

# Cálculo de la Tasa de Dosis debida a Gamma Emisores Depositados en Suelo. Distribución Angular de la Radiación.

M. E. R. Rodríguez, R. H. Velasco, J. P. Toso, O. R. Olguín

Departamento de Física. IMASL.  
Universidad Nacional de San Luis. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
Ejército de los Andes 950 – CP 5700 – San Luis, Argentina.  
Tel. 02652-422803 – E-mail: mrod@unsl.edu.ar – hvelasco@unsl.edu.ar

En el presente trabajo se ha estudiado los efectos de la distribución angular de la radiación gamma sobre la determinación de la tasa de dosis en aire debida a  $^{137}\text{Cs}$  depositado en suelo.

Se usa un algoritmo de Monte Carlo para simular el transporte de fotones desde el suelo al aire.

La relación entre la distribución angular de la radiación y la forma del perfil vertical de radionúclidos en suelo es intensamente estudiada.

In this paper has been studied the effects of angular distribution of gamma radiation on the determination of the dose in air due to  $^{137}\text{Cs}$  in soil.

A Monte Carlo code is used to simulate the photon transport process from soil to air.

The relation between the angular distribution of radiation and the form of the vertical profile of radionuclides in soil is extensively studied.

## Introducción

Debido a pruebas nucleares atmosféricas, accidentes en centrales nucleares y a las descargas rutinarias originadas en la propia actividad de éstas últimas, se han introducido en el ambiente radionúclidos artificiales que, con mayor o menor medida, aportan a la irradiación externa e interna sobre la población expuesta. Uno de estos radionúclidos, presente en el suelo de la mayor parte del planeta, es el  $^{137}\text{Cs}$ . Es un gamma emisor de 662 keV, con una vida media física de algo más de 30 años, se lo encuentra principalmente dentro de los primeros 20 cm de profundidad en el suelo.

Es motivo de estudio por parte de la comunidad científica en los últimos años <sup>(1,2,3,4,10,11)</sup>, cuantificar el aporte a la irradiación externa sobre la población debida a estos radionúclidos y determinar los factores ambientales críticos que tienen influencia determinante en esta irradiación. Particularmente interesa no sólo el cálculo de la tasa de dosis, sino la distribución angular del flujo de fotones que arriban al detector. Esta distribución, se ha demostrado, está fuertemente ligada al perfil vertical que presenta el contaminante en el suelo. De este modo, contar con métodos eficaces que relacionen estas dos distribuciones posibilitaría, además de un cálculo dosimétrico más preciso, conocer la distribución del radionúclido con la profundidad a partir de mediciones 'externas'.

En el presente trabajo, se ha calculado la tasa de dosis debida a  $^{137}\text{Cs}$  depositado en suelo, y la dependencia angular de la radiación incidente respecto del perfil del contaminante en el suelo. El ángulo es medido respecto a la normal a la superficie, como se muestra en la figura 1.

El estudio llevado a cabo, permite relacionar la fracción de energía depositada en el detector con la profundidad de relajación del radioceso en suelo, bajo la suposición que éste se encuentra exponencialmente distribuido con la profundidad.

Se ha podido concluir que con sólo medir el equivalente a una fracción de la energía total incidente sobre el detector (por ejemplo 70% del total) se puede

determinar, con buena aproximación, la forma del perfil de distribución del  $^{137}\text{Cs}$  en suelo.

## Materiales y Métodos

El problema consiste en solucionar la ecuación de transporte en una interfase entre 2 medios de distintas propiedades. Para obtener la fluencia de fotones en el sitio del detector se utiliza un algoritmo de Monte Carlo especialmente diseñado para este fin, con el cual se resuelve la situación mostrada en la figura 1.

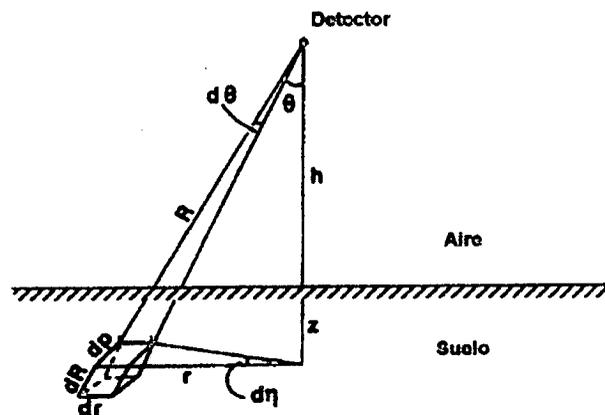


Figura 1: Esquema de la situación a estudiar.

Se simula, entonces, el recorrido de los fotones, desde el momento en que son emitidos, considerando, para el cálculo de la fluencia, aquellos que arriban al detector.

La distancia de vuelo entre interacciones se calcula mediante la ecuación <sup>(5)</sup>:

$$s = -\frac{\ln(\rho)}{\mu(E)} \quad (1)$$

donde:

s (cm): Longitud de vuelo.

$\rho$  : Número real contenido en el intervalo [0, 1].  
 $\mu(E)$  ( $\text{cm}^{-1}$ ): Coeficiente de absorción de energía.

Según una ley de probabilidades previamente establecida <sup>(5)</sup>, si la interacción es tipo Compton, el fotón experimentará un cambio en su dirección y una disminución en su energía. En caso de verificar una interacción fotoeléctrica el fotón desaparece.

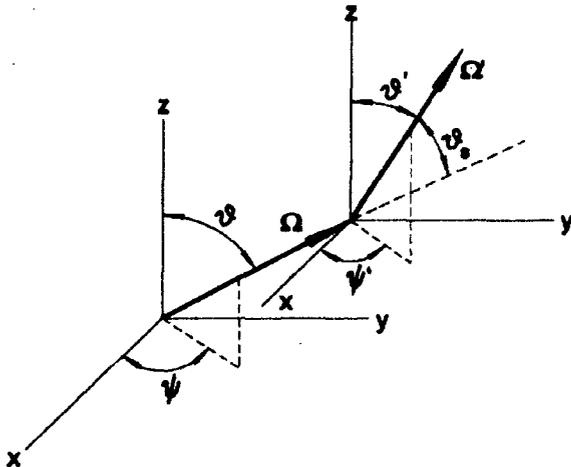


Figura 2: Secuencia de interacciones del fotón.

La Figura 2 representa el recorrido de un fotón entre dos interacciones consecutivas. La nueva dirección de movimiento se expresa en función de la dirección previa a la interacción de la siguiente manera <sup>(5)</sup>:

$$\cos(\theta') = \cos(\theta_s) \cdot \cos(\theta) + \text{sen}(\theta_s) \cdot \cos(\Delta\phi) \quad (2)$$

donde:

$\theta'$  (rad): ángulo medido en el nuevo sistema.

$\theta_s$  (rad): ángulo de difusión.

$\theta$  (rad): ángulo de emisión (o difusión de la etapa anterior) medido en el viejo sistema.

$\Delta\phi$  (rad): variación en el ángulo azimutal, respecto de la dirección anterior.

Se calcula la fluencia de fotones que arriban al detector, el cual puede ser imaginado como una esfera de radio  $r$ , ubicada a 1 metro de altura en cuyo interior hay aire a presión atmosférica y a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , y se estudia la distribución angular de los fotones incidentes. La tasa de dosis se calcula a partir de <sup>(1,2,3)</sup>:

$$\dot{D}(t) = \text{DRF} \cdot C(x, t) \quad (3)$$

donde:

$\dot{D}(t)$  ( $\text{Sv a}^{-1}$ ): Tasa de Dosis.

$\text{DRF}$  ( $\text{Sv cm}^3 \text{a}^{-1} \text{Bq}^{-1}$ ): Factor de Dosis.

$C(x, t)$  ( $\text{Bq cm}^{-3}$ ): Concentración corregida al tiempo del depósito.

$\text{DRF}$ , es un factor que relaciona la tasa de dosis con la concentración de radionúclidos en suelo. Puede ser determinado a partir de <sup>(4)</sup>.

$$\text{DRF} = \int K \cdot \left( \frac{\mu(E)}{\rho} \right)_{\text{aire}} \cdot E \cdot \Phi(\rho, T, E) \cdot R(E) dE \quad (4)$$

donde:

$K$ : Constante de conversión de unidades.

$R(E)$ : Coeficiente que convierte la dosis absorbida en dosis equivalente.

$\left( \frac{\mu(E)}{\rho} \right)$ : Coeficiente de absorción másico de energía para el aire, a la energía  $E$ .

$\Phi(\rho, T, E)$ : Fluencia de fotones, con energía  $E$ .

Con buena aproximación, en suelos indisturbados puede suponerse que la distribución vertical de  $^{137}\text{Cs}$  es de tipo exponencial decreciente. La concentración puede expresarse en función del tiempo y de la profundidad de la siguiente manera <sup>(8,9)</sup>:

$$C(x, t) = C_0(t) \cdot e^{-\alpha(t) \cdot x} \quad (5)$$

donde:

$C(x, t)$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ): Concentración corregida al tiempo del depósito.

$C_0$  ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ): Concentración superficial.

$\alpha(t)$  ( $\text{cm}^{-1}$ ): denominado factor alfa de la distribución.

La inversa de  $\alpha$ ,  $L_r(\text{cm})$ , es la profundidad de relajación, por encima de la misma se encuentra el 63% del total de la actividad contenida en suelo.

El valor del factor  $\alpha$  es un indicador de la forma que tiene la distribución vertical de los radionúclidos en suelo.

### Resultados

Uno de los objetivos propuestos en el presente estudio es relacionar la distribución angular de la radiación con  $\alpha$ . Con esta idea en mente, se procedió a simular la fluencia y la distribución angular de los fotones que arriban al detector para distintos distribuciones de  $^{137}\text{Cs}$  en suelo caracterizados por el valor del factor  $\alpha$ . Para tal cometido se dividió el suelo en coronas circulares de igual ancho y espesor (el espesor total analizado), desde las cuales son emitidos fotones que tendrán la posibilidad de ser detectados si están dentro de un ángulo sólido generado por la sección eficaz que presenta dicho detector para el punto de emisión del fotón en análisis.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente figura.

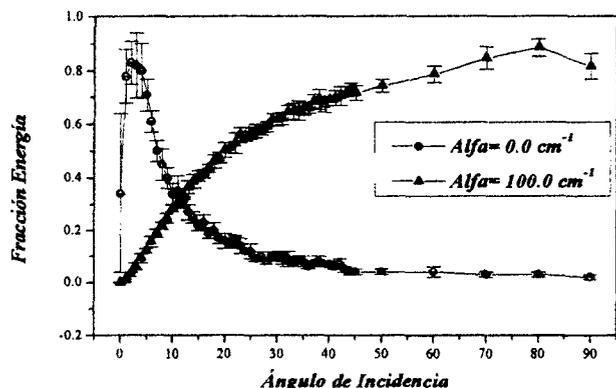


Figura 3: fracción de la energía transferida al detector en función del ángulo de incidencia.

Se verificó que para distribuciones uniformes en profundidad,  $\alpha(t) = 0$ , predominan, como era de esperarse <sup>(11)</sup>, aquellos fotones que inciden con ángulos muy próximos a  $0^\circ$ , mientras que para distribuciones superficiales (característica de depósitos recientes con un elevado valor de  $\alpha$ ), hay una importante contribución de los fotones que inciden con ángulos cercanos a  $90^\circ$ .

Resulta de interés evaluar la contribución en el depósito de energía en el detector según distintos intervalos angulares, tomados estos con una amplitud de  $10^\circ$ . Los resultados se muestran en la figura 4.

Asimismo se determinó la contribución angular acumulativa del depósito de energía en el detector, partiendo de  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$  (figura 5).

Para distintos valores del factor  $\alpha$ , se determinan los ángulos ( $\theta_{70}$  y  $\theta_{50}$ ) para los cuales la fracción de energía acumulada desde  $\theta=0$  representa, respectivamente el 70% y el 50% de la energía total depositada en el detector. Los resultados se muestran en la tabla 2:

Alfa ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_{70}$	$\theta_{50}$
0.1	35.5	21
0.3	38.5	24
0.5	40	24.5
0.8	42.7	25.8
1	44	30.5
10	52.2	38.5

**Tabla 2:** para distintos valores del factor  $\alpha$ , se indican los ángulos para los cuales la fracción de energía acumulada en el detector partiendo de  $0^\circ$ , corresponden, respectivamente al 70% y al 50% de la energía total depositada en éste.

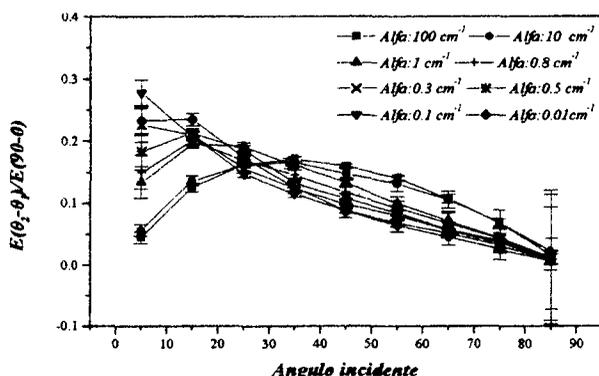
La representación de los resultados de la tabla 2, sugieren una relación exponencial entre el  $\alpha$  y el ángulo de incidencia. Esta relación se ve más clara cuando se cambian las escalas como se muestra en las figuras 6 y 7.

Se propone que la relación que vincula  $\alpha$  con el ángulo de incidencia es de la forma:

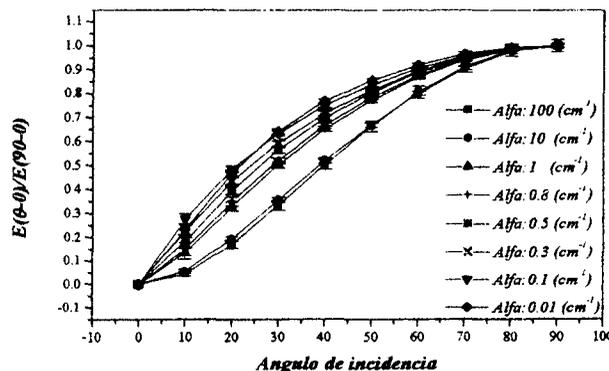
$$\alpha(t) = F(\theta) \quad \text{Ec. 5}$$

donde

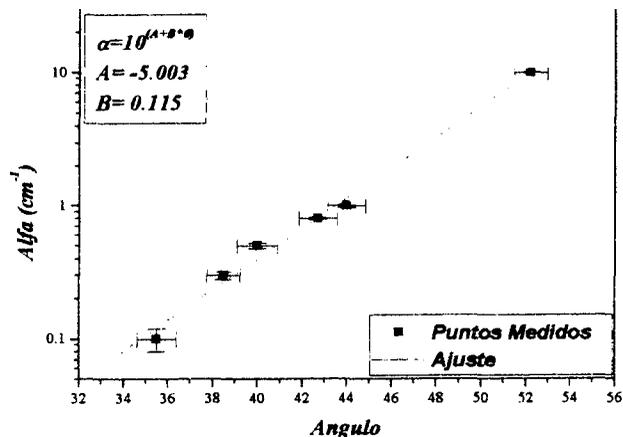
$$F(\theta) = 10^{(A+B \cdot \theta)} \quad \text{Ec. 6}$$



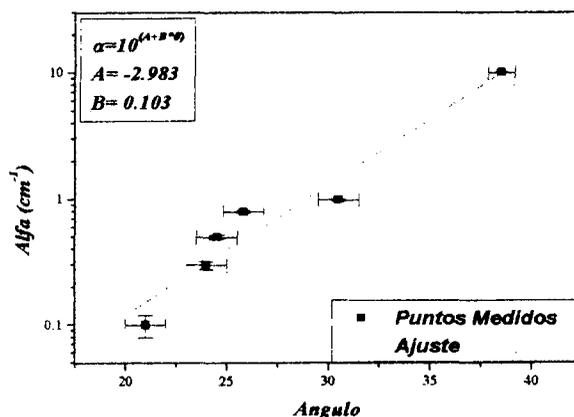
**Figura 4:** Fracción de la energía que incide sobre el detector por intervalo angular (10 grados).



**Figura 5:** Fracción de la energía que incide sobre el detector por intervalo angular (desde  $\theta$  a  $90$  grados).



**Figura 6:** A partir de mediciones experimentales de los ángulo del 70% se encuentra el  $\alpha$  correspondiente al suelo.



**Figura 7:** A partir de mediciones experimentales de los ángulo del 50% se encuentra el  $\alpha$  correspondiente al suelo.

### Conclusiones

La relación propuesta en este trabajo entre el  $\alpha$ , parámetro que caracteriza la distribución del contaminante en el suelo, y el ángulo de incidencia de los fotones en el detector, brinda la posibilidad de obtener una estimación de la forma del perfil de distribución del contaminante en suelo, en este caso  $^{137}\text{Cs}$ , con sólo hacer dos mediciones espectrométricas, una que informe la tasa dosis total para el suelo en análisis, y otra que informe sobre el ángulo para el cuál la tasa de dosis, acumulada desde  $\theta=0$  sea, o el 70% o el 50% del total. Si bien la tasa de dosis total podría corresponder a distintas combinaciones de  $\alpha$  y concentración superficial, es la forma de variación con el

ángulo de incidencia sobre el detector lo que caracteriza al tipo de perfil.

A partir de la observación de las gráficas se ha podido verificar, además, que el comportamiento de la distribución angular de los fotones incidentes en el detector, en función de la inversa de la longitud de relajación, es el esperado. Para perfiles uniformes la mayor contribución la tienen aquellos fotones que inciden con ángulos cercanos a  $0^\circ$ , mientras que para deposiciones superficiales la mayor contribución la tienen los fotones que inciden con ángulos próximos a  $90^\circ$ .

### Referencias

- 1) **Kocher, D. C., Sjoreen A. L.** Health Physics Vol. 38 pp. 543-621. 1980.
- 2) **Kocher, D. C., Sjoreen A. L.** Health Physics Vol. 45, N° 3, pp. 665-686. 1982.
- 3) **Kocher, D. C., Sjoreen A. L.** Health Physics Vol. 48, N° 2 pp. 193-205. 1985.
- 4) **Chen, S. Y.** Health Physics Vol. 60, N° 3 pp. 411-426. 1991.
- 5) **Shultis, K. And Faw, R.** "Radiation Shielding", Prentice Hall ISBN 0-13-125691-2. 1996.
- 6) **Knoll, G.** "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons ISBN 0-471-49545-X. 1979.
- 7) **Binder.** "Monte Carlo Methos in Statistical Physics", Topics in current Physics 1992
- 8) **Velasco, R. H., Toso J. P., Belli, M., Sansone, U.** J. Environ. Radioactivity, Vol. 37, N° 1 pp. 73-83. 1997.
- 9) **Velasco, R. H. Belli, M.** Health Physics, Vol. 64, N° 1, pp. 37-44. 1993.
- 10) **Huddleston, C** Health Physics, Vol. 11, pp. 537-548. 1965.
- 11) **Jacob, P.** Radiation Protection Dosimetry, Vol. 14 N° 4 pp. 299-310. 1986.