

Factor de Buildup como función de la humedad y del grosor de capas de arena

Maritza Melo Ramos, Fernando Cristancho

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

En el paso de la radiación γ por algún material la intensidad de la radiación transmitida es atenuada y descrita como $I = I_0 B(x) e^{-\mu x}$, donde I_0 es la intensidad incidente, μ es el coeficiente de atenuación lineal, x el grosor del material y B factor de *Buildup*. Estudiando espectros de transmisión de rayos- γ a través de varios grosores de arena con diferentes humedades se determina la forma funcional del factor de Buildup mostrando que crece exponencialmente con el incremento del grosor para arena con densidad uniforme.

1. Introducción

En los últimos años se ha investigado la forma de aplicar la física nuclear al estudio del suelo para facilitar la detección de objetos que se encuentren en él, por ejemplo, piezas arqueológicas, tuberías, minerales y minas antipersonas [1,2,3,4,5]. En la interacción de la radiación γ con el suelo la atenuación de la intensidad y las dispersiones que ocurren cuando la radiación atraviesa un material nos dan información acerca de la composición del suelo. Si logramos comprender el comportamiento de estos fenómenos podremos aprovechar toda la información y mejorar la adquisición de imágenes de los objetos enterrados, objetivo de varias investigaciones en la actualidad [5].

Para comprender adecuadamente la forma funcional de la atenuación de la radiación γ en su paso por el suelo, es importante considerar que los fotones que luego de interactuar con el suelo y salir del haz, eventualmente son dispersados una o más veces y luego logran traspasar el suelo contribuyendo así a la intensidad transmitida o retrodispersada según sea el caso. Esta consideración es descrita por el factor de *Buildup*. Para determinar este factor en la arena se realizan experimentos de transmisión con y sin coincidencias. Se trabaja con un fuente de ^{22}Na que decae por emisión de partículas β^+ (ver Figura 1), que

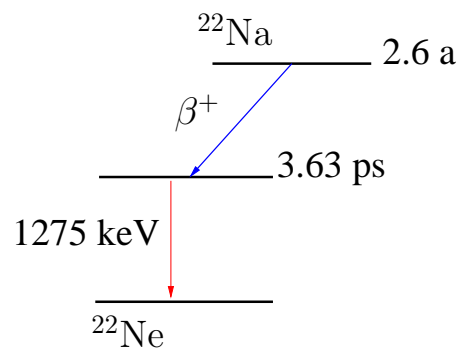


Figura 1: Esquema de decaimiento del ^{22}Na .

rápida y se aniquilan con electrones del medio generando dos rayos γ de 511 keV que son emitidos en direcciones opuestas por conservación del momento.

En los experimentos realizados se varía el grosor del suelo paulatinamente para encontrar el

coeficiente de atenuación lineal, con éste y con la cantidad de radiación total transmitida se encuentra cómo es el comportamiento funcional tanto de la intensidad luego de atravesar el suelo como del Buildup a medida que se aumenta el grosor para cada humedad.

2. Paso de la radiación γ a través de la materia

Cuando la radiación γ interactúa con la materia ocurren principalmente 3 fenómenos, el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares. *El efecto fotoeléctrico* ocurre cuando en el paso de un fotón a través de algún material, un electrón absorbe totalmente la energía del fotón, siendo emitido con energía aproximadamente igual a la del fotón inicial. La energía del electrón eyectado es:

$$E = h\nu - \text{B.E.} \quad (1)$$

donde B.E. es la energía de ligadura del electrón.

La *dispersión Compton* ocurre cuando el fotón colisiona elásticamente con los electrones de los átomos del material por el que pasa. El fotón es dispersado en un ángulo θ con respecto a la dirección de incidencia, y a su vez el electrón también se dispersa. Aplicando la conservación del momento y la energía se obtiene que las energías del fotón y del electrón luego de ser dispersados son respectivamente

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)}, \quad \text{y} \quad T_e = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \frac{\gamma(1 - \cos \theta)}{1 + \gamma(1 - \cos \theta)}, \quad (2)$$

donde $\gamma = E_\gamma/m_e c^2$.

Cuando los rayos- γ son retrodispersados, es decir $\theta = 180^\circ$, la energía de los electrones es máxima,

$$T_{e \text{ max}} = E_\gamma \frac{2\gamma}{1 + 2\gamma}. \quad (3)$$

Cuando la retrodispersión ocurre con las paredes del material que rodean al detector, la energía con la que el fotón es detectado es

$$E_{\gamma r} = E_\gamma - T_{e \text{ max}}. \quad (4)$$

3. Transmisión de la radiación

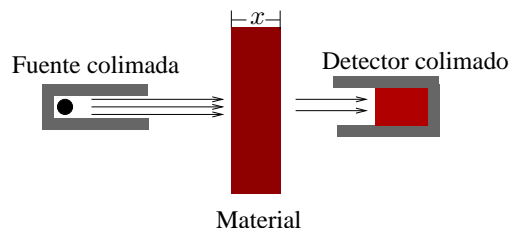


Figura 2: Condiciones de colimación ideales.

Las diferentes formas en que la radiación γ interactúa con la materia ocasionan que la intensidad de la radiación transmitida a través de ella sea atenuada. La transmisión de la

radiación γ a través de algún material en una situación como la que muestra la Figura 2, es descrita en primera aproximación como

$$I_f = I_0 e^{-\mu x}, \quad (5)$$

donde μ es el coeficiente de atenuación lineal dado en unidades de inversas de longitud [L^{-1}] y da cuenta de cuántos fotones interactúan y son absorbidos en la materia por unidad de longitud; x es el grosor del material que atraviesa la radiación, I_0 la intensidad inicial e I_f la intensidad transmitida del fotopico. La ecuación (5), se conoce como la atenuación exponencial de la intensidad [7].

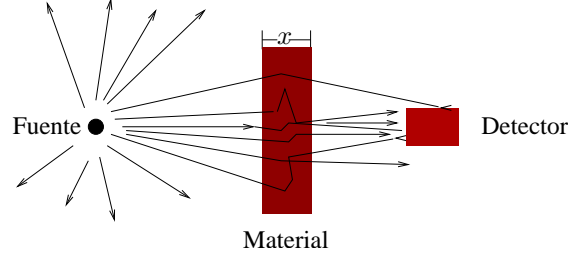


Figura 3: Condiciones reales para la transmisión de la radiación.

La atenuación de la radiación produce que muchos de los fotones que llegan al detector lo hagan con menor energía que los que inicialmente inciden en el suelo, esto se evidencia en la cantidad de cuentas que se ven en los espectros para energías menores a las del fotopico, lo que lleva a que la intensidad del fotopico obtenida sea menor que la intensidad inicial de la fuente. La ecuación (5) asume que los únicos fotones que se transmiten son los que pasan sin interactuar con la materia, ésto sólo se acerca a la realidad en el caso en el que el haz esté bien colimado y que la distancia entre el detector y la fuente sea corta, es decir, del mismo orden de magnitud que el camino libre medio para un rayo γ de determinada energía en determinado material, tal como lo muestra la Figura 2. Surge entonces la necesidad de introducir un factor en la ecuación (5) que dé cuenta de los fotones que luego de ser dispersados una o más veces son detectados, como se esquematiza en la Figura 3. La intensidad total transmitida queda descrita entonces como

$$I_T = I_0 B(\rho, x, E_\gamma) e^{-\mu x}, \quad (6)$$

donde B es llamado el factor de Buildup. Investigaciones anteriores [6] muestran que la forma funcional del Buildup en el tipo de geometría descrito en la Figura 3 puede ser

$$\ln B = a_0 + a_1 M + a_2 M^2, \quad (7)$$

donde $M = \mu x$. Los coeficientes de la ecuación (7) se determinan en este trabajo. B , al igual que μ , depende de la energía del rayo γ , de la densidad del material ρ y adicionalmente depende de la cantidad de materia que el fotón deba atravesar y de la configuración geométrica en la que se encuentre.

4. Montaje Experimental

Para estudiar el factor del Buildup de la arena se utilizó un montaje que permitiera variar el grosor de la arena. Éste consta de una fuente de ^{22}Na , un detector de plástico y uno de GeHP conectados en coincidencias temporales, y un sistema de adquisición de datos. La configuración se muestra en la Figura 4.

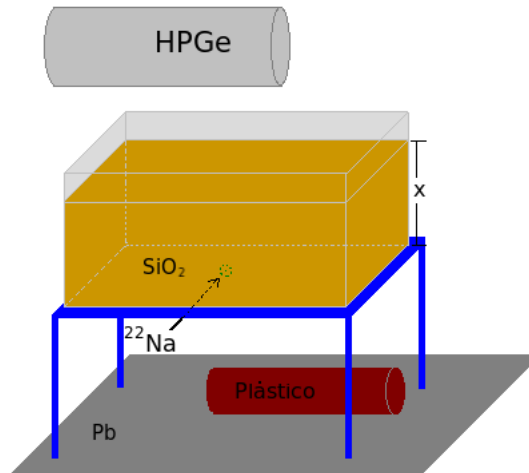


Figura 4: Montaje experimental.

4.1. Detectores

Los detectores plásticos son detectores de centelleo cuyo funcionamiento consiste en que cuando llega radiación al cristal, los electrones de los átomos se excitan subiendo de nivel; cuando los electrones vuelven a su estado inicial emiten energía en forma de luz. La luz que se emite llega a un fotomultiplicador que la convierte en corriente eléctrica, y de allí llega al preamplificador. La anchura temporal de los pulsos que generan estos detectores son del orden de los ns, y el tiempo de subida es siempre el mismo [6]. Estos detectores tienen buena eficiencia pero no muy buena resolución de energía.

Los detectores de Ge tienen un cristal semiconductor que contiene impurezas para generar en él una distribución de carga y por ende una zona de agotamiento que se amplía cuando al cristal se le aplican diferencias de potencial. Cuando la radiación llega a la zona de agotamiento rompe enlaces generando pares electrón-hueco generando una corriente que luego es conducida a un preamplificador. Los pulsos generados por estos detectores son del orden de los μs y tienen tiempos de subida dependiendo de a qué parte de la zona de agotamiento llegue el fotón [6]. Estos detectores tienen muy buena resolución de energía y es por eso que usamos este detector para formar los espectros que se van a analizar.

4.2. Electrónica

La configuración electrónica que permitió hacer las coincidencias se esquematiza en la Figura 5. Los módulos que se usaron son tipo NIM.

Del detector de Ge se usan dos salidas: la temporal y la de energía. La señal temporal

del preamplificador llega al TFA (Timing Filter Amplifier) donde a las señales principalmente se les reduce el ancho y se hace que tengan aproximadamente un mismo tiempo de subida, del orden de los ns. El pulso que sale del TFA llega al CFD (Constant Fraction Discriminator). Como los pulsos que llegan al CFD tienen el mismo tiempo de subida pero diferente altura en voltaje dependiendo de la energía del fotón detectado, éste modulo activa un pulso cuando la señal alcanza cierta fracción constante de la altura, haciendo que el tiempo de activación para generar el pulso de salida sea el mismo para todas la señales. Adicionalmente el CFD lo usamos para seleccionar los pulsos mayores a un umbral que se fija dependiendo de la energía con la que se trabaje. Del CFD el pulso llega al Majority Logic.

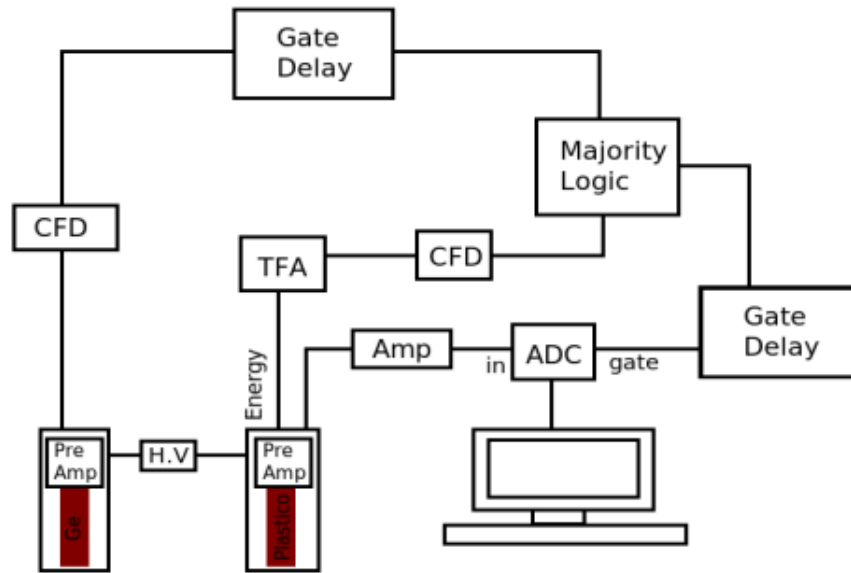


Figura 5: Diagrama de bloques del sistema de electrónica usado para los experimentos con coincidencias.

El detector plástico forma señales rápidas del orden de los ns, señales que salen de un preamplificador sensible a carga. Debido a que las señales del detector de Ge son más lentas que las del plástico, las señales que salen del plástico van a un CFD y de ahí al Gate Delay Generator. El Gate Delay Generator retarda y ensancha las señales, en este montaje el módulo genera un pulso de 300 ns de ancho. El pulso que sale del Gate Delay llega al Majority Logic.

El Majority Logic es un módulo que permite hacer coincidencias de las dos señales que vienen de los dos detectores generando un pulso cuando hay coincidencia, este pulso sale hacia el gate del ADC (Analog-to-Digital Converter).

La señal de energía del Ge que va del preamplificador al amplificador, donde se amplifica y de donde sale con forma triangular (reduciendo el ancho de la señal), entra luego al 'in' del ADC. Cuando hay coincidencias la señal que viene del Majority Logic es retardada para que coincida en el ADC con el pulso que viene del Ge, la señal también se ensancha

algunos los μs , ya que el pulso que viene del aplicador tiene un ancho de este orden debido a que el detector de Ge genera señales lentas como ya se había dicho. El ADC finalmente analiza el pulso de energía del Ge para formar los espectros de coincidencias.

Con el uso de las coincidencias se busca obtener espectros en los que solamente sea detectada la radiación transmitida de 511 keV asumiendo idealmente que habrá coincidencia sólo cuando dos rayos γ de dicha energía lleguen simultáneamente a los dos detectores

La configuración usada para hacer los experimentos de transmisión sin coincidencias se muestra en la Figura 6.

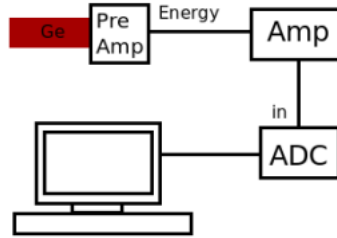


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema de electrónica usado para los experimentos sin coincidencias.

5. Resultados

Para poder determinar los factores de Buildup se deben sumar las cuentas totales y las cuentas del fotopico. Los espectros de transmisión para una fuente de ^{22}Na tienen dos picos de energía, uno de 511 y otro de 1274.5 keV, pero como en este trabajo sólo hay interés en el análisis para la primera energía se debe sustraer del espectro resultante las cuentas debidas a la energía de 1274.5 keV.

Ajustando la gaussiana del pico de 511 keV se obtiene el centroide E_γ para cada una. Ahora, para hallar las cuentas totales primero se suman las cuentas del espectro en todo el rango de energía desde 0 hasta 1400 keV, luego se obtiene un promedio de la región Compton del gamma de 1274.5 keV entre $E_\gamma - 4\sigma$ del pico de aniquilación y 850 keV que es donde la región Compton tiene un comportamiento aproximadamente constante. Este promedio se resta a las cuentas del espectro para cada canal con el fin de obtener solamente el espectro del pico de 511 keV.

Luego de obtener únicamente el espectro del pico de 511 keV, se obtienen las cuentas del fotopico, sumando las cuentas de cada canal a partir de $E_\gamma - 4\sigma$ hasta $E_\gamma + 4\sigma$, y las cuentas totales sumando desde 0 hasta $E_\gamma + 4\sigma$.

Para hacer los respectivos análisis es necesario hallar el coeficiente de atenuación lineal μ . Con este fin se grafica en escala semilogarítmica como se muestra en la Figura 7 la suma de las cuentas del fotopico en función del grosor x y se ajusta una recta cuya pendiente determina el valor de μ . Los resultados para cada humedad se muestran en la Tabla 1.

Para encontrar el μ del NIST adecuadamente, se realizó una prueba de fluorescencia de rayos X a una muestra de la arena con la que se trabajó. Dicha prueba determina

exactamente la composición de la muestra. El resultado se muestra en la Tabla 2.

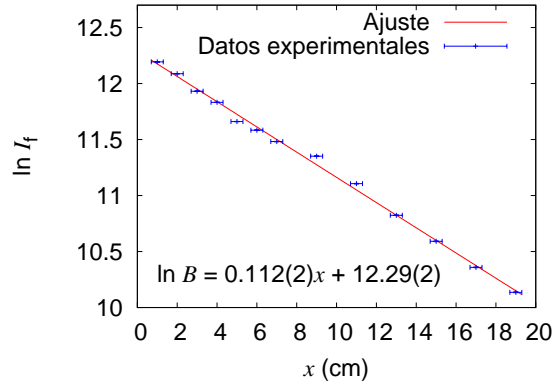


Figura 7: $\ln I_f$ vs. grosor, con el ajuste que permite hallar μ para el caso de arena al 5% de humedad con coincidencias.

	Densidad (g/cm ³)	μ del NIST (cm ⁻¹)	Con coincidencias		Sin coincidencias	
			μ exp. (cm ⁻¹)	Δ % respec- to al NIST	μ exp. (cm ⁻¹)	Δ % respec- to al NIST
Arena Seca	1.7(3)	0.15(3)	0.141(1)	6.0 %	0.1335(5)	11.1 %
Arena al 3% H ₂ O	1.1(2)	0.09(2)	0.089(1)	1.1 %	0.092(1)	2.2 %
Arena al 5% H ₂ O	1.4(3)	0.12(3)	0.112(2)	6.6 %	0.1119(7)	6.7 %
Agua	1	0.0947(5)	0.0931(5)	1.7 %	0.0927(6)	2.1 %

Tabla 1: Coeficientes de atenuación lineal.

El 2.02 % que falta corresponde a compuestos orgánicos, los cuales no aparecen ya que la técnica de fluorescencia de rayos X no permite identificarlos.

5.1. Espectros sin coincidencias

Los espectros obtenidos en este caso se muestran en la Figura 8, se puede ver un aumento de las cuentas en la región entre 0 y el pico de retrodispersión en 170 keV, y la disminución en la región entre el pico de retrodispersión y el borde Compton en 341 keV a medida que se incrementa del grosor del suelo.

La región entre 170 y 341 keV corresponde a los fotones que llegan después de ser dispersados sólo una vez en el suelo, y la región comprendida entre 0 y 170 keV corresponde a los fotones que después de ser dispersados varias veces en el suelo llegan al detector.

Que las cuentas en la región entre 0 y 170 keV aumenten con el incremento del grosor del suelo permite concluir que el Buildup efectivamente tiene en cuenta las múltiples dispersiones de la radiación en la materia ya que es en esta región donde más aumenta la

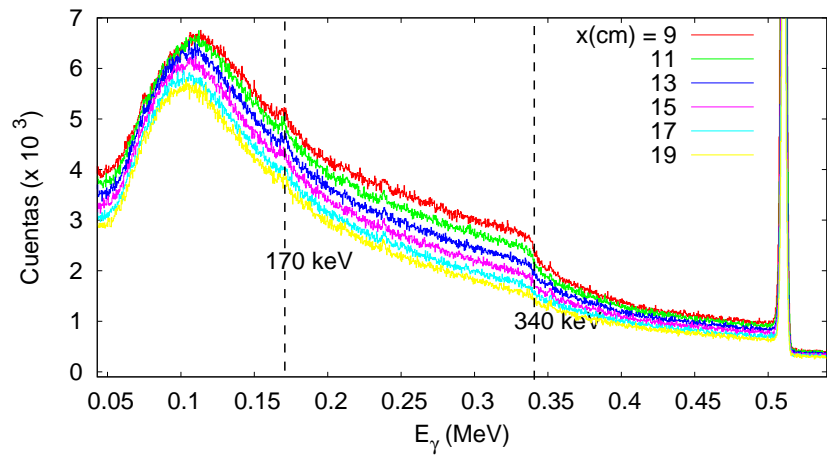
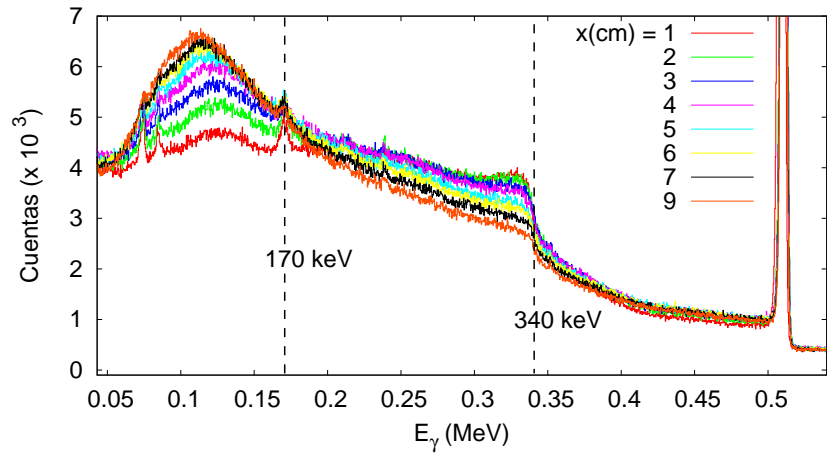


Figura 8: Espectros de transmisión sin coincidencias para arena al 5% de humedad durante 30 minutos.

Elemento y/o Compuesto	Arena % en peso
SiO ₂	96.18
Al ₂ O ₃	1.21
TiO ₂	0.23
Fe ₂ O ₃	0.19
CaO	0.05
K ₂ O	0.05
Na ₂ O	0.04
P ₂ O ₅	0.03
Zr	216 ppm
S	37 ppm
Sr	28 ppm
Ni	24 ppm
Zn	15 ppm
Pb	11 ppm
Rb	9 ppm

Tabla 2: Composición de la muestra de arena empleada.

intensidad.

El incremento en la intensidad de transmisión tiene un límite alrededor de los 9 cm, este hecho implica que la atenuación lineal tiene más peso que el Buildup para grosores mayores que 9 cm, es por eso que en toda la región Compton las cuentas disminuyen a partir de éste límite.

5.2. Espectros con coincidencias

Se aprovecha la aniquilación generada en el decaimiento de la fuente de ²²Na para hacer medidas en coincidencias. Cuando un fotón es detectado por uno de los detectores y simultáneamente otro fotón de cualquier energía llega al otro detector, hay una coincidencia. El registro del que llega al detector de germanio es el que se tiene en cuenta para el análisis ya que es éste el que se transmitió. Los espectros obtenidos con coincidencias se muestran en la Figura 9, en ella se ve que las coincidencias logran dar resultados de experimentos que se asemejan al caso ideal, en los que la atenuación de la intensidad del fotopico es debida solamente a la absorción de la radiación por unidad de longitud en el suelo. Sin embargo, la aproximación del experimento al caso ideal no se obtiene en su totalidad ya que se alcanza a ver la contribución a la intensidad total de los fotones que se dispersan en ángulos pequeños y de los que se dispersan varias veces dentro del detector en la región comprendida entre el borde Compton y el fotopico.

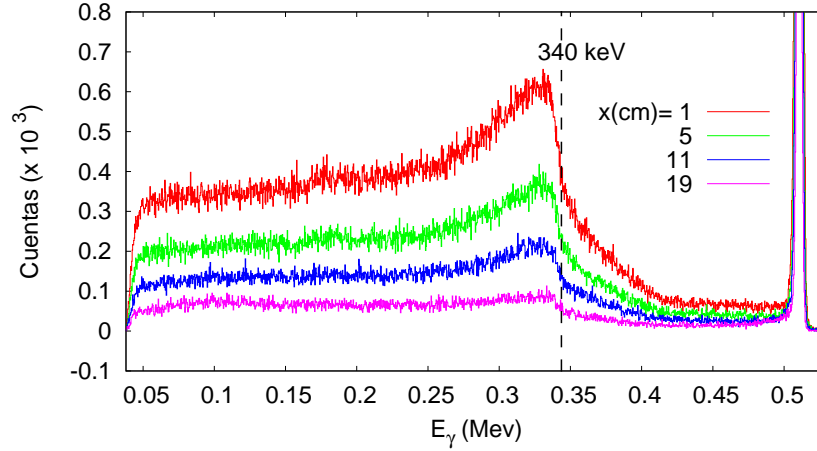


Figura 9: Espectros de transmisión con coincidencias para arena al 5 % de humedad durante 30 minutos.

5.3. Buildup

Usando la ecuación (5) y la (6) resulta que el Buildup se puede calcular así:

$$B = \frac{I_T}{I_f}. \quad (8)$$

Ajustando la ecuación (7) a los cálculos hechos con la ecuación (8) como la muestra la Figura 10, se obtienen los coeficientes que se resumen en la Tabla 3.

Material	Con coincidencias		Sin coincidencias	
	a_1	a_2	a_1	a_2
Agua	-0.003(2)	0.0009(9)	0.085(3)	-0.0005(1)
Arena al 3% H ₂ O	-0.05(6)	0.07(3)	0.89(2)	-0.068(7)
Arena al 5% H ₂ O	-0.007(9)	0.041(5)	1.02(4)	-0.11(2)
Arena Seca	0.11(3)	0.00(1)	0.85(2)	-0.057(7)

Tabla 3: Coeficientes del Buildup.

En la Tabla 3 se observa que para el caso sin coincidencias hay una diferencia de un orden de magnitud entre a_1 y a_2 , y que en el caso con coincidencias no hay diferencia característica entre estos dos coeficientes.

El comportamiento funcional de Buildup gráficamente se ve en la Figuras 10, se ve que los comportamientos son muy diferentes en magnitud y que el comportamiento lineal es más notorio que el cuadrático en ambos casos.

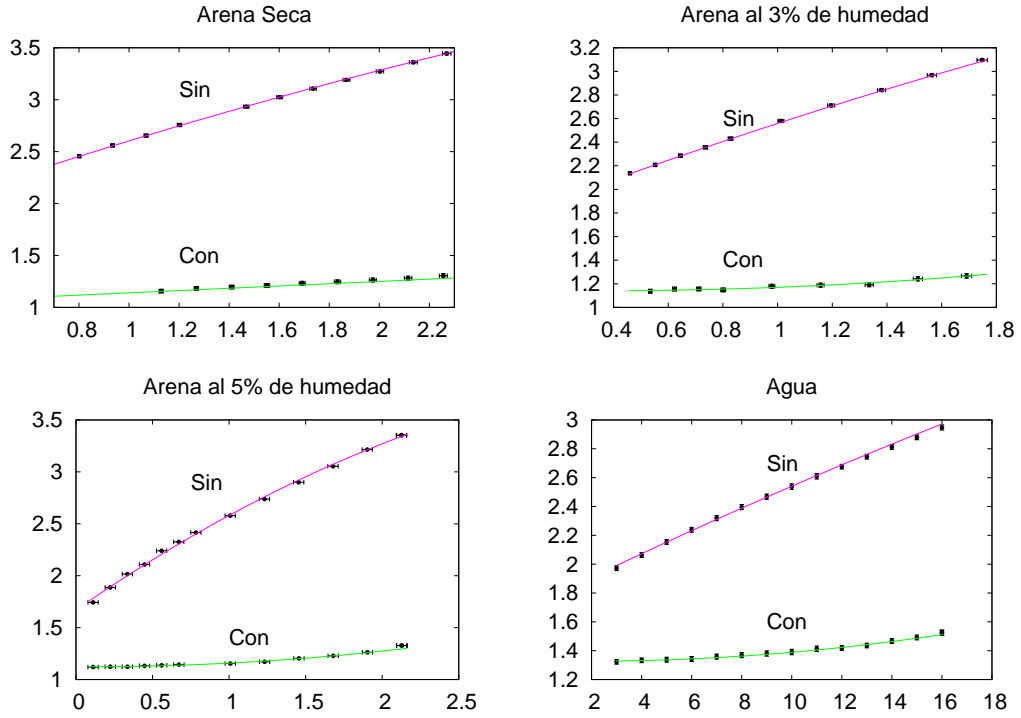


Figura 10: $\ln B$ en función de M para diferentes humedades.

La Figura 11 muestra la intensidad del fotopico y la intensidad total transmitidas para arena al 3% de humedad. La línea continua en el caso de I_f es el ajuste de la suma de las cuentas del fotopico en función de x , cuya pendiente es la que está en la Tabla 1. La línea continua en el caso de I_T es el cálculo de la intensidad total utilizando el ajuste de I_f mostrado de color verde y el cálculo del buildup hecho con la ecuación 8. Se puede ver en la Figura 11 que la contribución del buildup es muy importante para la intensidad total transmitida en comparación con sólo la contribución de I_f .

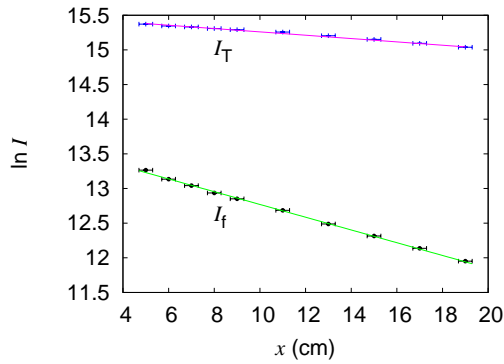


Figura 11: I_f e I_T en función de x para arena al 3% de humedad.

6. Conclusiones

La marcada diferencia entre los espectros obtenidos con y sin coincidencias en la región Compton, más los resultados sin coincidencias de la Tabla 3, muestran que el coeficiente a_1 es el que da cuenta de las múltiples dispersiones que ocurren en el suelo, es decir que el comportamiento funcional del $\ln B$ es principalmente lineal con μ y ρ , y que la dependencia cuadrática con estos parámetros representada por a_2 da cuenta de las coincidencias accidentales y del Buildup dentro del detector.

Referencias

- [1] Johansen, G.A. *Nuclear tomography methods in industry*, Nuclear Physics A752 (2005)696c-705c.
- [2] Evans, B. L., et al, *Nondestructive Inspection Using Compton Scatter Tomography*, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 45, No 3, June 1998, pag 950-956.
- [3] Silva, I.L.M., et al, *Tube defects inspection technique by using Compton gamma-ray backscattering*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 422 (1999)957-963.
- [4] Cortés, Martha Liliana, *Study of gamma backscattering in a multielemental medium*, Trabajo de grado, universidad nacional de Colombia (2007)
- [5] Cortes, M.L., Cristancho F., *Estudio de la retrodispersión de rayos gamma en un medio multielemental* Rev. Col. Fís. 41 491(2009).
- [6] Oliveira, C. and Salgado, J. *Design and calibration of a gamma ray transmission density probe*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 260 (1987)276-279.
- [7] Leo, W.R. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1994.
- [8] Knoll, G.F. *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, 2000.