lograr la masa seca total de aerosoles para los análisis. El flujo de aerosoles se determinó dividiendo la masa seca total de aerosoles por el área de recolección y el tiempo de recolección:

$$\Phi_A = \frac{30M}{ST} \quad (2)$$

donde:

Φ_A : flujo de aerosoles ($\text{gm}^{-2} \text{mes}^{-1}$)

S : Área de recolección (m^2)

M : Masa seca total de aerosoles (g)

T : Tiempo de recolección (días)

El promedio mensual de la cantidad de lluvia, $H(\text{mm})$ se determinó mediante observaciones meteorológicas durante el período.

Las cenizas del filtro y la masa seca total se envasaron en viales plásticos de 4,2 mL para ser analizados por espectrometría gamma de alta resolución en un sistema espectrométrico con un detector de Germanio de alta pureza en geometría de pozo tipo EGPC 100 P15, con

eficiencia absoluta de 11% para 662 keV de Cs-137 y 1,86 keV de resolución para 1332 keV de Co-60. El programa Winner 6.0 se utilizó para la adquisición y el análisis de los espectros [3].

La concentración de actividad y el flujo de actividad de los radionúclidos y sus incertidumbres se determinaron por las siguientes fórmulas [1], [4]:

$$A_C = \frac{M_C R_S e^{\lambda t_s} e^{\lambda t_r}}{m_C V P_\gamma \varepsilon (1 - e^{-\lambda t_s})} \quad (3)$$

$$u(A_C) = A_C \sqrt{u_r^2(R_S) + u_r^2(\varepsilon) + u_r^2(P_\gamma) + u_r^2(V)} \quad (4)$$

$$A_F = \frac{30 M_F R_S e^{\lambda t_s} e^{\lambda t_r}}{m_F t_s S P_\gamma \varepsilon (1 - e^{-\lambda t_s})} \quad (5)$$

$$u(A_F) = A_F \sqrt{u_r^2(R_S) + u_r^2(\varepsilon) + u_r^2(P_\gamma) + u_r^2(S)} \quad (6)$$

donde:

A_C : Concentración de Actividad (Bqm^{-3})

A_F : Flujo de Actividad ($\text{Bqm}^{-2}\text{mes}^{-1}$)

M_C : Masa total en cenizas de filtro de aerosoles (g)

m_C : Masa en cenizas del filtro de aerosoles analizada (g)

M_F : Masa seca total de los aerosoles depositados (g)

m_F : Masa seca de los aerosoles depositados analizada (g)

V : Volumen de aire filtrado (m^3)

S : Área de recolección (m^2)

R_S : Tasa de conteos neta del radionúclido (s^{-1})

λ : Constante de desintegración del radionúclido (d^{-1})

P_γ : Probabilidad de emisión gamma para la energía analítica del radionúclido.

ε : Eficiencia absoluta para la energía analítica del radionúclido

t_s : Tiempo de recolección (d^{-1})

t_r : Tiempo de reposo (d^{-1})

$u(A_C)$: Incertidumbre de la Concentración de Actividad (Bqm^{-3})

$u(A_F)$: Incertidumbre del Flujo de Actividad ($\text{Bqm}^{-2}\text{mes}^{-1}$)

$u_r(R_S)$: Incertidumbre relativa de la tasa de conteos neta del radionúclido

$u_r(\varepsilon)$: Incertidumbre relativa de la eficiencia

$u_r(P_\gamma)$: Incertidumbre relativa de la probabilidad de emisión gamma

$u_r(V)$: Incertidumbre relativa del volumen de aire filtrado

$u_r(S)$: Incertidumbre relativa del área de recolección

El conjunto de datos acumulados se procesó aplicando métodos estadísticos descriptivos y multivariantes [5] con los programas Microsoft EXCEL [6] y Statgraphics Plus 5.1 para Windows [7].

3. DISCUSIÓN

3.1. Tasa de dosis gamma equivalente ambiental

La tasa de dosis gamma equivalente ambiental mostró una tendencia constante con media mensual 89 nSvh^{-1} y desviación estándar 11 nSvh^{-1} como se muestra en al figura 1. Los valores mínimo promedio y máximo promedio fueron 52 nSvh^{-1} y 130 nSvh^{-1} respectivamente. No se detectaron valores anormales sostenidos, indicadores de contaminación radiactiva. Todos los valores son propios de una zona con fondo radiactivo normal[8].

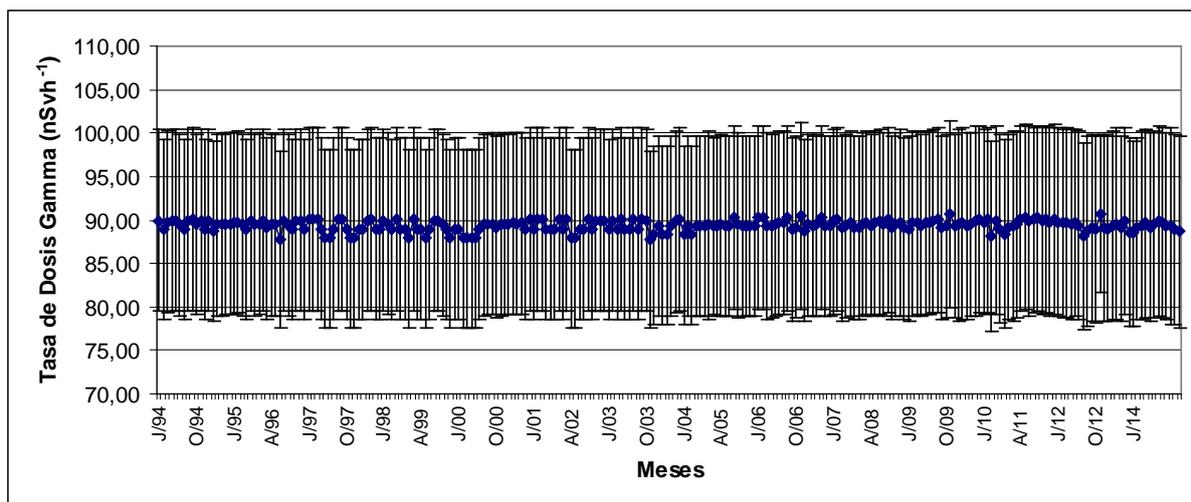


Figure 1. Tasa de dosis gamma equivalente ambiental

3.2. El patrón fundamental en el comportamiento anual de Be-7, K-40, Cs-137 y Pb-210 en la atmósfera

3.2.1. Análisis de las correlaciones

Se determinaron los promedios mensuales para todas las variables y se conformó una matriz meses-variables para realizar el análisis estadístico multivariante, según se muestra en la tabla 1.

Tabla1. Matriz meses-variables para el análisis estadístico multivariante

Meses	$A_C(^7\text{Be})$	$A_C(^{40}\text{K})$	$A_C(^{137}\text{Cs})$	$A_C(^{210}\text{Pb})$	$A_F(^7\text{Be})$	$A_F(^{40}\text{K})$	$A_F(^{137}\text{Cs})$	$A_F(^{210}\text{Pb})$	Δ_A	Φ_A	H
E	5,85E-03	8,0E-06	7,8E-07	2,99E-04	8,77	0,700	1,24E-02	2,30	42	0,83	36
F	5,96E-03	1,03E-05	7,5E-07	2,57E-04	10,75	0,830	1,12E-02	2,76	39	0,92	35,9
M	7,16E-03	1,36E-05	8,8E-07	3,19E-04	10,20	0,650	1,31E-02	2,36	47	0,88	43
A	6,00E-03	1,26E-05	8,7E-07	2,97E-04	19,44	0,57	1,44E-02	2,61	44	1,03	63
M	5,77E-03	1,09E-05	7,1E-07	3,02E-04	29,16	0,870	1,74E-02	3,74	39	1,03	94
J	3,63E-03	1,22E-05	6,0E-07	2,35E-04	59,9	1,21	1,98E-02	4,61	35	1,25	114
J	3,01E-03	1,30E-05	6,1E-07	2,18E-04	87,4	1,52	1,82E-02	4,06	34	1,51	119
A	2,73E-03	1,15E-05	4,44E-07	2,18E-04	80,9	1,110	1,84E-02	4,31	30	1,846	129
S	3,06E-03	8,5E-06	3,02E-07	1,290E-04	76,6	1,00	1,95E-02	4,07	31	1,95	159
O	3,26E-03	7,4E-06	2,59E-07	1,070E-04	63,90	1,16	1,60E-02	5,34	30	1,75	151
N	3,640E-03	7,9E-06	3,7E-07	9,45E-05	7,18	0,600	1,31E-02	1,000	29	0,70	61,7
D	3,360E-03	7,8E-06	3,4E-07	6,36E-05	7,18	0,710	1,22E-02	1,790	30	0,77	37,3

El análisis de las correlaciones demostró que la cantidad de lluvia se correlaciona positivamente con el flujo de actividad de todos los radionúclidos y con el flujo de aerosoles y negativamente con la concentración de actividad de todos los radionúclidos y con la concentración de aerosoles; lo cual se muestra en la tabla 2 en forma de matriz de las correlaciones.

Tabla 2. Matriz de las correlaciones

	A _C (⁷ Be)	A _C (⁴⁰ K)	A _C (¹³⁷ Cs)	A _C (²¹⁰ Pb)	A _F (⁷ Be)	A _F (⁴⁰ K)	A _F (¹³⁷ Cs)	A _F (²¹⁰ Pb)	Δ _A	Φ _A	H
A _C (⁷ Be)	1	0,3383 0,2821	0,8298 0,0008	0,7651 0,0037	-0,6956 0,0120	0,6231 0,0304	-0,5605 0,0580	-0,4119 0,1834	0,9265 0,0000	-0,6202 0,0315	-0,6777 0,0154
A _C (⁴⁰ K)	0,3383 0,2821	1	0,7555 0,0045	0,6887 0,0133	0,1917 0,5506	0,2163 0,4996	0,2691 0,3977	0,1691 0,5993	0,5635 0,0564	0,0238 0,9414	-0,0245 0,9398
A _C (¹³⁷ Cs)	0,8298 0,0008	0,7555 0,0045	1	0,9440 0,0000	-0,3393 0,2806	-0,2600 0,4145	-0,1997 0,5337	-0,1669 0,6041	0,9195 0,0000	-0,4058 0,1906	-0,4775 0,1164
A _C (²¹⁰ Pb)	0,7651 0,0037	0,6887 0,0133	0,9440 0,0000	1	-0,1778 0,5803	0,1312 0,6845	-0,0461 0,8868	0,0208 0,9488	0,8767 0,0002	-0,2242 0,4837	-0,3049 0,3352
A _F (⁷ Be)	-0,6956 0,0120	0,1917 0,5506	-0,3393 0,2806	-0,1778 0,5803	1	0,8879 0,0001	0,8775 0,0002	0,8403 0,0006	-0,4742 0,1194	0,9279 0,0000	0,9178 0,0000
A _F (⁴⁰ K)	-0,6231 0,0304	0,2163 0,4996	-0,2600 0,4145	-0,1312 0,6845	0,8879 0,0001	1	0,7288 0,0072	0,8061 0,0015	-0,4243 0,1692	0,7124 0,0093	0,7346 0,0065
A _F (¹³⁷ Cs)	-0,5605 0,0580	0,2691 0,3977	-0,1997 0,5337	-0,0461 0,8868	0,8775 0,0002	0,7288 0,0072	1	0,7803 0,0027	-0,3512 0,2629	0,7746 0,0031	0,8800 0,0002
A _F (²¹⁰ Pb)	-0,4119 0,1834	0,1691 0,5993	-0,1669 0,6041	0,0208 0,9488	0,8403 0,0006	0,8061 0,0015	0,7803 0,0027	1	-0,2628 0,4093	0,8350 0,0007	0,8481 0,0005
Δ _A	0,9265 0,0000	0,5635 0,0564	0,9195 0,0000	0,8767 0,0002	-0,4742 0,1194	-0,4243 0,1692	-0,3512 0,2629	-0,2628 0,4093	1	-0,4624 0,1302	-0,5444 0,0673
Φ _A	-0,6202 0,0315	0,0238 0,9414	-0,4058 0,1906	-0,2242 0,4837	0,9279 0,0000	0,7124 0,0093	0,7746 0,0031	0,8350 0,0007	-0,4624 0,1302	1	0,9303 0,0000
H	-0,6777^a 0,0154^b	-0,0245 0,9398	-0,4775 0,1164	-0,3049 0,3352	0,9178 0,0000	0,7346 0,0065	0,8800 0,0002	0,8481 0,0005	-0,5444 0,0673	0,9303 0,0000	1

^a: Valor de la correlación estimada entre el par de variables.

^b: Valor que comprueba la importancia estadística de las correlaciones estimadas. Aquellos valores menores que 0,05 indican importancia estadística de las correlaciones para un nivel de confianza del 95 %.

3.2.2. Análisis de factores

El análisis de factores mostró que existían dos factores que explican el 89% de la variabilidad en los datos originales. El primero explicó el 59% de la varianza y estuvo fuertemente relacionado con el flujo de actividad de todos los radionúclidos, el flujo de aerosoles y la cantidad de lluvia, por eso fue identificado como Precipitación (F1). El segundo explicó el 30% de la varianza y estuvo fuertemente relacionado con la concentración de actividad de todos los radionúclidos y con la concentración de aerosoles, por eso fue identificado como Concentración (F2).

Las ecuaciones de los factores en función de las variables originales puede escribirse de la siguiente forma:

$$F1 = -0,58A_C(^7Be) + 0,98A_F(^7Be) - 0,36\Delta_A - 0,21A_C(^{137}Cs) + 0,92A_F(^{137}Cs) + 0,90\Phi_A + 0,92H + 0,29A_C(^{40}K) + 0,88A_F(^{40}K) - 0,04A_C(^{210}Pb) + 0,91A_F(^{210}Pb) \quad (7)$$

$$F2 = 0,75A_C(^7Be) - 0,14A_F(^7Be) + 0,90\Delta_A + 0,97A_C(^{137}Cs) - 0,01A_F(^{137}Cs) - 0,21\Phi_A - 0,28H + 0,82A_C(^{40}K) - 0,09A_F(^{40}K) + 0,96A_C(^{210}Pb) + 0,04A_F(^{210}Pb) \quad (8)$$

3.2.3. Análisis de grupos

El análisis de grupos mostró que existían tres grupos, según se presenta en la tabla 3. El primero estuvo integrado por los meses desde enero hasta mayo; este se caracterizó por los mayores valores en la concentración de actividad y en la concentración de aerosoles. El segundo estuvo integrado por los meses desde junio hasta octubre; se caracterizó por los mayores valores en el flujo de actividad, flujo de aerosoles y cantidad de lluvia. El tercero estuvo integrado por los meses noviembre y diciembre; se caracterizó por los valores más bajos en casi todas las variables. Por eso, en este período, ni la concentración ni la precipitación fueron específicamente favorables.

Tabla 3. Principales características de los grupos (G: Grupo, M: Meses)

G	M	$A_c(^7\text{Be})$	$A_c(^{40}\text{K})$	$A_c(^{137}\text{Cs})$	$A_c(^{210}\text{Pb})$	$A_F(^7\text{Be})$	$A_F(^{40}\text{K})$	$A_F(^{137}\text{Cs})$	$A_F(^{210}\text{Pb})$	Δ_A	Φ_A	H
1	1,2,3,4,5	6,2E-3	1,1E-5	7,9E-7	3,0E-4	16	0,72	1,4E-2	2,8	42	0,94	55
2	6,7,8,9,10	3,1E-3	1,0E-5	4,8E-7	1,8E-4	74	1,2	1,8E-2	4,8	32	1,7	135
3	11,12	3,5E-3	7,9E-6	3,4E-7	7,9E-5	7,2	0,66	1,3E-2	1,4	30	0,74	50

3.2.4. Representación de los grupos en el plano de los factores

Lo explicado anteriormente puede verse claramente en la figura 2, donde los tres grupos bien diferenciados se representan en el plano de los factores.

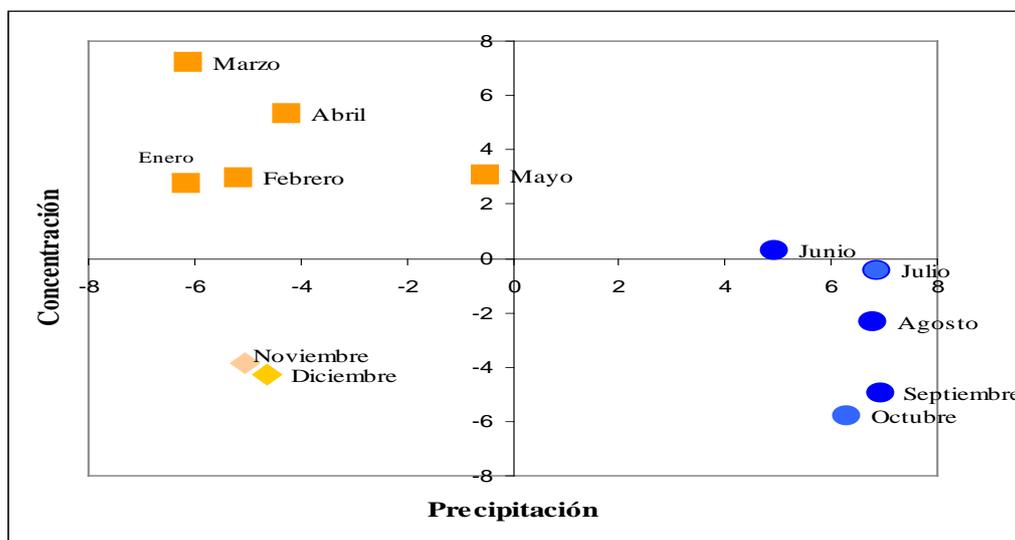


Figura 2. Representación de los grupos en el plano de los factores

Los meses correspondientes al primer grupo tienen fuertes componentes positivas en el eje de Concentración, los meses correspondientes al segundo grupo tienen fuertes componentes positivas en el eje de Precipitación y los meses correspondientes al tercer grupo no poseen componentes positivas en ninguno de los dos ejes.

3.2.5. Identificación del patrón fundamental en el comportamiento anual de las variables radiológicas

Hasta aquí se han acumulado los conocimientos fundamentales para establecer que la combinación del proceso de concentración en el período desde enero hasta mayo con el proceso de precipitación en el período desde junio hasta octubre, seguido de un período de tránsito en los meses noviembre y diciembre, determina el comportamiento anual de las variables radiológicas en la vía aérea.

En efecto, la concentración de actividad es mayor en el período enero-mayo, pues la concentración de aerosoles portadores de radionúclidos es mayor, debido a que la cantidad de lluvia y por consiguiente el flujo de aerosoles hacia la superficie terrestre poseen valores relativamente bajos, por lo que predomina el proceso de concentración, por el contrario, el flujo de actividad es menor.

El flujo de actividad es mayor en el período junio-octubre, pues el flujo de aerosoles hacia la superficie terrestre es mayor debido a que la cantidad de lluvia es mayor y predomina el proceso de precipitación, por el contrario, la concentración de actividad es menor.

En los meses noviembre y diciembre, en los cuales no son favorables los procesos de concentración y precipitación, tanto la concentración de actividad como el flujo de actividad toman valores mínimos.

Las figuras desde la 3 hasta la 11 ilustran a modo comparativo lo dicho anteriormente para las variables radiológicas concentración de actividad y flujo de actividad.

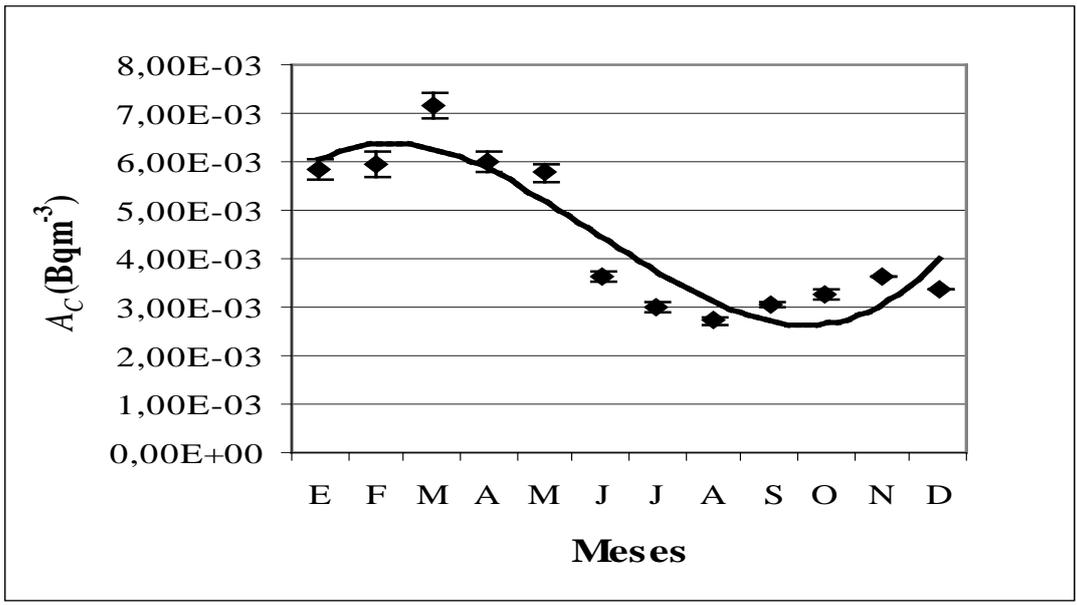


Figura 3. Concentración de actividad de Be-7

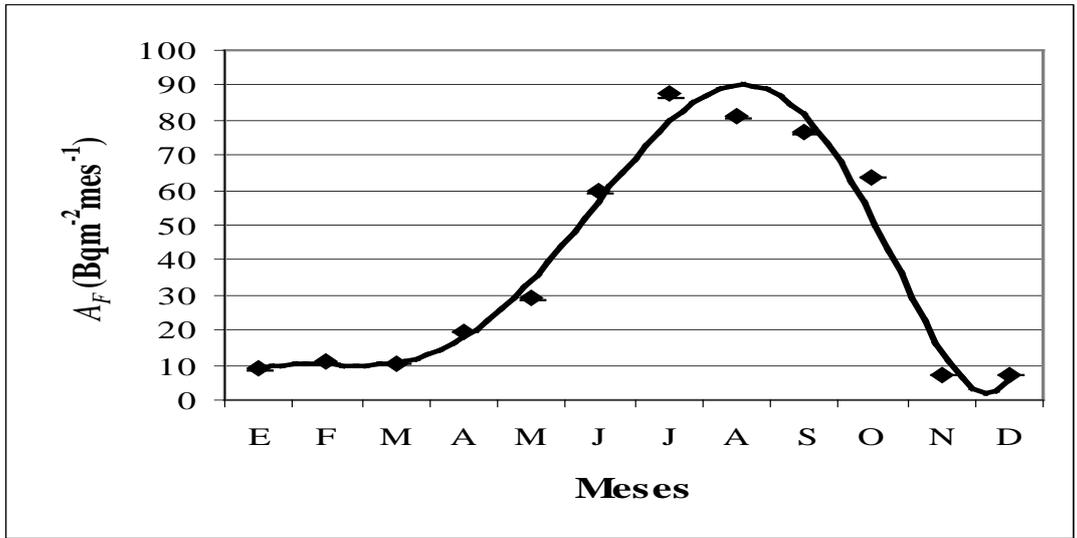


Figura 4. Flujo de actividad de Be-7

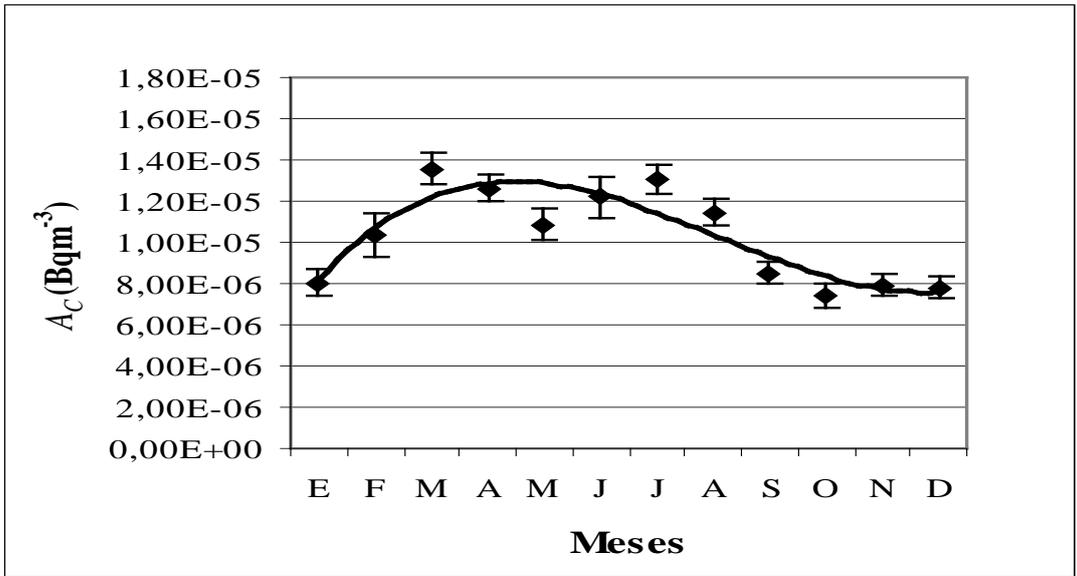


Figura 5. Concentración de actividad de K-40

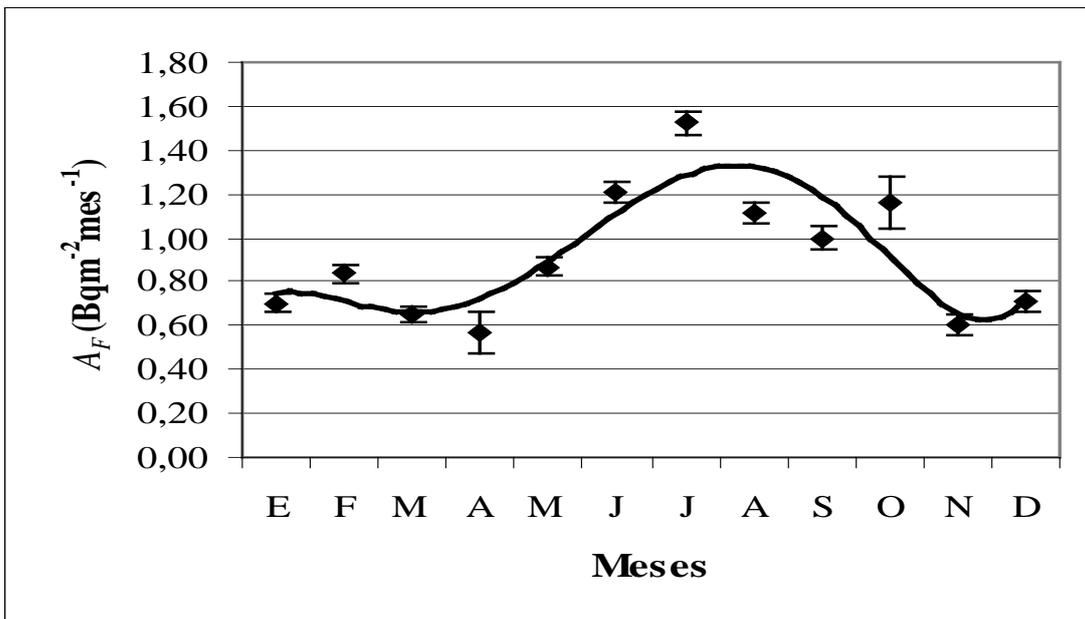


Figura 6. Flujo de actividad de K-40

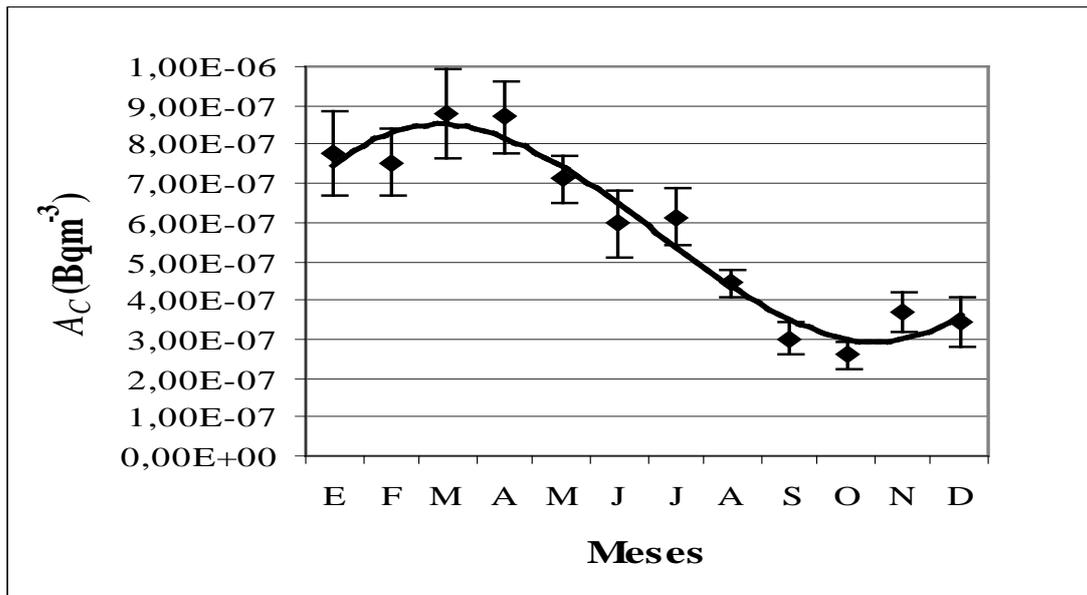


Figura 7. Concentración de actividad de Cs-137

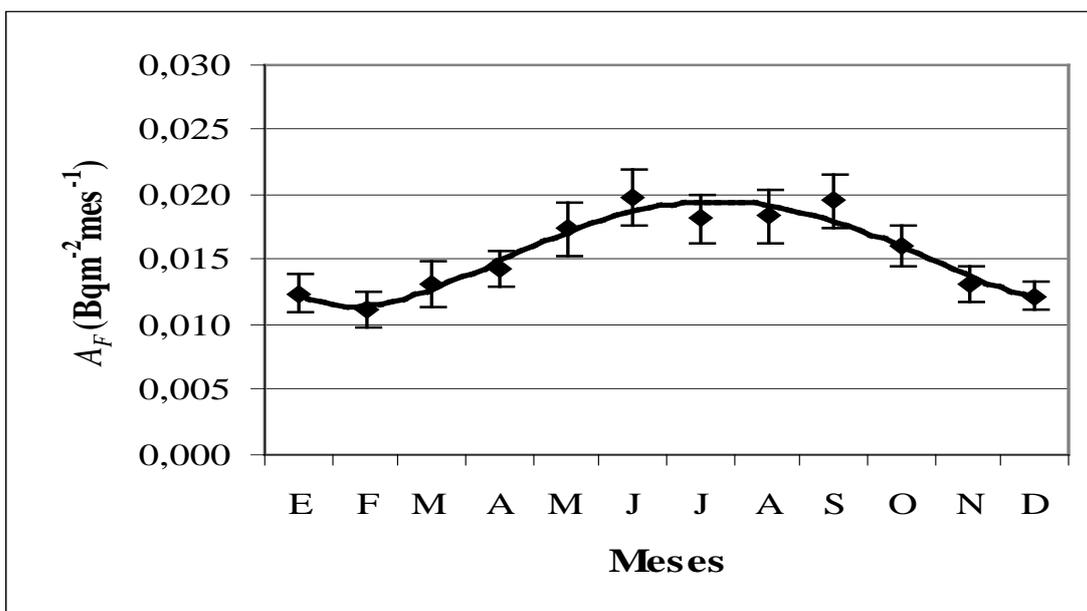


Figura 8. Flujo de actividad de Cs-137

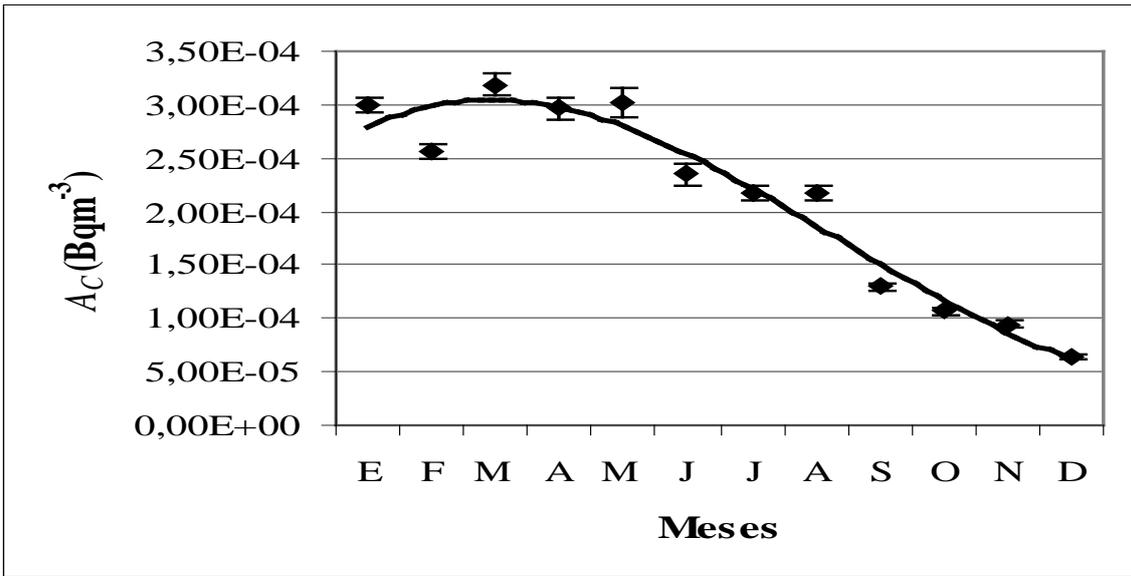


Figura 9. Concentración de actividad de Pb-210

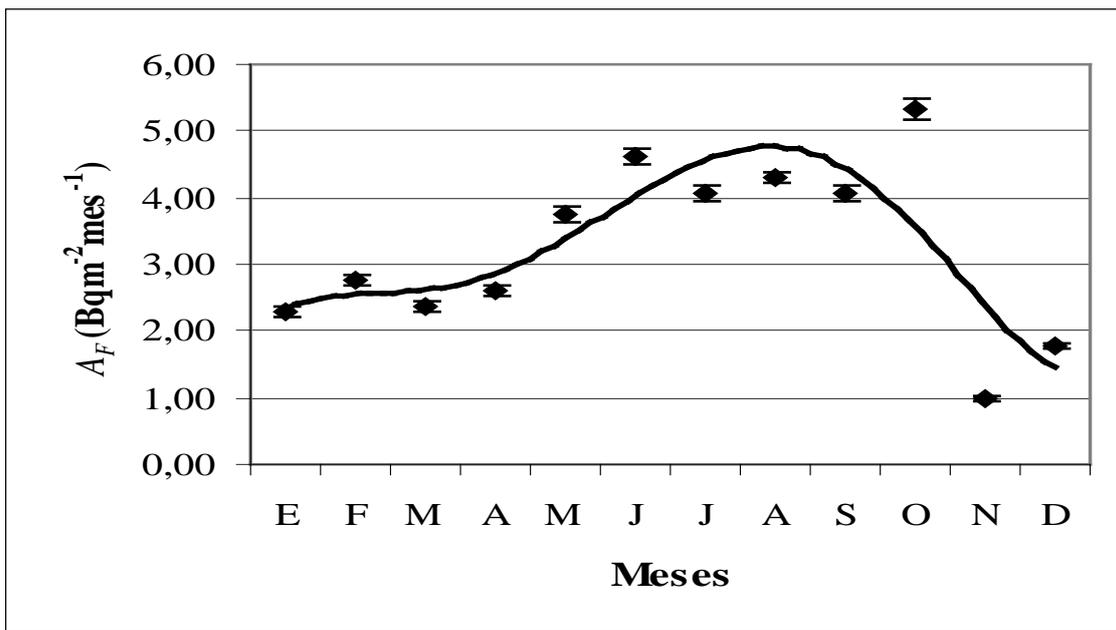


Figura 10. Flujo de actividad de Pb-210

3.2.6. Tendencia fundamental del Cs-137 procedente de la precipitación atmosférica global

La tendencia general decreciente del Cs-137 procedente de la precipitación atmosférica global puede observarse en la figura 11, donde se muestra el comportamiento del promedio anual del flujo de actividad de Cs-137.

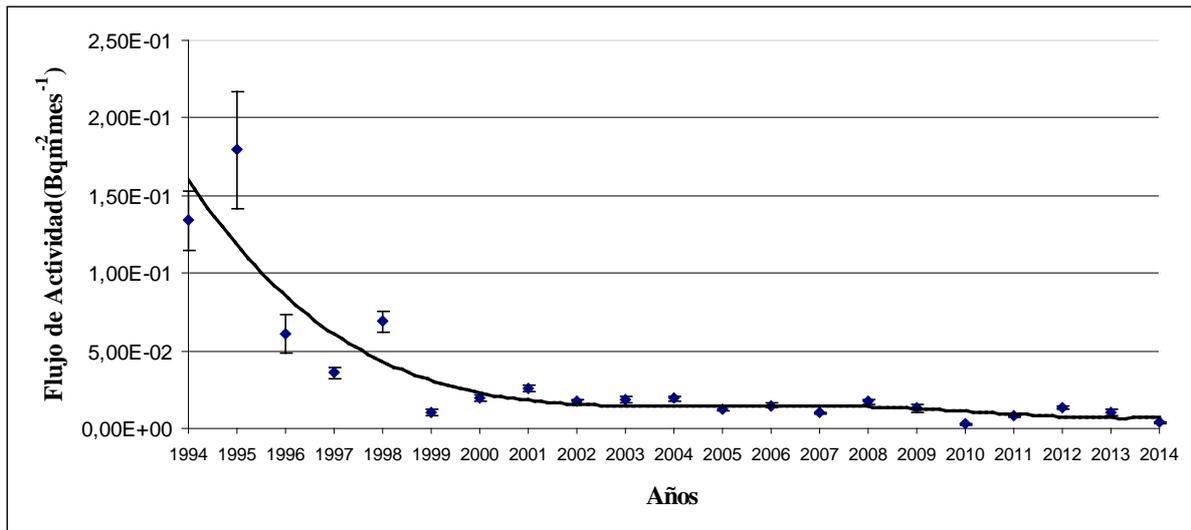


Figura 11. Flujo de actividad de Cs-137 procedente de la precipitación atmosférica global

La prohibición de las pruebas nucleares estratosféricas años atrás, el proceso de precipitación atmosférica permanente, el cual contribuye a la limpieza de la atmósfera y la desintegración radiactiva de este radionúclido, podrían ser las causas de su disminución.

3.2.7. El comportamiento del I-131 procedente del accidente de Fukushima en Japón

El I-131 procedente del accidente de Fukushima en Japón se detectó en los aerosoles y el agua de lluvia desde el 30 de marzo hasta el 15 de abril de 2011. El espectro de la muestra de aerosoles correspondiente a la detección inicial se muestra en la figura 12. Su comportamiento decreciente rápido puede observarse en la figura 13. El I-131 estuvo presente en la atmósfera durante tres semanas, a partir de la cuarta semana los valores no superaron el límite de detección. La poca lluvia caída durante esas semanas y su período de semidesintegración relativamente corto de 8 días contribuyeron a su rápida disminución de su presencia en el aire.

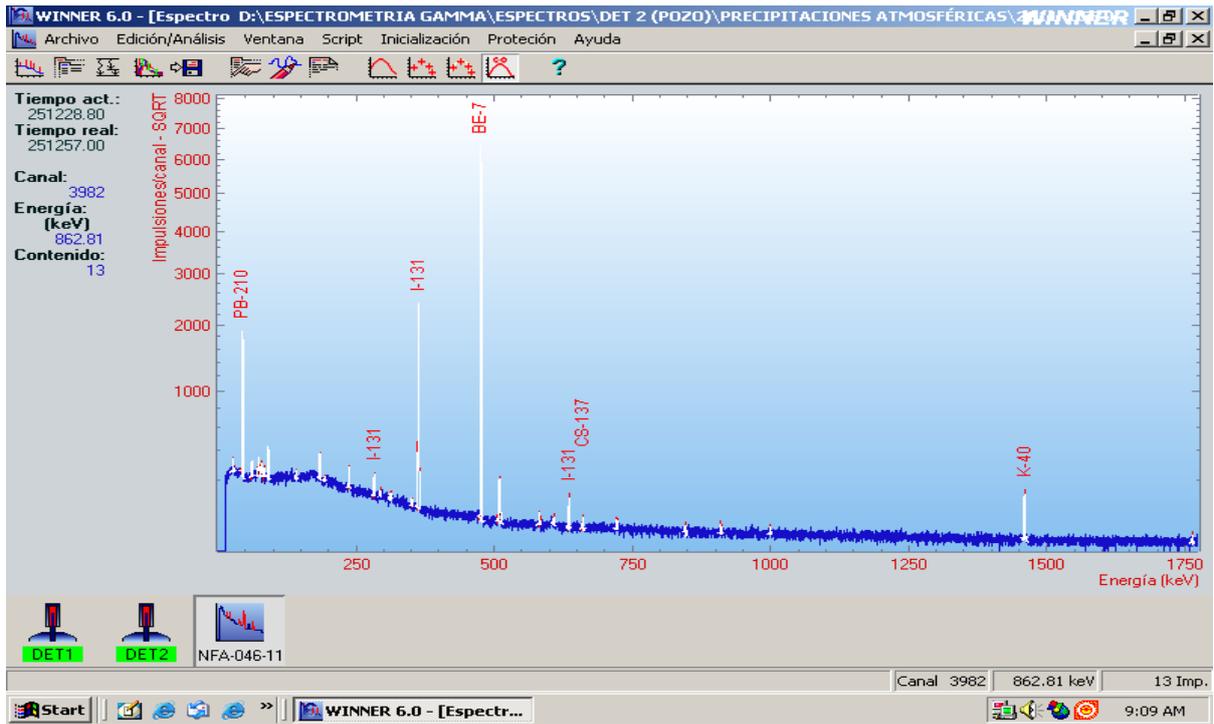


Figura 12. Detección inicial del I-131

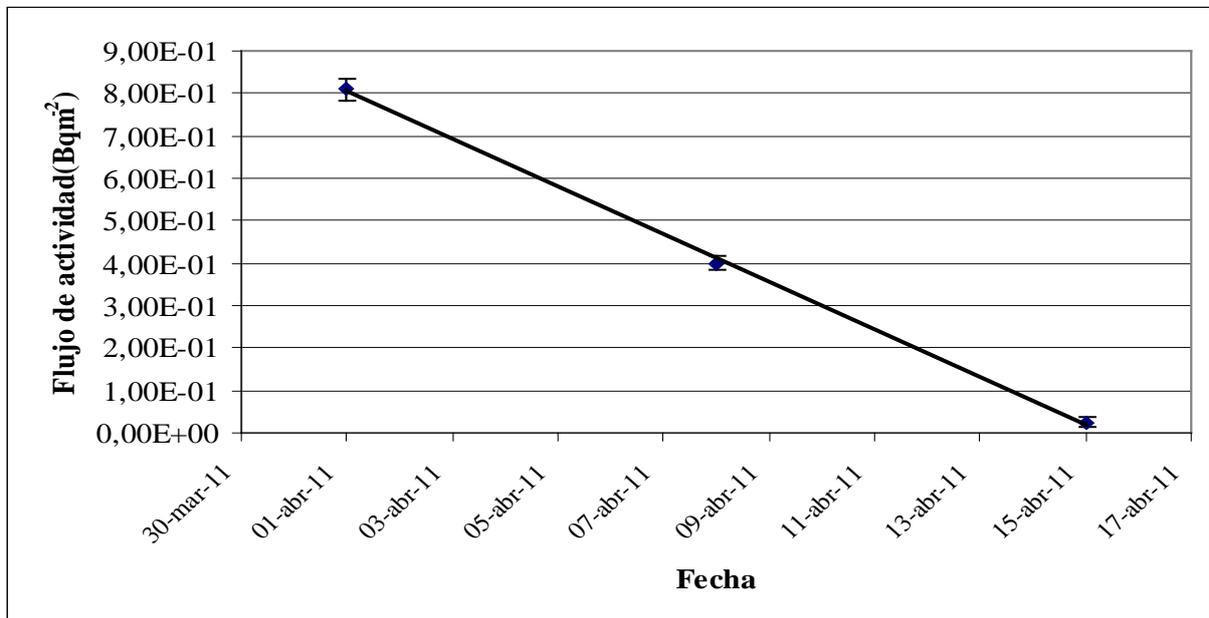


Figure 13. Comportamiento decreciente del flujo de actividad de I-131

4. CONCLUSIONES

La tasa de dosis gamma equivalente ambiental, medida en el Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, mostró una tendencia constante. No se detectaron valores anormales sostenidos, indicadores de contaminación radiactiva. Todos los valores son propios de una zona con fondo radiactivo normal.

La combinación alternada de los procesos de concentración y precipitación durante el año, principalmente gobernada por el régimen local de lluvias, determinó el patrón fundamental en el comportamiento anual de los radionúclidos presentes en la atmósfera, de tal manera que, la concentración de actividad toma los valores más altos en el período Enero-Mayo, en el cual la lluvia y el flujo de aerosoles alcanzan sus valores mínimos y prevalece el proceso de concentración; contrariamente, el flujo de actividad toma sus valores más bajos. El flujo de actividad toma los valores más altos en el período Junio-Octubre, en el cual la lluvia y el flujo de aerosoles alcanzan los valores más altos y prevalece el proceso de precipitación; contrariamente, la concentración de actividad toma sus valores más bajos. El período noviembre-diciembre puede ser visto como un tránsito entre los períodos de mayor precipitación y mayor concentración.

El Cs-137 procedente de la precipitación atmosférica global mostró una tendencia decreciente durante el período. La parada de las pruebas nucleares atmosféricas años atrás, el proceso de precipitación atmosférica permanente y la desintegración radiactiva de este radionúclido, podrían ser las causas de su disminución.

El I-131 procedente del accidente de Fukushima en Japón estuvo presente en la atmósfera durante tres semanas. La poca lluvia caída durante esas semanas y su período de semidesintegración relativamente corto de 8 días contribuyeron a su rápida disminución de su presencia en el aire.

5. REFERENCIAS

1. International Atomic Energy Agency, "Measurements of Radionuclides in Food and the Environment. A Guidebook", *Technical Reports Series*, **295**, Vienna, 1989.
2. Debertin, K., Helmer, R., "Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors" *Elsevier*, North-Holland, Amsterdam, 1988.
3. TOMCOM SOFTWARE INC, "Winner 6.00.2048", 5EVID-P9NNZ, Copyright© 1998-2006.
4. International Organization for Standardization, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", Geneva, 1993.
5. Sharma S., "Applied Multivariate Techniques", John Wiley & Sons, Canada, 1996.
6. Microsoft Corporation, "Microsoft® Office EXCEL", 11.5612.5606, Copyright© 1985-2003.

7. Statistical Graphics Corp., "Statgraphics Plus 5.1", 55672111033301, Copyright© 1994-2000.
8. UNSCEAR, "La Radiación Ionizante: Fuentes y Efectos Biológicos", Informe a la Asamblea General y Anexos, 1982.