

## MONITOREO DE RADIATIVIDAD AMBIENTAL A GRAN ALTURA

Juan Carlos Terrazas<sup>1</sup>, Alfonso Velarde Chávez<sup>2</sup>, Oscar Saavedra San Martín<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Departamento de Física  
Universidad Mayor de San Simón  
Cochabamba, Bolivia*

<sup>2</sup>*Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
La Paz, Bolivia*

<sup>3</sup>*Istituto di Fisica Generale  
Università di Torino  
Torino, Italia*

### RESUMEN

Durante el verano de 2003 (febrero-marzo) en el Laboratorio de Física Cósmica del monte Chacaltaya (5200 m.s.n.m), La Paz – Bolivia, se realizó el monitoreo de la radiactividad ambiental atmosférica y su relación con las variables meteorológicas: precipitación pluvial y viento. Se logró establecer una relación funcional de la radiactividad atmosférica respecto a la precipitación pluvial de la forma:

$$y = A - Be^{-Cx}$$

Se observa también la variación diurna de la radiactividad atmosférica coincidente con la variación diurna de la velocidad del viento.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los elementos radiactivos naturales se encuentran distribuidos en forma bastante uniforme en las rocas y suelos de la corteza terrestre, la que está constituida principalmente por basalto y granito. La mayor parte de esta radiactividad proviene de las series radiactivas naturales, siendo la más importante la serie de Uranio  $4n+2$ ; en la que los isótopos del Radón, que son gaseosos, se difunden en la atmósfera en forma de aerosoles.

El Uranio es mucho más abundante en la naturaleza que otros elementos comunes; se encuentra en una proporción 40 veces mayor que la Plata y 800 veces mayor que el Oro. En la corteza terrestre, los granitos contienen una concentración de Uranio que varía de 2 a 6 partes por millón aproximadamente y una concentración de Torio de tres a cinco veces mayor. Existen regiones que, por distintas causas geológicas y geoquímicas, constituyen yacimientos de minerales radiactivos en los que las concentraciones de los elementos radiactivos Uranio y Torio, son extraordinariamente altas.

Los elementos radiactivos que se encuentran en la atmósfera se originan en la corteza terrestre y en el espacio exterior. Aquellos que provienen de la corteza terrestre son básicamente los isótopos del Radón.

Además del Radón que emana continuamente de la superficie terrestre, existen fenómenos como las erupciones volcánicas que pueden inyectar en la atmósfera grandes cantidades de gases radiactivos, provenientes del magma. Los gases se incorporan a la atmósfera y se dispersan en mayor o menor grado dependiendo de las condiciones meteorológicas imperantes. Al difundirse en el

aire el material radiactivo se fisiona y origina una serie de descendientes, en muchas ocasiones también radiactivos, que se fijan en partículas suspendidas en la atmósfera.

El gas Radón es producto del decaimiento del Radio; se mantiene en suspensión en la atmósfera, decae naturalmente dando origen a una serie de otros elementos radiactivos. Los rayos gamma provenientes del decaimiento  $\beta^-$  del  ${}_{83}^{214}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{214}\text{Po}$ , son los más importantes para ser detectados con técnicas de espectrometría gamma usando, por ejemplo, un monocristal de NaI.

El gas Radón decae en la cadena de isótopos:  ${}^{214}\text{Pb}$ ,  ${}^{214}\text{Bi}$ ,  ${}^{208}\text{Tl}$ . [Refs. (3), (4)]

El presente estudio centra su atención en la variación de la *emisión radiactiva de los hijos del Radón en eventos de precipitaciones pluviales: lluvias y nevadas*.

Diversos estudios realizados con anterioridad en otros lugares nos proporcionan datos sobre la correlación radiactividad - precipitación pluvial. [Ref.(5) a (11)].

Lo particular del presente estudio es la altura a la que se realiza: 5200m.s.n.m., convirtiéndolo en el sondeo ejecutado a mayor altura en el planeta. En el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya se hicieron también medidas de radioactividad ambiental en los años 1957-1962 pero la técnica era pasiva y no por medios espectrométricos (Ref. Resumen de Labores 1957-1961, Lab. de Chacaltaya)

Para esta investigación se ha usado un monocristal de NaI y, al mismo tiempo, se instaló una estación meteorológica portátil cerca del detector, para poder establecer la correlación entre los datos de la estación y del detector de NaI.

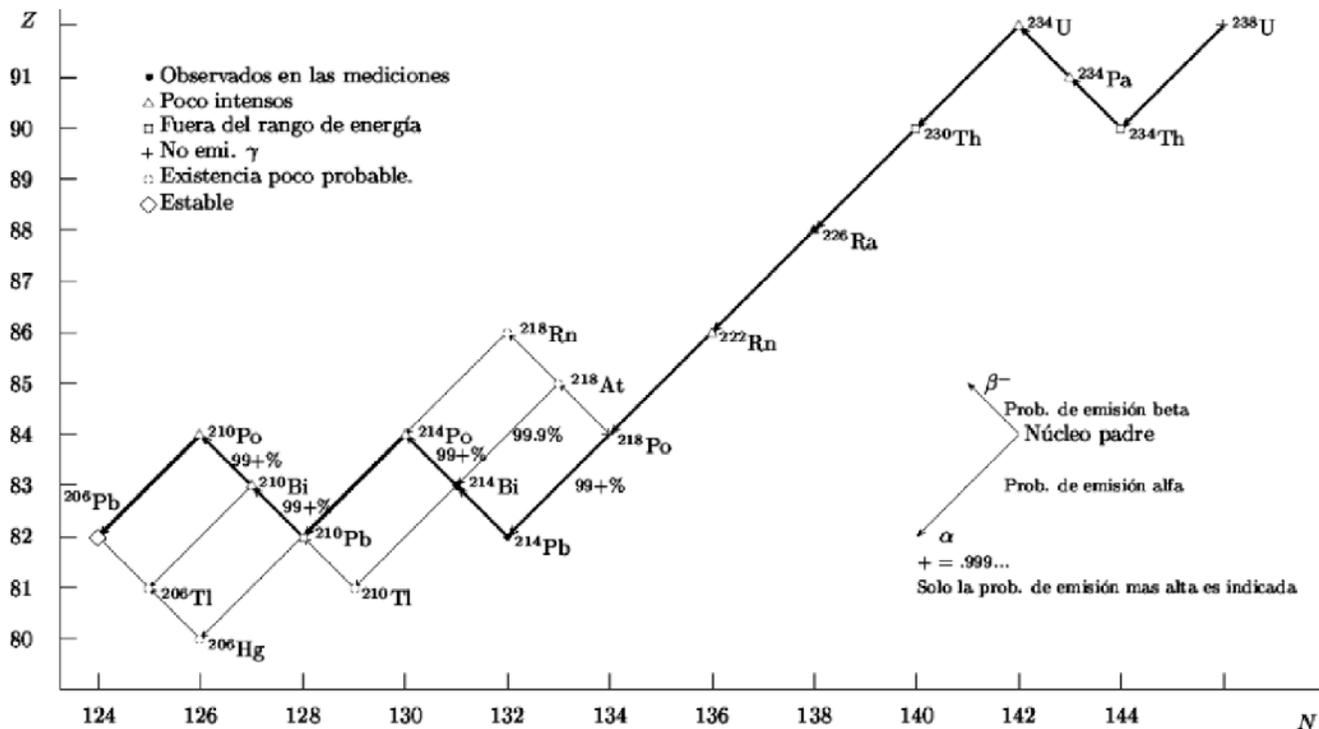


Figura 1. Serie radiactiva de Uranio 4n+2.

2. SERIE RADIATIVA NATURAL

Existen tres largas cadenas o series radiactivas que se extienden a lo largo de la última parte del Sistema Periódico y que se denominan, respectivamente, del Uranio, del Actinio y del Torio, según el elemento que se encuentre a su cabeza. En la serie del uranio el número de masa de cada componente puede expresarse en la forma  $4n + 2$ , donde  $n$  es un entero. En las del Actinio y el Torio el número de masa viene dado por las expresiones  $4n + 3$  y  $4n$ , respectivamente. [Ref. (1)]

En la Fig 1, se muestra la serie radiactiva del Uranio.

3. DECAIMIENTO DEL  $^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{214}_{84}\text{Po}$

Por sucesivas emisiones alfa, el Radio decae hasta el  $^{214}\text{Pb}$ . Éste, por emisión de  $\beta^-$ , decae en  $^{214}\text{Bi}$  que, a su vez, decae, también por emisión  $\beta^-$ , en  $^{214}\text{Po}$ .

Los niveles de energía de este decaimiento son: 609, 768, 934, 1051, 1120, 1764, 2118, 2204, KeV. [Ref. (1)]

4. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO

Se utiliza un detector con un monocristal de NaI(Tl) de 20 cm de diámetro y 10 cm de espesor. El detector (monocristal más fotomultiplicador) se colocó dentro de un contenedor de aislamiento térmico de forma piramidal (Fig. 2), debido a que el NaI(Tl) es sensible a las variaciones de temperatura.

El detector estuvo a la intemperie, sobre el techo. Las temperaturas típicas diarias en Chacaltaya para esta época del año (feb.-mar.) que corresponde al verano, varían entre  $-1^\circ\text{C}$  y  $3^\circ\text{C}$ , es decir, son bastante estables. Sin embargo, pese al aislamiento térmico del detector se

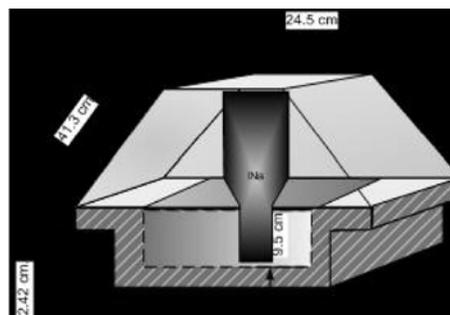


Figura 2. Blindaje térmico utilizado para el NaI(Tl).



Figura 3. Estación Meteorológica.

observaron variaciones en la posición de los picos del espectro de radiactividad ambiental debidos a variaciones de la temperatura. Se utilizaron los picos del  $^{40}\text{K}$  (1461 KeV) y  $^{208}\text{Tl}$  (2614 KeV) para recalibrar los espectros.

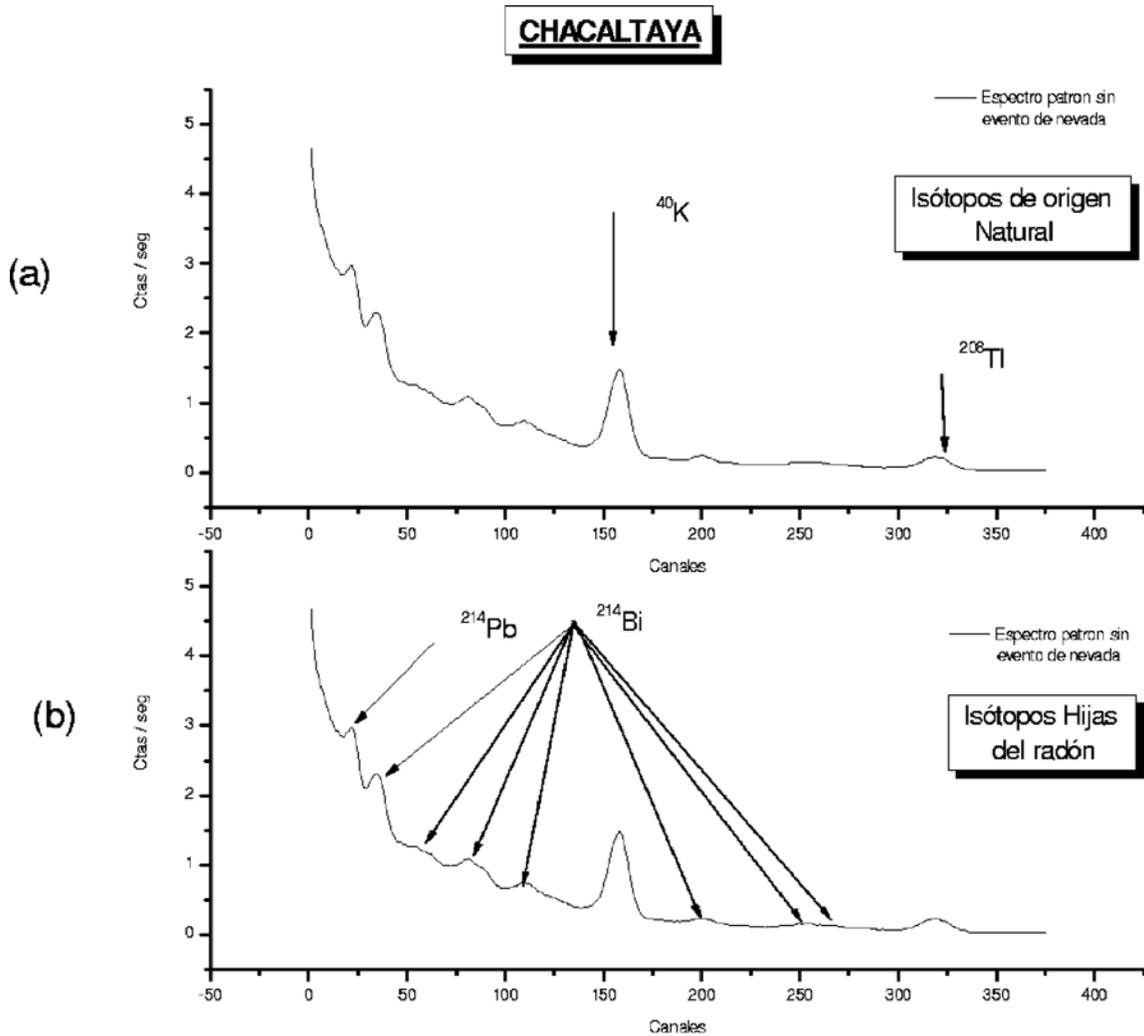


Figura 4. (a) Isótopos  $^{40}\text{K}$  y  $^{208}\text{Tl}$ ; (b) Isótopos hijos del Radón.

La señal del PM es enviada a un Analizador Multicanal (AMC) mediante un amplificador inversor lineal. El AMC recibe señales unipolares positivas, tiene una amplitud variable de 20mV a 8V distribuidos linealmente en 4.096 canales. Todos los espectros se normalizaron al segundo dividiendo por el tiempo vivo de recolección en el AMC.

También se utilizó una estación meteorológica que incluye recolector de lluvia, sensores de temperatura y humedad, anemómetro, sensor de radiación solar y UV. (Ref. Davis Instruments, www.davisnet.com) con consola "Vantage Pro" capaz de almacenar toda la información meteorológica de los sensores (series temporales) y recuperarlos en la computadora mediante el programa "WEATHERLINK".

La distancia entre el detector y la estación meteorológica fue de 20m.

Se registraron datos de las variables climáticas cada minuto.

## 5. ESPECTRO PATRÓN

La campaña de monitoreo se realizó durante los meses de febrero y marzo de 2003 en el laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya (5200 m.s.n.m.)

En la Fig.4 se muestra el espectro patrón determinado para Chacaltaya, normalizado al segundo.

En la Fig. 4(a) se puede apreciar de manera muy clara la presencia de los isótopos  $^{40}\text{K}$  (1461 KeV) y  $^{208}\text{Tl}$ . (2615 KeV)

En la Fig.4(b) se muestran los picos correspondientes al decaimiento del  $^{222}\text{Rn}$ , se identifica un decaimiento del Plomo  $^{214}\text{Pb}$  con una energía de 480 KeV y varios del Bismuto  $^{214}\text{Bi}$  con energías de 609,768, 934, 1120, 1764 y 2118 KeV.

## 6. EFECTOS DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL SOBRE LA RADIATIVIDAD AMBIENTAL

A continuación mostramos los eventos de lluvia o nevada registrados durante los meses de febrero y marzo de 2003.

Las Figs. 5(a) y (b) muestran el incremento de la radiactividad atmosférica en correlación a la lluvia y ta-

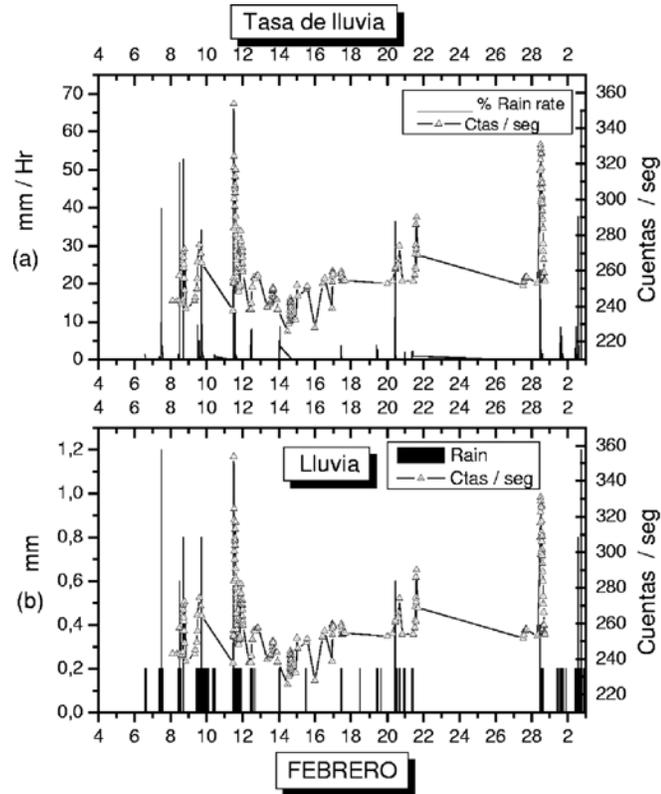


Figura 5. Radiactividad ambiental correlacionada con (a) tasa de lluvia, (b) lluvia.

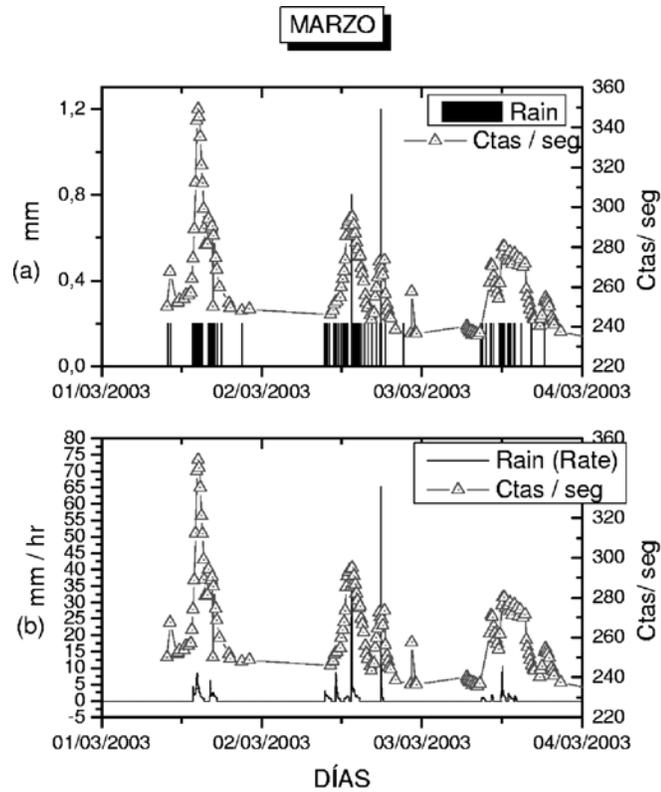


Figura 6. Radiactividad ambiental correlacionada con (a) lluvia, (b) tasa de lluvia.

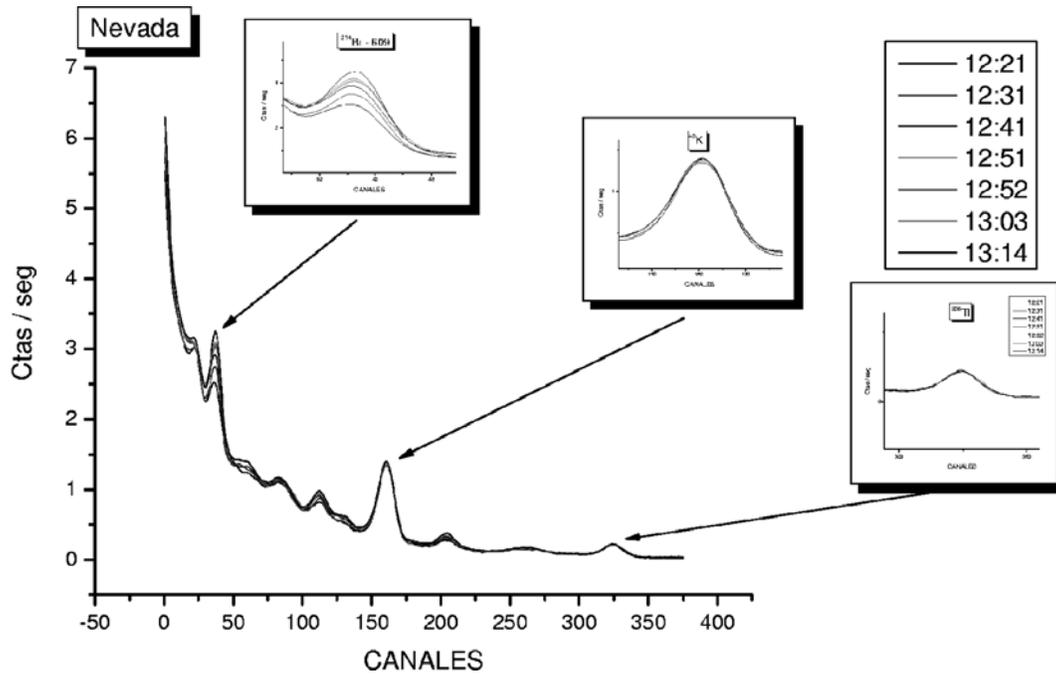


Figura 7. Durante una nevada fotopicos naturales de  $^{40}\text{K}$  y  $^{208}\text{Tl}$  e incremento de  $^{214}\text{Bi}$ —(609.)

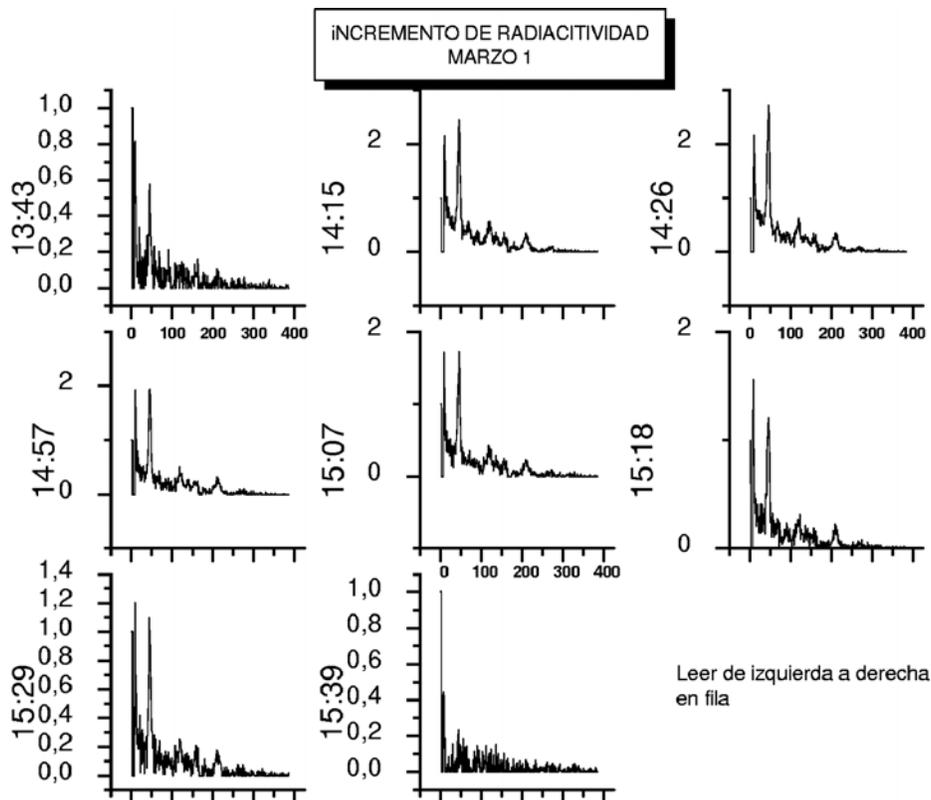


Figura 8. Variaciones de la radiactividad a lo largo de la precipitación pluvial.

sa de lluvia respectivamente. Es evidente que durante la lluvia la radiactividad atmosférica se incrementa. Lo mismo se observa durante los episodios de lluvia del mes de marzo (Figs. 6(a) y (b)).

En la Fig.7, se verifica que durante la lluvia o ne-

vada, se incrementa la radiactividad correspondiente al decaimiento del  $^{214}\text{Bi}$  en tanto que, para los picos correspondientes al  $^{40}\text{K}$  y  $^{208}\text{Tl}$ , no se observa incremento.

La duración de la precipitación pluvial que se muestra (1 de marzo 2003) fue de 2 horas 10 minutos.

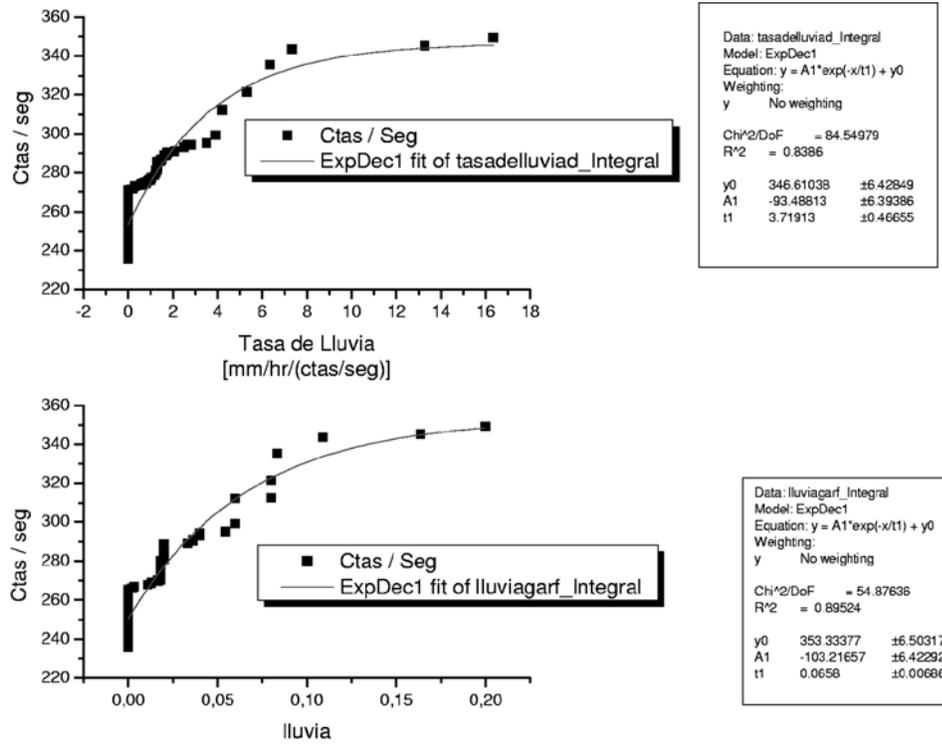


Figura 9. Radiactividad ambiental correlacionada con la tasa de lluvia y lluvia.

### 6.1. ACTIVIDAD DEL ISÓTOPO <sup>214</sup>Bi Y DEL <sup>222</sup>Rn

Se encontró que la actividad del <sup>214</sup>Bi en Chacaltaya es (ver apéndice II):

$$A_{Bi-214} = (0,75 \pm 0,03) \mu C i / l$$

que representa el 99 % de la actividad del <sup>222</sup>Rn (ver Fig.1).

Entonces, la actividad del <sup>222</sup>Rn resulta a ser:

$$A_{Rd-222} = (0,76 \pm 0,03) \mu C i / l$$

En la Fig. 8 se muestra la evolución del incremento la radiactividad ambiental, respecto del espectro patrón, para el evento de lluvia del primero de marzo.

### 6.2. CORRELACIÓN DE LA RADIATIVIDAD AMBIENTAL CON LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL

En la Fig 9 se muestran los niveles de radiactividad ambiental correlacionada con la Precipitación Pluvial y con la Tasa de lluvia.

La curva de mejor ajuste para los datos correspondientes a las variables climáticas de tasa de lluvia y lluvia es una exponencial de la forma:

$$y = A - B e^{-Cx}$$

con  $A = (347 \pm 6) cts/s$ ,  $B = (93 \pm 6) cts/s$  y  $C = (0,27 \pm 0,03) hr/mm$ , para la tasa de lluvia y  $A = (353 \pm 6) cts/s$ ,

$B = (103 \pm 6) cts/s$  y  $C = (15,2 \pm 1,6) mm^{-1}$ , para la precipitación pluvial (lluvia).

De donde, el nivel de saturación para la tasa de lluvia resulta ser  $347 \pm 6$  cts/s. y para la tasa de lluvia corresponde a  $353 \pm 6$  cts/s.

Que nos da un incremento máximo estimado de la radiactividad natural total del  $(39 \pm 9) \%$  para una tasa de lluvia mayor a 16 mm/hr o una precipitación pluvial mayor a 0,2 mm.

## 7. VARIACIÓN DIURNA

Este efecto fue publicado por primera vez por S. Cecchini [Ref. (8)]. En nuestra observación se corrobora la existencia de este efecto.

Para tener una aproximación mas detallada de cómo se comporta la radiactividad en Chacaltaya en un día normal (sin eventos de precipitaciones pluviales), tomamos los días 12 y 13 de febrero. El fenómeno de la onda diurna se observa claramente en la Fig. 10.

En esta figura también se muestra un ajuste de los datos diarios a una función gaussiana. La variación diurna muestra un máximo a las 15:40 de la tarde.

## 8. CORRELACIÓN CON EL VIENTO

Comparando los niveles de radiación con la velocidad de viento se obtiene la Fig. 11. Se puede observar que la variación diaria de la velocidad de viento coincide con la onda diurna de la radiactividad ambiental.

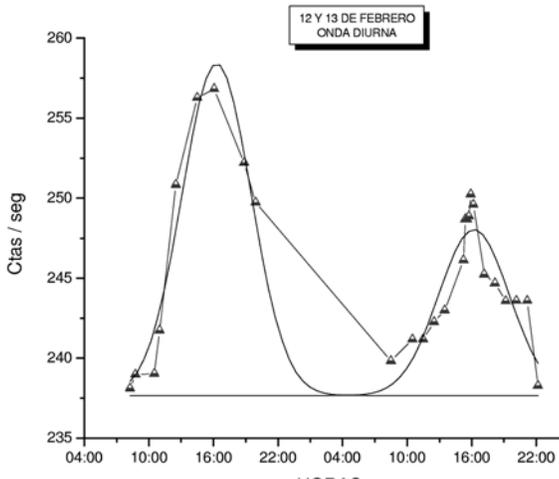


Figura 10. Onda diurna.

### 9. CONCLUSIONES

Se demostró que durante episodios de precipitación pluvial también existe un incremento en los niveles de radiactividad ambiental, esto es solo una corroboración otros experimentos realizados por el Instituto de Física Nuclear y la Universidad de Bolonia de Italia. Concluyendo que:

- Se observan los niveles de energía decaimiento para el  $^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{214}_{84}\text{Po}$  de 609,768, 934, 1120, 1764 y 2118 KeV.
- Se observa el fenómeno de onda diurna.
- Se establece una correlación entre los niveles de precipitación pluvial y los incrementos en la radiactividad ambiental.
- Se observa una coincidencia entre las variaciones diurna de la radiactividad ambiental y de la velocidad del viento.

### REFERENCIAS

- [1] ADNAN A. SHIHAB- ELDIN, LESLIE J. JARDINE, JAGDISH K. TULI, M. AUDREY B. BUYRN, (1978) *Table of Isotopes*, Lederer Michael Seventh Edition, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, United States of America.
- [2] GORDON GILMORE, JOHN D. HEMINGWAY (1995) *Practical Gamma - Ray Spectrometry*, Copyright © John Wiley & sons Ltd. New York, United States of America.
- [3] WILLIAM J. PRICE (1964) *Nuclear radiation Detection* McGraw - Hill Book Company, Second Edition, United States of America.
- [4] IRVING KAPLAN (1962) *Física Nuclear* © Aguilar, S. A. de Ediciones, Segunda Edición, Madrid España.
- [5] S. CHECCHINI, M. GALLI, A. PAGLIARIN, G.G.C PALUMBO, M. RICCIOTTI, (1998) *Environmental Radiation Monitoring Along The Course Of The Expeditions From Italy To Antarctica An Return*.

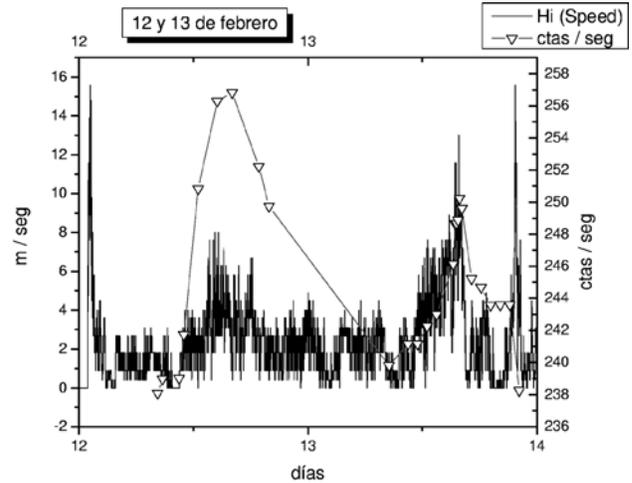


Figura 11. Radiactividad ambiental correlacionada con la velocidad de viento.

- [6] S. CHECCHINI, M. GALLI, A. PAGLIARIN, A. ARPESELLA, T. NANNI, (1998) *Environmental Radiation Monitoring At Terra Nova Bay base and Ross sea in Various Energy Bands*.
- [7] S. CHECCHINI, M. GALLI, A. PAGLIARIN, F. SAPORETTI, (1998) *The Sea - Land transition of the Environmental Radiation During the Expeditions Italy - Antarctica* -Italy Pag. 417.
- [8] S. CHECCHINI, M. GALLI, G. GFiovannini, G. Longo, A Pagliarin (2000) *Real Time monitoring of Environmental Monitoring in Tunguska (Siberia)* Bologna - Italy.
- [9] M. AGLIETT, G. MARCHETTI, C. MALAGRANAM, O. SAAVEDRA (1984) *Misure dell'attivita di  $^{222}\text{Rn}$  e delle sue Variazioni Temporali nella cavita n. 25 del Tunel del Monte Bianco* Tesis Doctoral ITALIA.
- [10] M. BRUNETTI, S. CECCHINI, M. GALLI, G. GIOVANNINI, G. LONGO, A. PAGLIARIN (1997) *Environmental Radiation Monitoring at high altitude Italy*.

## APÉNDICE I

### CALIBRACIÓN DEL NaI(Tl)

Se utilizaron tres pastillas radiactivas que se muestran en la Tabla 1.

En la Fig. 12 se muestra el espectro obtenido en el multicanal y en la Fig. AI 2 el ajuste lineal de calibración de la energía en función del número de canal en el multicanal.

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 2.

TABLA 1

Elemento	Energía (KeV)
$^{22}\text{Na}$	511,600
$^{60}\text{Co}$	1173,238
$^{137}\text{Cs}$	661,640

TABLA 3

Elemento	Canal	Energía (keV)	Integral	Área Neta (Cnts)	Incert.(%)	Cps
<sup>137</sup> Cs	45,18	661,15	29502	21583,22	1,33	1.438,867
<sup>60</sup> Co	116,96	1174,92	5296	2416,43	4,72	24,1643
<sup>60</sup> Co	139,54	1334,51	4317	1930,47	5,03	19,3047

TABLA 4

Isótopo	T <sub>1/2</sub> (años)	Energía en keV	Probabilidad de emisión (%)
<sup>60</sup> Co	5,272±0,001	1173,238±0,004	99,857±0,006
		1332,502±0,005	99,980±0,009
<sup>137</sup> Cs	30,14±0,03	661,660±0,009	85,1±0,5

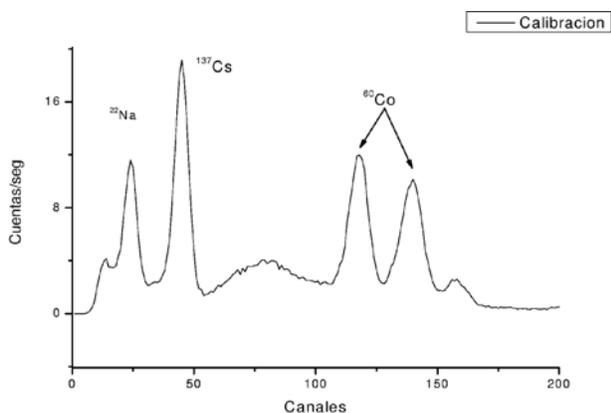


Figura 12. Isótopos de <sup>22</sup>Na, <sup>137</sup>Cs, y <sup>60</sup>Co, respectivamente, con sus dos picos y la suma de éstos mostrada al final como un pico más pequeño.

TABLA 2

Elemento	Número de canal	Energía [MeV]
<sup>22</sup> Na	23,52	511,6
<sup>137</sup> Cs	44,42	661,64
<sup>60</sup> Co	116,96	1173,238
<sup>60</sup> Co	139,54	1332,501

Se encuentra la siguiente relación:

$$E(KeV) = 346,4 + 7,1N$$

Coefficiente de correlación:  $R = 0,999997$

APÉNDICE II

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL NaI(Tl) Y ACTIVIDAD DEL Rn-222.

1. EFICIENCIA DEL NaI(Tl)

En la Tabla 3, se muestran los resultados de la calibración, obtenidos en el multicanal para los espectros del <sup>137</sup>Cs y del <sup>60</sup>Co.

TABLA 5

Isótopo	Actividad	Fecha de fabricación
<sup>60</sup> Co	2μCi	1980
<sup>137</sup> Cs	8μCi	1988

Los niveles de energía de los gammas de las pastillas utilizadas en la calibración están dados en la Tabla 4.

2. ACTIVIDAD DE LAS PASTILLAS DE <sup>60</sup>Co Y <sup>137</sup>Cs

La Tabla 5 muestra los datos de las pastillas radiactivas utilizadas.

De la ecuación:

$$A = A_0 e^{-\frac{t}{T_{1/2}} \ln 2} \tag{1}$$

se obtiene la actividad de las pastillas al año 2003:

$$A_{Co-60} = (0,09722 \pm 0,00004) \mu Ci$$

$$A_{Cs-137} = (5,666 \pm 0,002) \mu Ci$$

Calculamos la eficiencia de detector

$$\epsilon = \frac{S}{A \cdot P_\gamma} \tag{2}$$

$$S = Ctas/s$$

A = Actividad

P<sub>γ</sub> = Probabilidad de emisión.

De donde, la eficiencia para cada una de las pastillas resulta:

$$\epsilon_{Cs-137(661,66keV)} = (8,1 \pm 0,2) \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_{Co-60(1174keV)} = (6,7 \pm 0,3) \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_{Co-60(1334keV)} = (5,37 \pm 0,03) \times 10^{-4}$$

TABLA 6

Energía [KeV]	Probabilidad de decaimiento [%] [Ref.(1)]	Cuentas/s	Eficiencia [Ec. 3]	Actividades promedio [pCi][Ec. 4]	Error estadístico
609	46,10	4,36	0,00084318	30	2
768	2,30	0,55	0,00078396	84	4
934	1,49	2,54	0,00072214	649	26
1120	7,05	1,62	0,00065286	95	5
1764	7,42	1,00	0,00041301	87	4
2118	0,56	0,80	0,00028116	1412	77
—	—	—	Actividad promedio		
—	—	—	total	2360	90

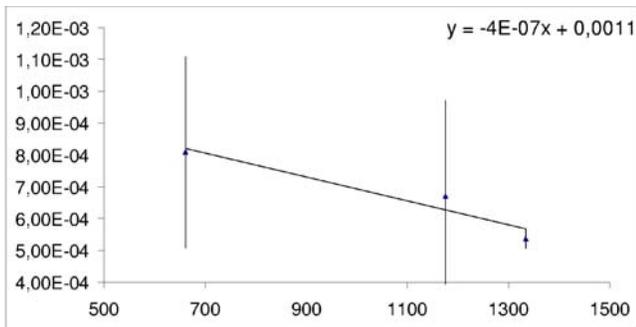


Figura 13. Eficiencia del detector en función de la energía.

En la Figura 13, se muestra el ajuste lineal de la eficiencia ( $\epsilon$ ) en función de la energía ( $E[KeV]$ ).

El resultado es:

$$\epsilon(E) = (1,07 \pm 0,08) 10^{-3} - (3,724446 \pm 0,000007) 10^{-7} / KeV \cdot E \quad (3)$$

Coefficiente de correlación:  $R = -0,95$ .

## 2. CÁLCULO DE LA ACTIVIDAD DEL Bi—214

La actividad puede obtenerse de:

$$A = \frac{S}{\epsilon(E) P\gamma \cdot 370} [pCi] \quad (4)$$

La actividad promedio obtenida de varios registros del multicanal para los picos observados del Bi-214 se muestran en la Tabla 6.

De modo que la actividad total promedio del Bi-214, registrada por el detector de NaI, resulta:

$$A_{Bi-214} = (2,36 \pm 0,09) = \mu Ci$$

que, dividida entre el volumen del cristal (diámetro: 20cm, espesor 10cm), nos da:

$$A_{Bi-214} = (0,75 \pm 0,03) \mu Ci/l$$

Como se puede ver del diagrama de decaimiento en la Fig. 1, la actividad del Bi-214 representa el 99 % de la del Rn-222.

Luego, la actividad medida del Rn-222, suspendido en la atmósfera en Chacaltaya (5200m.s.n.m.) resulta ser:

$$A_{Rn-222} = (0,76 \pm 0,03) \mu Ci/l$$