

APROXIMACIÓN TEÓRICA PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE FOTONES EN AIRE DEBIDA A RADIOISÓTOPOS SITUADOS EN EL INTERIOR DEL SUELO. APLICACIÓN A SITUACIONES PARTICULARES.

Marcos Rizzotto, Hugo Velasco y Nicolás Merkis

*(GEA, IMASL) Grupo de Estudios Ambientales - Instituto de Matemática Aplicada San Luis.
Universidad Nacional de San Luis, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.
Ej. de los Andes 950. D5700HHW San Luis, Argentina. E-mail: hvelasco@unsl.edu.ar*

Palabras clave: tasa de dosis, ^{137}Cs , ^{40}K , contribución cósmica, factor de tasa de dosis.

Resumen. En radioprotección, distinguir las fuentes principales de radiación gamma sobre la población constituye en la actualidad un desafío importante. Particularmente, la identificación del origen de la radiación y la ponderación de cada contribución, es crucial en la planificación de estrategias de remediación ambiental programadas con el fin de proteger a las personas expuestas. En el presente estudio se consideran datos obtenidos en una amplia zona costera situada en el sur de Italia, correspondientes a concentraciones de radionucleidos en suelo e intensidad de dosis en aire, con el propósito de evaluar, separadamente, las distintas contribuciones y verificar el acuerdo entre las aproximaciones teóricas y las mediciones experimentales. Los cálculos se efectúan utilizando la metodología tradicionalmente sugerida para estos casos. Las contribuciones debidas a ^{137}Cs y ^{40}K en suelo, se efectúan conjuntamente mediante una simulación de Monte Carlo. Las aproximaciones teóricas ajustan razonablemente los valores medidos y permiten comparar el impacto de las distintas fuentes. En la discusión de los resultados, se resalta la eficacia del método para diferenciar la contribución Compton de la Producción de Pares, en el cálculo de la intensidad de dosis debida a fotones con alta energía (^{40}K , 1.46 MeV).

1 INTRODUCTION

La radiación gamma externa proveniente de radionucleidos depositados sobre la superficie del suelo puede ser una fuente importante de exposición. El cálculo de esta radiación es muy complejo debido al gran número de factores ambientales que afectan al flujo de los fotones en aire producidos por fuentes situadas en el suelo. La distribución vertical de radionucleidos en el suelo, su movilidad, la rugosidad de la superficie del suelo, la densidad del suelo y su eventual cambio con la profundidad constituyen algunos de los factores más importantes a ser tenidos en cuenta en el cálculo de la tasa de dosis gamma en aire (Fink, 1994). La energía de la fuente afecta la interacción entre la radiación y el medio, y las características y propiedades del suelo son los factores más importantes para determinar la energía y la distribución angular de la radiación gamma en aire 1 m por encima de la superficie del suelo, la altura normalmente considerada para calcular la tasa de dosis gamma sobre el hombre.

Bunzl et al. (1996) señalan la influencia de la migración vertical de radionucleidos en suelo sobre la atenuación de la exposición en aire con el tiempo. Beck y De Planque (1968) y Beck et al. (1972) describieron el transporte de fotones en suelo-aire usando matrices de expansión polinómicas. Posteriormente, este mismo método se usó para calcular la tasa de dosis proveniente de los productos de fisión en áreas afectadas por la deposición del accidente de Chernobyl (Moberg, 1991; Fink, 1994). Kocher and Sjoreen (1985) determinaron los factores de conversión de la tasa de dosis basados en el método de integración denominado "point kernel". En este caso se supuso que la concentración de la fuente a cualquier profundidad a lo largo del perfil del suelo es uniforme sobre una superficie infinita paralela al plano del suelo. Los cálculos de la dosis se realizaron utilizando el factor de Tasa de Dosis (DRF) por medio de la siguiente ecuación (Kocher and Sjoreen, 1985):

$$\dot{H}(t) = S_A(z,t)DRF \quad (1)$$

donde \dot{H} (Gy h^{-1}) es la tasa de dosis externa al tiempo t (h); S_A (Bq cm^{-3}) es la densidad volumétrica de la actividad a la profundidad z (cm) y DRF (Gy h^{-1} por Bq cm^{-3}) es el Factor de Tasa de Dosis.

Los valores de DRF en aire a 1 m sobre la superficie del suelo se calcularon analíticamente para energías de fotones discretas entre 0.01 y 10 MeV y para fuentes distribuídas uniformemente en una capa de espesor finito o exponencialmente distribuídas con la profundidad.

Alternativamente se desarrolló un algoritmo de Monte Carlo para simular el cálculo del transporte de fotones para la configuración suelo-aire (Chen, 1991). En este caso, los constituyentes del suelo se supusieron similares a los de la corteza de la tierra. El modelo considera la fuente de fotones distribuída uniformemente a lo largo del perfil del suelo, desde la superficie del suelo hasta la profundidad determinada. Por debajo de ésta se considera al suelo como no contaminado. Los fotones de la fuente se seleccionaron aleatoriamente de la zona de suelo contaminado y sus subsecuentes interacciones fueron determinadas mediante la probabilidad de ocurrencia via los procesos fotoeléctrico, scattering Compton y producción de pares.

Clouvas et al. (2000) calcularon los factores de tasa de dosis para fuentes de fotones provenientes de radionucleidos naturales, uniformemente distribuídos a lo largo del perfil del suelo. El estudio comparó tres códigos de Monte Carlo diferentes: el MNCP de Los Alamos (Briesmeister, 1993), el GEANT desarrollado por el CERN (GEANT, 1993) y el código MC (Clouvas et al., 1998).

En el marco de un programa de colaboración científica en investigación entre la Italian Environmental Protection Agency (APAT, Roma) y la Universidad Nacional de San Luis (UNSL, Argentina), se desarrolló un nuevo código de Monte Carlo: el Código Dages (Rodríguez and Velasco, 1998). Este código permite simular las posibles interacciones de un número representativo de fotones, calculando la trayectoria de los mismos desde la fuente (en suelo), hasta el final de sus trayectorias. Para el cálculo de la dosis se consideran aquellos fotones que arriban a un detector situado 1 m por encima de la superficie del suelo. Posteriormente, un sistema de computación interactivo desarrollado para simular el comportamiento de los radionucleidos en ambientes semi-naturales (Radioecological Software Package (RSP), Velasco et al., 2004), permite entrelazar el código Dages con el modelo Rabes I (Velasco et al., 1993; Toso and Velasco, 2001), desarrollado para describir la movilidad de los radionucleidos en suelo. En el presente estudio se usó RSP para calcular la contribución a la tasa de dosis externa debida a ^{137}Cs y a ^{40}K medidas a lo largo del perfil del suelo, teniendo en cuenta las condiciones ambientales particulares de los puntos muestreados. Los datos usados se refieren a la investigación de la radiactividad ambiental realizada en 1997 por la APAT a lo largo de las costas de las regiones de Calabria y Basilicata (sur de Italia) (ANPA, 1996, 1997, Belli et al. 1998). Las tasas de dosis gamma externa se midieron en veinte sitios, usando una cámara de ionización por presión que suministra la estimación de la dosis de radiación que un individuo recibe cuando se encuentra de pie en la playa durante un periodo de tiempo determinado, a lo largo de la costa. Se recogieron muestras de suelo para determinar las concentraciones de actividad en distintas capas del perfil vertical. Conocer la distribución vertical de radionucleidos gamma emisores en el suelo, la posición geográfica y las características ambientales de los puntos de muestreo, y los valores de la tasa de dosis en los mismos puntos, da una posibilidad extraordinaria de utilizar los modelos teóricos para el cálculo de las diferentes fracciones que contribuyen a la tasa de dosis y comparar la suma de estas fracciones con los valores medidos. Este es uno de los objetivos centrales del presente estudio.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Muestreo de suelo y medición de la concentración de actividad

Los puntos muestreados se seleccionaron a lo largo de las costas este y oeste (Mares Jónico y Adriático respectivamente) en el sur de Italia (Ver Figura 1). La tabla 1 muestra las coordenadas de cada sitio muestreado. Las muestras de suelo fueron obtenidas sobre un área de 900 cm^2 para profundidades hasta 20 cm. Con el propósito de determinar la distribución vertical de radionucleidos se consideraron cinco capas de profundidades diferentes: 0-2 cm, 2-5 cm, 5-10 cm, 10-15cm and 15-20 cm. [Las sub-muestras obtenidas en cada punto muestreado fueron homogeneizadas, secadas a $110\text{ }^\circ\text{C}$, pulverizadas y tamizadas a 2 mm. Las concentraciones de actividad del ^{137}Cs y ^{40}K en todas las muestras se determinaron mediante espectrometría gamma de alta resolución usando detectores HPGe. El tiempo de conteo se seleccionó de modo que el error asociado sea inferior al 5% sobre el ^{137}Cs . La Tabla 1 muestra los valores de la densidad de depósito para cada uno de los radionucleidos en cada punto de muestra.

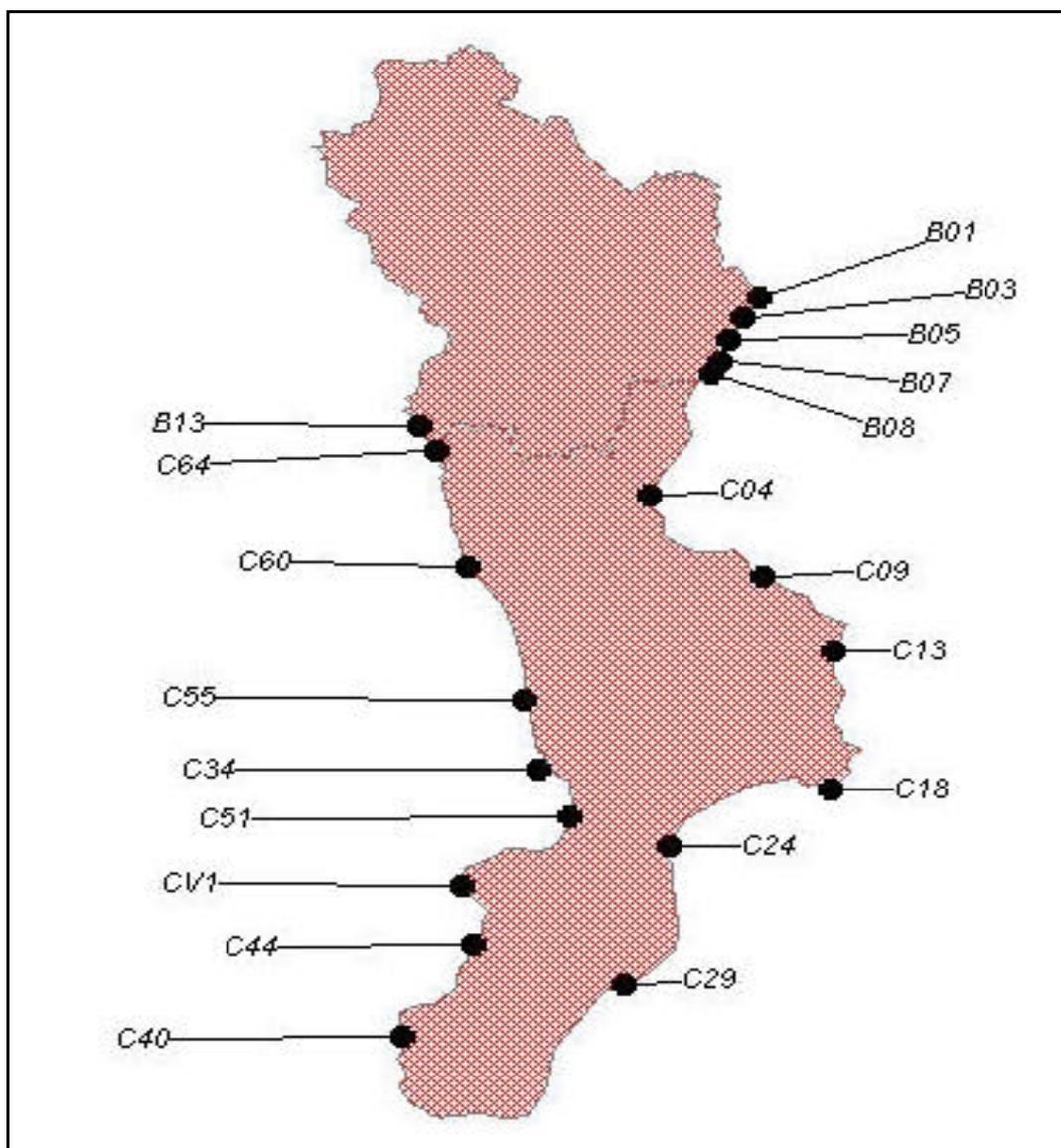


Figura 1: Sitios muestreados a lo largo de las Costas Este y Oeste del sur de Italia (Mares Jónico y Adriático, respectivamente).

2.2 Tasa de dosis ambiental

Las tasas de dosis gamma se midieron en todos los puntos muestreados usando un detector de radiación ambiental portátil (Reuter-Stokes High Pressure Ionization Chamber, model RSS-120) a 1 m por encima del nivel del suelo. Para los propósitos estadísticos, se tomaron 12-15 lecturas en cada punto muestreado a intervalos de tiempo de 15 minutos. Se calculó el valor promedio.

2.3 Esquema teórico para el cálculo de la tasa de dosis

Para el cálculo de las distintas contribuciones a la exposición externa se utilizó el esquema que se muestra a continuación. Seguidamente se mencionan las distintas fracciones considerando para el cálculo teórico de la tasa de dosis y el método utilizado en cada caso:

Punto muestreado	Longitud	Latitud	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	Medido
			kBq m ⁻²	kBq m ⁻²	nGy h ⁻¹	nGy h ⁻¹	
B01	40° 22.98	16° 51.39	0.10	136	0.06	14.0	53
B03	40° 19.16	16° 48.12	0.20	125	0.13	12.9	54
B05	40° 15.34	16° 45.32	0.40	111	0.26	11.5	54
B07	40° 11.37	16° 43.17	0.26	66.8	0.17	6.94	49
B08	40° 09.02	16° 41.43	0.10	63.3	0.06	6.54	49
C04	39° 47.17	16° 29.22	0.60	116	0.38	12.0	62
C09	39° 32.32	16° 51.98	0.20	238	0.13	24.6	76
C13	39° 18.95	17° 06.72	0.20	299	0.13	30.9	81
C18	38° 54.30	17° 06.10	0.03	147	0.02	15.2	60
C24	38° 43.96	16° 32.97	0.10	309	0.06	31.9	170
C29	38° 19.09	16° 23.82	0.03	323	0.02	33.4	88
C40	38° 09.62	15° 38.96	0.50	251	0.32	25.9	82
C44	38° 26.22	15° 53.37	0.60	273	0.38	28.2	78
CV1	38° 36.79	15° 50.80	0.03	240	0.02	24.8	141
C51	38° 49.32	16° 13.00	0.30	218	0.19	22.5	73
C34	37° 57.83	16° 06.18	0.03	226	0.02	23.3	73
C55	39° 10,13	16° 03.79	0.20	125	0.13	12.9	68
C60	39° 34.32	15° 52.10	0.10	120	0.06	12.4	68
C64	39° 55.18	15° 45.51	0.20	31,3	0.13	3.23	66
B13	39° 59.85	15° 41.97	0.80	136	0.51	14.0	70
Valor medio			0.24	178	0.16	18.4	75.8
Desviación standard			0.22	88	0.14	9.1	30

Tabla 1: Densidades de deposición en suelo para ¹³⁷Cs y ⁴⁰K y su contribución a la tasa de dosis externa en los diferentes sitios muestreados.

- Cósmica: siguiendo las recomendaciones de UNSCEAR (UNSCEAR, 2000), se consideró la contribución de los muones y electrones al nivel del suelo para latitudes por debajo de los 30°. Se consideró un error del 10%.
- ^{40}K en suelo: se usó el factor de tasa de dosis siguiendo las recomendaciones de UNSCEAR, (UNSCEAR, 2000). El mismo también fue calculado con el código Dages, suponiendo una distribución uniforme en suelo.
- ^{137}Cs en suelo: Los valores de DRF se calcularon con el código Dages. Se calcularon las contribuciones total y parcial de cada capa de suelo. Si $DRF(z_i)$ es el factor de tasa de dosis para la capa de suelo con concentración uniforme de ^{137}Cs , ubicada entre la superficie del suelo y una capa horizontal a la profundidad z_i , y S_{Ai} la densidad volumétrica de actividad del ^{137}Cs en la capa de suelo ubicada entre las profundidades z_{i-1} y z_i la contribución a la tasa de dosis externa atribuible a esta capa de suelo es:

$$\dot{H}_i(t) = S_{Ai}(z_i, t)[DRF(z_i) - DRF(z_{i-1})] \quad (2)$$

La contribución total a la tasa de dosis externa atribuible a este radionucleido es la suma de las contribuciones parciales de todas las capas de suelo consideradas.

2.4 Desarrollo del Código DAGES, un algoritmo de Monte Carlo para evaluar la tasa de dosis en aire debida a emisores gamma en suelo

Con el objeto de estudiar el comportamiento de subconjuntos de fotones, se usó un algoritmo de Monte Carlo, partiendo de la emisión inicial de la fuente, hasta el fin de su trayectoria. Se calculó cada una de las posibles interacciones de estos fotones con el suelo. Puesto que inicialmente la simulación fue desarrollada para el caso en que la fuente es ^{137}Cs , debido a la energía de los fotones (0.6617 MeV), solo se tuvieron en cuenta dos procesos de interacción de la radiación con la materia. El efecto fotoeléctrico, mediante el cual los rayos gamma liberan toda su energía a un electrón orbital y el efecto Compton, mediante el cual solo parte de la energía gamma se libera cuando la intercepción con un electrón y pares de electrón-positrón son generados cuando el rayo gamma es absorbido en la vecindad de un núcleo de un átomo. Si el fotón tiene una interacción fotoeléctrica, detiene su trayectoria. Sin embargo, cuando ocurre un scattering Compton, se debe calcular la nueva trayectoria y la energía del fotón.

En el caso de fotones más energéticos ($E > 1\text{MeV}$) también debe ser considerada la posibilidad de que la interacción de la radiación con la materia sea producción de pares (Shultis and Faw, 1996; Evans, 1955). La Figura 2 muestra un diagrama de flujo del algoritmo usado (código DAGES). Los pasos seguidos en la simulación fueron los siguientes:

a) Emisión:

La posición inicial del fotón (posición de la fuente) está dada por sus coordenadas $(z_0, \mathbf{j}_0, \mathbf{q}_0)$, donde z_0 es la profundidad del suelo ($z = 0$ es la superficie superior del suelo), \mathbf{j}_0 y \mathbf{q}_0 son los ángulos asimutal y cenital respectivamente. La profundidad z_0 fue seleccionada aleatoriamente de la zona del suelo contaminado. \mathbf{j}_0 y \mathbf{q}_0 fueron seleccionados aleatoriamente en el intervalo $[0, 2\pi]$ el primero y $[0, \pi]$ el segundo.

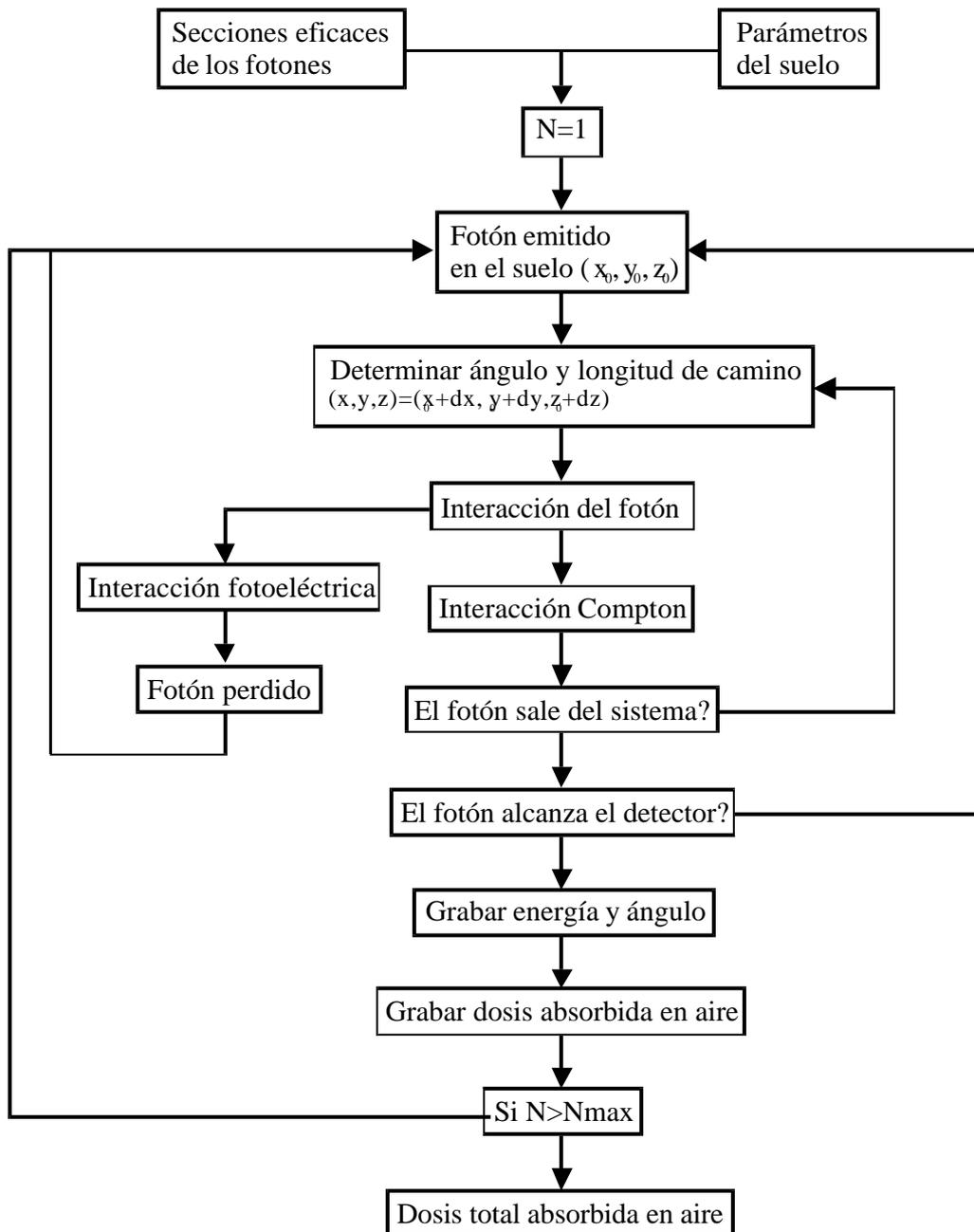


Figura 2: Diagrama de flujo del código DAGES

b) Longitud de camino del fotón y subsecuente interacción

La longitud del camino seguido por el fotón hasta la próxima interacción con el medio se determinó usando la relación (Shultis and Faw, 1996)

$$l = -\frac{\ln d}{m} \quad (3)$$

donde:

l (cm): longitud del camino.

d : variable aleatoria en el intervalo $[0,1]$.

m (cm^{-1}): coeficiente de atenuación lineal de energía.

c) Modo de interacción del fotón con el medio

El modo de interacción del fotón con el medio se selecciona teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia via scattering fotoeléctrico o Compton. Los procesos de producción de pares fueron descartados debido a la fuente de energía considerada. Los ángulos de scattering debidos a interacciones Compton fueron obtenidos a partir de la distribución angular descrita por la fórmula de Klein-Nishina (Evans, 1955).

d) Cálculo de la dosis absorbida en el receptor

Si el fotón alcanza el receptor, la energía absorbida por la masa de aire contenida en el receptor se calcula de acuerdo al procedimiento propuesto por Thomas (1983). La dosis absorbida resulta de la suma de las contribuciones individuales de cada fotón que llega al receptor, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D = \sum_{i=1}^N \Phi(E_i) \left(\frac{m_{ab}(E_i)}{r} \right)_{air} \cdot E_i \quad (4)$$

donde

D (Gy): es la dosis absorbida en aire

$\Phi(E_i)$ (Joule m^{-2}): fluencia de fotones con energía E_i .

$\left(\frac{m_{ab}}{r} \right)_{air}$ ($\text{m}^2 \text{gr}^{-1}$): coeficiente de absorción de energía en aire para la energía E_i .

3 RESULTADOS Y DISCUSION

La Tabla 1 muestra las densidades de deposición de actividad en suelo para ^{137}Cs y ^{40}K medidas en cada punto de muestreo. Los valores para el ^{137}Cs se encuentran entre 0.8 kBq m^{-2} (B13) y 0.03 kBq m^{-2} (C18, C34 y CV1), con un valor medio de $0.24 \pm 0.22 \text{ kBq m}^{-2}$. Los valores para el ^{40}K se encuentran entre 309 kBq m^{-2} (C24) y 31.3 kBq m^{-2} (C64). En este caso el valor medio es $178 \pm 88 \text{ kBq m}^{-2}$. La distribución vertical del contenido de actividad del ^{40}K puede considerarse uniforme en todos los puntos muestreados. La Figura 3 (a) muestra las densidades de deposición de actividad del ^{137}Cs en cada capa de suelo. La barra de error representa la variación asociada con las mediciones obtenidas de los diferentes sitios. El mayor contenido en suelo de ^{137}Cs se encontró en la capa 5-10 cm. Este valor disminuye notablemente para la capa más profunda (15-20 cm). La Tabla 2 muestra la fracción de la tasa de dosis gamma para ^{137}Cs y ^{40}K debidas a la concentración de actividad en suelo y cósmica. La contribución cósmica representa aproximadamente el 45% del total, y el contenido de ^{40}K y ^{137}Cs en suelo contribuye aproximadamente con el 24% y 0.3% respectivamente. El resto de la radiación es atribuible al contenido de ^{238}U y ^{232}Th en suelo. Para el ^{40}K en suelo, siguiendo las recomendaciones de UNSCEAR, (UNSCEAR, 2000), se usó el siguiente factor de tasa de dosis: $0.0417 \text{ nGy h}^{-1}$ por Bq kg^{-1} .

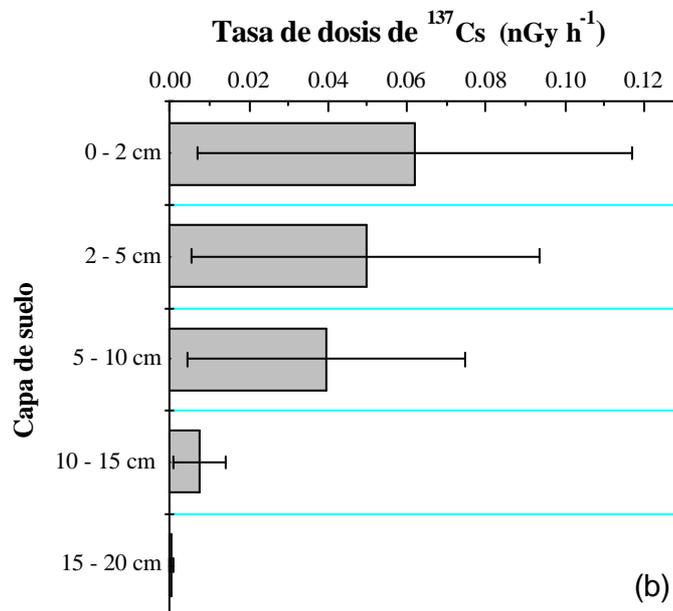
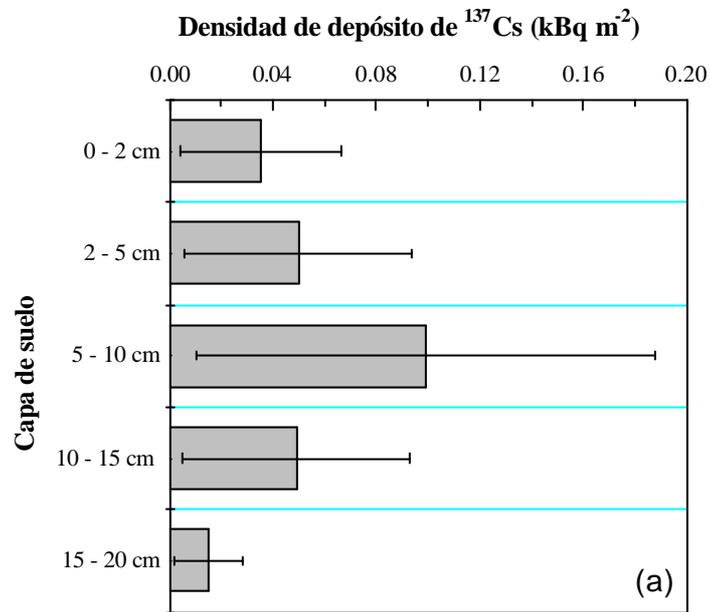


Figura 3: a) Densidad de deposición del ^{137}Cs en cada capa de suelo. b) Contribución del contenido de ^{137}Cs en diferentes capas de suelo a la tasa de dosis gama externa. La barra de error representa el valor medio \pm la desviación Ssandard asociada con las medidas obtenidas en los diferentes sitios muestreados.

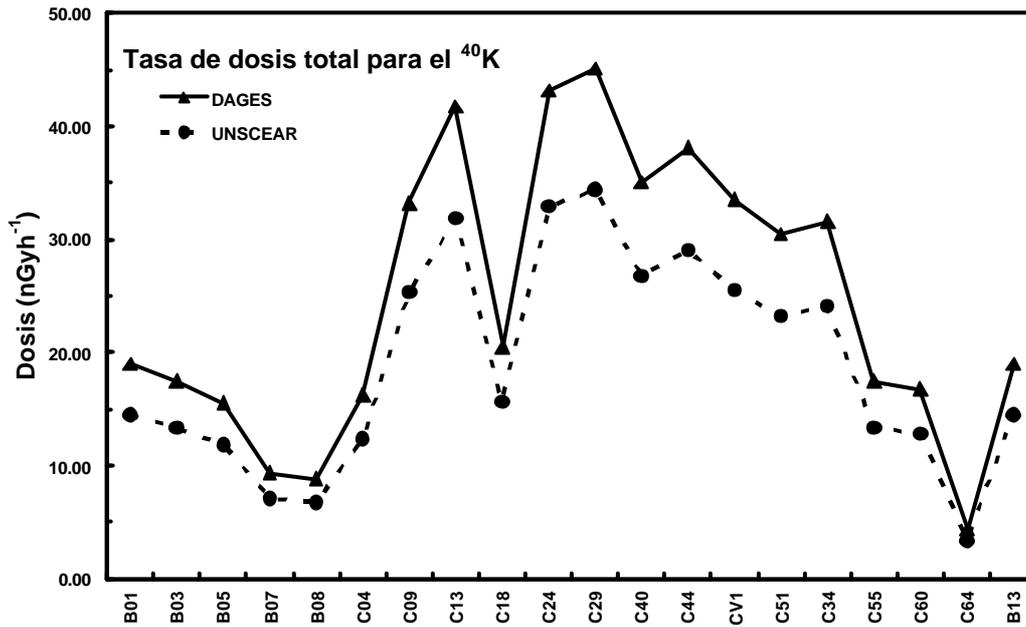


Figura 4: Contribución a la tasa de dosis debida al ⁴⁰K para cada sitio muestreado. Línea continua: valores calculados según el código DAGES. Línea discontinua: Valores según UNSCEAR.

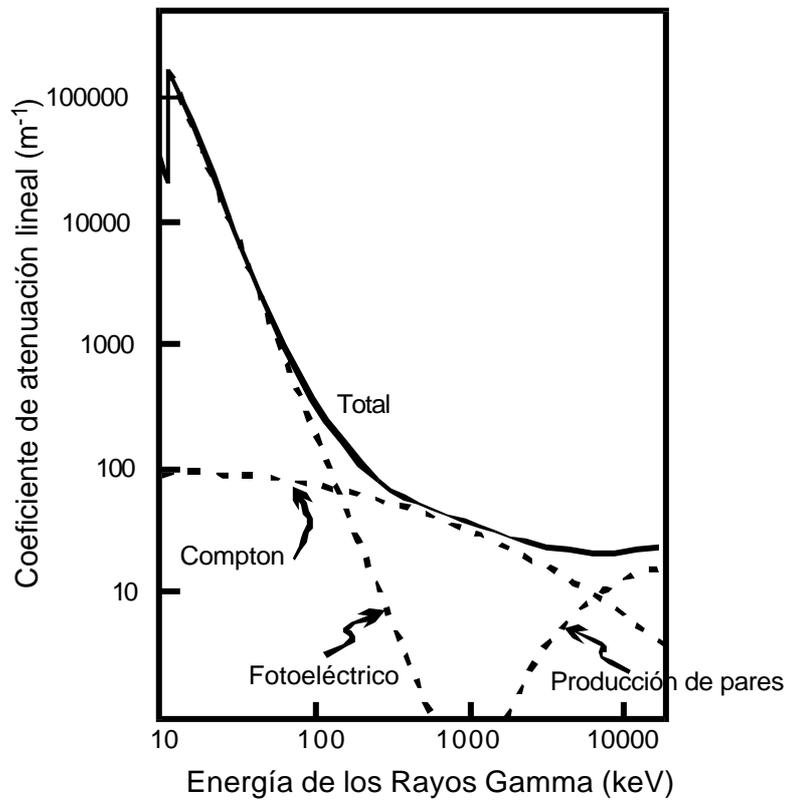


Figura 5: Coeficiente de atenuación lineal y sus componentes.

¹³⁷ Cs		⁴⁰ K		Radiación cósmica		Medida
nGy h ⁻¹	%	nGy h ⁻¹	%	nGy h ⁻¹	%	nGy h ⁻¹
0.16 ± 0.14	0.3	18.4 ± 9.1	24.2	34 ± 3	44.8	75.8 ± 30

Tabla 2: Fracción de la tasa de dosis gamma externa atribuible al contenido en suelo de ¹³⁷Cs y ⁴⁰K (valores medios) y contribución de la radiación cósmica.

En la figura 4 se muestra la contribución a la tasa de dosis debida al ⁴⁰K para cada sitio muestreado. En la misma aparecen los valores calculados según el código DAGES y también los valores según UNSCEAR. Como se puede observar, los valores obtenidos con el código DAGES son sistemáticamente mayores a los calculados utilizando la metodología propuesta en UNSCEAR. La diferencia puede ser atribuible a que la simulación llevada a cabo no considera el fenómeno de producción de pares, factible para el valor de energía del fotón emitido por ⁴⁰K. La figura 5 muestra los coeficientes de atenuación para las contribuciones fotoeléctrica, Compton y formación de pares. Para la energía correspondiente al ¹³⁷Cs (0.6617MeV), solo tenemos contribución fotoeléctrica y Compton, pero no formación de pares. Para los fotones gamma con energías correspondientes al ⁴⁰K (1.4608MeV) existe únicamente contribución Compton y formación de pares. Puesto que el código DAGES no tiene en cuenta formación de pares, está haciendo una sobreestimación en el valor de la tasa de dosis debido a que considera fotones que forman pares electrón-positrón. Estos fotones no llegan al detector, por lo tanto no contribuyen a la tasa de dosis.

La Figura 3 (b) muestra la contribución a la tasa de dosis del ¹³⁷Cs que se encuentra en las diferentes capas de suelo. Como era de esperar, las capas superficiales contribuyen más intensamente a la radiación externa, mientras que el proceso de apantallamiento de los niveles de suelo superiores hacen que el contenido de ¹³⁷Cs en las capas más profundas contribuya más tenuamente. La migración vertical de radiocesio puede considerarse como el proceso clave en la atenuación de la dosis externa. Sobre esta base, la tasa de dosis externa, en el caso de una fuente plana de 0.24 kBq m⁻² de ¹³⁷Cs ubicado sobre el suelo (valor medio medido en los sitios muestreados del presente estudio), sería 0.75 nGy h⁻¹ en lugar de 0.16 ± 0.14 nGy h⁻¹ (aproximadamente 4.7 veces mayor, tabla 2), correspondiente al mismo contenido de ¹³⁷Cs distribuido verticalmente en el suelo en la situación encontrada al momento del muestreo.

4 CONCLUSIONES

El trabajo presenta las contribuciones a la tasa de dosis externa, de las concentraciones de actividad del ¹³⁷Cs y ⁴⁰K, determinadas a lo largo de perfiles verticales en playas de arena. Las muestras de arena fueron recogidas en 1997 de veinte puntos muestreados a lo largo de las costas del sur de Italia, en el marco de una investigación sobre radiactividad ambiental llevada a cabo por la Italian Environmental Protection Agency. El Factor de Tasa de Dosis (DRF) para el ¹³⁷Cs se calculó usando un algoritmo de Monte Carlo. En cada punto muestreado se determinó la contribución a la tasa de dosis externa de cada capa de arena a lo largo del perfil vertical. Tal como se esperaba a partir del marco teórico, la migración de radionucleidos a lo largo del perfil del suelo puede contribuir a una reducción significativa de la tasa de dosis externa, si se la compara con la suposición de que los radionucleidos después de la deposición permanecen sobre la superficie del suelo hasta que son eliminados por el decaimiento radiactivo.

La contribución a la tasa de dosis externa atribuible a la presencia de ¹³⁷Cs y ⁴⁰K en las diferentes

capas de suelo y la fracción originada por la radiación cósmica se calculó para cada punto muestreado a lo largo de las regiones de Calabria y Basilicata. La suma de estas tres contribuciones explica en el promedio, casi el 70% de la tasa de dosis medida en cada sitio muestreado.

Para el caso de ^{40}K , los valores obtenidos utilizando el código DAGES difieren por exceso, de los calculados según la metodología propuesta por UNSCEAR. Las diferencias se atribuyen a que el modelo utilizado tiene en cuenta solamente el efecto fotoeléctrico y Compton, no así la producción de pares que no es despreciable para la energía de emisión de ^{40}K .

REFERENCIAS

- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente. La radioattività ambientale sulle coste della regione Calabria. *ANPA Publication*. Italia. ISBN 88-448-0298-9; 1996.
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente La radioattività ambientale sulle coste delle regioni Basilicata e Calabria. *ANPA Publication*. Italia. ISBN 88-448-0002-0; 1997
- Beck H, dePlanque G. The radiation field in air due to distributed gamma-ray sources in ground. *USAEC Report HASL-195*; 1968.
- Beck HL, DeCampo J, Gogolak C. In situ Ge(Li) and Na(Tl) gamma-ray spectrometry for the measurement of environmental radiation. *USAEC Report HASL-258*; 1972.
- Belli M, Alonzi A, Anoja RA, Bellecci C, Blasi M, Brown J, Cavaioli M, Cicero A, Colicchia D, Feroce C, Fortunato CP, Gaveglia C, Manzueto L, Marchetti A, Mingrone G, Noschese G, Riccardi M, Rosamilia S, Sansone U, Scalzo G, Stranieri S, Ursino S. The environmental radioactivity along the seaboard of south Italy. *Fresenius Environmental Bulletin* 7:743-749; 1998.
- Briesmeister JF. MCNP - A general Monte Carlo N-particle transport code, version 4^a. Los Alamos, NM: *Los Alamos National Laboratory*; LA-12625; 1993.
- Bunzl K, Hillmann U, Jacob P, Kretner R, Schimmack W, Sanzharova N, Fesenko S, Kotik V, Krouglov S, Ivanov Y, Oreshich L, Levtschuk S, Arkhipov A, Sokolik G. Migration behaviour of radiocaesium in meadow soil and external radiation exposure. In: Belli M, Tikhomirov F, eds. Behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments. *European Commission EUR 16531 EN*; 1996: 94-104.
- Chen S. Calculation of effective dose-equivalent responses for external exposure from residual photon emitters in soil. *Health Phys.* 60:411-426; 1991.
- Clouvas A, Xanthos S, Antonopoulus-Domis M, Silva, J. Monte Carlo based method for conversion of in situ gamma ray spectra obtained with a portable Ge detector to an incident photon flux energy distribution. *Health Phys.* 74:216-230; 1998.
- Clouvas A, Xanthos S, Antonopoulus-Domis M, Silva J. Monte Carlo calculation of dose rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Health Phys.* 78(3):295-302; 2000.
- Evans, R.D. (1955). *The atomic nucleus*. New York. McGraw-Hill Book Co.
- Fink RR. The primary photon field from sources in the ground. In: Holm E, ed. Radioecology: *Lectures in environmental radioactivity*. World Scientific; 1994: 87-124.
- GEANT. Detector description and simulation tool. Geneva: CERN; *Program Library Long Writeup W5013*; 1993.
- Kocher D, Sjoeren A. Dose-rate conversion factors for external exposure to photon emitters in soil. *Health Phys.* 48(2):193-205; 1985.
- Moberg L. The Chernobyl fallout in Sweden. *Swedish Radiation Protection Institute; Stockholm*;

1991: 9-17.

Rodríguez M, Velasco H. Determinación de la tasa de dosis debida a gamma emisores depositados en el suelo. Simulación de Monte Carlo. *Annals of the Argentinean Physics Association* 10:310-314; 1998.

Schultis, J. K. and Faw, R. E., *Radiation Shielding*, Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, NJ 07458; 1996.

Toso JP, Velasco RH. Describing the observed vertical transport of radiocesium in specific soils with three time-dependent models. *Journal of Environmental Radioactivity* 53:133-144; 2001.

UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Report of the General Assembly: Sources and Effects of Ionizing Radiation, Annex B: Exposure from natural radiation sources*; 2000.

Velasco H, Carreño E, Rodríguez M, Belli M, Sansone U. Radioecological Software Package: an interactive computational system to simulate the behavior of radionuclides in semi-natural environments. *Journal of Environmental Radioactivity* 73: 223-230; 2004.

Velasco RH, Belli M, Sansone U, Menegon S. Vertical transport of radiocesium in surface soils: model implementation and dose-rate computation. *Health Phys.* 64(1):37-44; 1993.