SIMULACION DE FOTONES GAMMA RETRODISPERSADOS APLICADO A UN MEDIDOR DE DENSIDAD DE SUELOS

F. Espinoza[1,2], O. Orihuela[1] y M. Montoya[1,2]

(1) FINES-GID, Centro Nuclear RACSO de Huarangal, IPEN
Apartado 1687, Lima - Perú.

(2) Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería
Apartado 31.139, Lima - Perú.

RESUMEN

Se está aplicando la retrodispersión de rayos gamma en la materia como un método para la determinación de densidad de suelos /1, 2/. En este trabajo se usa el método de Monte Carlo para simular la historia de cada uno de los rayos gamma que, a partir de la fuente de un equipo de medición de suelos, ingresa a un suelo y, eventualmente, llega al detector del mismo equipo. A partir de ello se calcula la probabilidad para que los rayos gammas lleguen al detector, en función de la densidad y espesor del suelo y de la distancia fuente-detector.

INTRODUCCION

Se ha diseñado un medidor de suelos que consta básicamente de una fuente de rayos gamma y un detector, dispuestos en una geometría que describiremos más tarde /2/. La fuente está recubierta por un brindaje de plomo en forma cilíndrica y con un agujero colimador en su base, el cual se apoya sobre un suelo de densidad y espesor dado. Los rayos gamma que ingresan al suelo experimentan diversas interacciones (fotoeléctrico, Compton, creación de pares) dependiendo de su energía. Sobre el suelo se posiciona un detector de INa(Tl) al cual le llegan los rayos gamma retrodispersados en el suelo.

EFECTO COMPTON

El proceso de interacción de dispersión Compton se lleva a cabo entre el fotón y un electrón en el material (suelo). Este mecanismo de interacción es más frecuente para energías típicas de fotones de fuentes radioisotópicas.

En la dispersión Compton, el fotón es deflectado a través de un ángulo θ con respecto a su dirección original. El fotón transfiere una parte de su energía al electrón (asumido estar inicialmente en reposo) y éste es eyectado fuera del átomo con cierta energía cinética.

Debido a que todos los ángulos de dispersión son posibles, la energía transferida al electrón puede variar desde cero hasta una gran fracción de la energía del rayo gamma. La expresión que relaciona la energía transferida y el ángulo de dispersión θ es la siguiente /3, 4/:

$$h\nu = \frac{h\nu_o}{1 + \frac{h\nu_o}{m_o \cdot c^2}[1 - \cos\theta]}$$

donde: $h\nu$ es la energía del fotón incidente;
$h\nu_o$ es la energía del fotón dispersado;
$m_o.c^2$ es la energía del electrón en reposo.

Secciones eficaces de absorción y dispersión

Para tratar la contribución del efecto Compton en la atenuación del haz de rayos gamma en el suelo, es necesario calcular la probabilidad que tal proceso de dispersión ocurra.

Esta probabilidad fue calculada sobre la base de la mecánica cuántica relativísta (por Klein y Nishima). La fórmula para la sección eficaz por electrón para la remoción de fotones desde el haz incidente por dispersión es la siguiente /3, 4/:

$$e^{\sigma} = \frac{3}{4}\Phi_o\left[\frac{1+\alpha}{\alpha^2}\left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha}\ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2}\right] + \frac{1}{2\alpha}\ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2}\right]$$

donde: $\alpha = \frac{h\nu_o}{m_o \cdot c^2}$; $\Phi_o = \frac{8}{3}\pi\left[\frac{e^2}{m_o \cdot c^2}\right]^2$;

e, es la carga eléctrica del electrón

El coeficiente de absorción Compton, que es una medida de la cantidad total de energía removida del haz por centímetro de material, es dado por la relación:

$$\sigma = \rho\, N_{Avo} \cdot \left[\frac{Z}{A}\right] \cdot e^{\sigma}$$

donde: ρ es la densidad del suelo;
Z y A son el número y peso atómico.

Algunas veces, es necesario conocer la cantidad de energía de los fotones dispersados. La sección eficaz de dispersión Compton por electrón en función de la energía del fotón está dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_s = \rho \, . \, N_{Avo} \, . \, [\frac{Z}{A}] \, . \, e^{\sigma} s$$

El coeficiente de dispersión Compton, es dado por la relación /3, 4/:

$$e^{\sigma} s = \frac{3}{8} \Phi_o [\frac{1}{\alpha^3} \ln (1 + 2\alpha) + \frac{2(1+\alpha)(2\alpha^2 - 2\alpha - 1)}{\alpha^2 (1+2\alpha)^2} + \frac{8\alpha^2}{3(1+2\alpha)^3}]$$

Para elementos livianos Z/A es aproximadamente igual a 1/2, así que el coeficiente de dispersión Compton, para una energía dada del fotón, es proporcional a la densidad del suelo.

Distribución angular de los fotones dispersados

En el seguimiento de las trayectorias de los fotones en el suelo, se hace necesario conocer la sección eficaz diferencial para la dispersión de los fotones gamma por los electrones. Este parámetro fue predicho por la fórmula de Klein-Nishima, la cual proporciona la distribución angular de los rayos gamma dispersados. Esta distribución depende fuertemente de la energía de los rayos gamma incidentes /3, 4/.

$$\frac{d(e^{\sigma})}{d\Omega} = r_o^2 \, [\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}]^3 \, [\frac{1 + \cos^2\theta}{2}] \, x$$

$$[1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]}]$$

donde: $r_o = \dfrac{e^2}{4\pi \varepsilon_o m_o c^2}$; $d\Omega = 2\pi \, sen\,\theta$

ABSORCION FOTOELECTRICA

En el proceso de absorción fotoeléctrica, un fotón incidente interactúa con un átomo absorbedor, en el cual el fotón desaparece completamente. En su lugar, un fotoelectrón energético es eyectado por el átomo desde una de sus capas electrónicas.

Las fórmulas para la probabilidad que un fotón de energía hν experimente absorción fotoeléctrica han sido derivados de métodos de la mecánica cuántica.

Si la energía del fotón es suficientemente pequeña tal que los efectos relativisticos no sean importantes, pero suficientemente grande tal que la energía de enlace de los electrones en la capa K puedan ser despreciados, la sección eficaz o coeficiente de absorción fotoeléctrica es expresado por la relación /3, 4/:

$$\tau = \rho \cdot N_{Avo} \cdot \left[\frac{Z^5}{A}\right] \cdot \left[\frac{4\sqrt{2}}{137^4}\right] \cdot \left[\frac{m_o \cdot c^2}{h\nu}\right]^{\frac{7}{2}}$$

La más importante propiedad de éste último parámetro es la fuerte dependencia del número atómico (Z) y de la energía del fotón incidente (hν).

SIMULACION POR EL METODO DE MONTE CARLO

Se elaboró un programa en lenguaje C, en el cual se sigue la historia de cada fotón a través del sistema modelados como fuente, colimador, blindaje, suelo, detector (ideal).

MODELO PARA SIMULACION

El programa elaborado permite evaluar la retrodispersión de rayos gamma en un medio, considerando sólo dispersión Compton. En la simulación se considera una fuente plana isotrópica (Cs-137), situada a cierta distancia de un medio homogéneo infinito (suelo) de superficie plana, y un detector hipotético, colocado sobre la superficie del suelo a cierta distancia de la fuente.

CARACTERIZACION DEL MEDIO DISPERSOR

Para la caracterización del suelo se toma en cuenta su densidad, la relación Z/A aproximadamente igual a 0.5, sus secciones eficaces diferencial, dispersión y absorción Compton, que son dependientes de la energía de rayos gamma. Además se introduce como dato el espesor de suelo.

DETECCION DE GAMMAS RETRODISPERSADOS

El detector ideal, debido a la suposición de considerar un suelo homogéneo, ha sido considerado como una zona de anillos concéntricos, cuyo centro es la posición de la fuente, de modo de aumentar el número de fotones que llegan a la zona de detección y por lo tanto en una mejora en la estadística del proceso de simulación.

DETERMINACION DE PARAMETROS

Dirección de fotones emitidos

Como la fuente es isotrópica, el ángulo azimutal y polar son aleatorios, por lo que ellos se pueden expresar como:

$$\phi = \frac{1}{2}\pi \cdot \gamma ; \qquad \theta = \pi \cdot \gamma \qquad 0 \leq \gamma \leq 1$$

donde: γ son números aleatorios generados por el computador.

En nuestro caso, hemos considerado un haz de fotones colimados por las paredes internas del agujero en el blindaje de plomo. Por lo que la expresión utilizada en el ángulo polar para los fotones rayos gamma emergentes de la fuente es:

$$\theta = [\pi - \arctan(\frac{R_{col}}{L_{col}})] \cdot \gamma : \qquad 0 \leq \gamma \leq 1$$

donde: R_{col} y L_{col} son el radio y longitud del colimador.

Interacción con el medio dispersor

Al ingresar al medio dispersor, un fotón experimenta una de las interacciones posibles, absorción o dispersión. La probabilidad de que experimente una de ellas, puede especificarse mediante la relación entre las secciones eficaces de dispersión y absorción Compton, es decir:

$$p_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \sigma_a}$$

Este valor (p_s) es comparado con un número aleatorio mayor que 0 y menor que 1. La condición de dispersión Compton es que este número aleatorio sea menor que la probabilidad calculada y si es mayor que esta probabilidad el fotón es absorbido.

Energía y dirección de fotón dispersado

La sección eficaz diferencial nos proporciona información acerca de la probabilidad de que un fotón rayo gamma experimente una dispersión Compton en una dirección cuando incide un fotón con energía hv. La dirección del fotón dispersado se expresa con los ángulos polar y azimutal (θ ,Φ), donde el ángulo azimutal es predicho de acuerdo a la relación (8).

El ángulo polar con el que se dispersa el fotón rayo gamma se halla a partir de la sección eficaz diferencial de dispersión, la cual es muy compleja. Usando un método iterativo, en el que se fija la sección eficaz diferencial con un número aleatorio, y comparando con un amplio rango de valores del ángulo polar (θ), se logra encontrar un valor aproximado del ángulo polar.

La energía del fotón se degrada por efecto de la dispersión Compton, y se evalúa a partir de la energía inicial de fotón gamma incidente (hv) y del ángulo polar (θ) evaluado anteriormente.

Distancia recorrida por el fotón dispersado

Si ocurre la dispersión Compton, éste rayo gamma dispersado recorrerá dentro del material, en cierta dirección y con una energía

degradada, una cierta distancia antes de que ocurra una próxima interacción.

En la evaluación de éste parámetro, se tiene en cuenta el mecanismo de absorción de los rayos gamma por la materia. La propiedad básica de la absorción de rayos gamma es el decrecimiento exponencial en la intensidad de la radiación cuando un haz homogéneo de rayos gamma pasa a través de un espesor de materia.

Luego, la probabilidad de que un fotón rayo gamma recorra una distancia r sin experimentar algún tipo de interacción en el medio es dado por:

$$p(r, h\nu) = \exp(-\mu(h\nu).r); \quad \mu(h\nu) = \sigma(h\nu) + \tau(h\nu)$$

donde cada sección eficaz o coeficiente de absorción debe ser evaluado para la energía del rayo gamma. Los coeficientes de absorción Compton y fotoeléctrico son expresados secciones eficaces microscópicas respectivas. La distancia que recorre un fotón gamma sin interaccionar es evaluada como:

$$r(h\nu, \gamma) = \frac{-\ln(\gamma)}{[\sigma(h\nu) + \tau(h\nu)]}: \qquad 0 \leq \gamma \leq 1$$

donde la probabilidad p(r) es representado por un número aleatorio generado por el computador.

ALGORITMO DE LA HISTORIA DE CADA FOTON

Luego de presentar los parámetros empleados en la simulación del proceso de detección de rayos gamma retrodispersados en suelos, se describe el proceso de seguimiento de cada rayo gamma emitido por una fuente de Cs-137 através de los medios interpuestos (blindaje, suelo).

Emisión de rayos gamma:

Se emite un rayo gamma de 662 keV desde una fuente plana, en

una dirección aleatoria dentro de un ángulo sólido específico (colimador). De acuerdo a la dirección del rayo gamma, éste puede ingresar al medio de interés (suelo) o al blindaje de plomo.

Ingreso al suelo

- Se evalúa las secciones eficaces (total y de dispersión Compton) a partir de la energía del rayo gamma, para evaluar la probabilidad de dispersión (p_s). Luego éste valor se compara con un número aleatorio τ ($0 < \tau < 1$) generado por el computador.

- Si $\tau > p_s$, el fotón es absorbido (finalización del proceso para el presente fotón y emisión de un nuevo rayo gamma).

- Si $\tau < p_s$, el rayo gamma es dispersado. Para el rayo gamma dispersado se evalúa su dirección azimutal (generado por un número aleatorio) y polar (obtenido a partir de la sección eficaz diferencial), con estos valores obtenidos se determina la energía (E) y la posición (x,y,z) del rayo gamma dispersado. Con el valor de la coordenada de posición (z) se verifica lo siguiente:

  - Si el rayo gamma dispersado ha llegado a la superficie del suelo se detecta, y la zona de detección se verifica con las coordenadas de posición (x,y). Se finaliza el proceso del rayo gamma dispersado detectado, y se regresa a procesar otro rayo gamma en la **emisión de rayos gamma**.

  - Si el rayo gamma dispersado ha llegado a una posición intermedia. Se regresa a continuar el proceso del primer item.

  - Si el rayo gamma dispersado ha atravezado el espesor de suelo especificado. Se finaliza el proceso del rayo gamma presente, y se regresa a emitir un nuevo rayo gamma en la **emisión de rayos gamma**.

RESULTADOS

Se ha considerado las siguientes condiciones:

- espesor de suelo de 10,0 cm, Z/A=0,5,

- zona de detección entre 15,0 y 29,0 cm y,
- densidades del medio dispersor desde un valor de 0,5 gr/cm^3 hasta 2,75 gr/cm^3.

Para estas condiciones, se realizaron varios procesos de simulación, en los que se analizó 1 200 000 rayos gamma por cada proceso.

El proceso de simulación de 1 200 000 rayos gamma colimados, muestra que la cantidad aproximada de rayos gamma que: son absorbidos por el blindaje es del 50%, son absorbidos por el suelo es del 35%, que atraviezan el espesor dado es del 14% y que llegan a la superficie del suelo es de aproximadamente 1%.

Estos resultados fueron graficados en cuentas versus densidad (ver tabla 1).

Zona de detección (en cm)

Rho g/cm^3	15-17	17-19	19-21	21-23	23-25	25-27	27-29
0,50	1222	1081	935	773	766	646	619
0,75	1844	1478	1237	994	938	774	717
1,00	2249	1699	1346	1099	893	697	676
1,25	2589	1788	1277	1023	788	652	521
1,50	2661	1625	1256	877	741	509	442
1,63	2537	1717	1176	857	607	471	413
1,75	2599	1545	1059	749	506	404	333
2,00	2288	1416	907	595	406	284	223
2,38	2088	1124	685	365	276	155	113
2,50	2009	1053	582	332	225	144	85
2,75	1637	853	470	266	172	89	56

Tabla 1. Rayos gamma retrodispersados para varias densidades (Rho) y zonas de detección.

OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

El comportamiento de las cuentas función de la densidad es análogo a lo obtenido en las mediciones experimentales con el prototipo del medidor de densidad superficial de suelos.

Para las diversas zonas de detección, se presenta un máximo en las cuentas función de la densidad del suelo, el cual se va corriendo hacia bajas densidades a medida que se aleja el detector (ideal) de la fuente de rayos gamma. Esto es verificado en la parte experimental.

Los rayos gamma detectados por retrodispersión en el suelo, para todas las zonas de detección, se reduce fuertemente a densidades grandes y bajas densidades de suelo. Este efecto se explica por la alta absorción de rayos gamma en materiales muy densos, y al gran camino libre medio de los rayos gamma en materiales de baja consistencia.

BIBLIOGRAFIA

[1] Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics, 2nd volumen. Vienna: International Atomic energy agency, 1966.

[2] Sergio Benites y Rodión Santivañez, Aspectos experimentales de un medidor de densidad superficial de suelos (MGDS), Centro Nuclear de Huarangal, 1990.

[3] Kaplan Irvin, Nuclear Physics, 2nd edition, Adisson-Wesley Publishing, 1956, capítulo 15.

[4] The Atomic Nucleus, Evans, R. D., Mc Graw-Hill Book Co Inc, N. Y. 1955, capítulos 23, 24 y 25.