



Estudio de materiales de construcción a partir de simulación Monte Carlo, transmisión y retrodispersión de rayos gamma.

Edisson Leonardo Peralta Bernal.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física.
Bogotá, Colombia
2020

Estudio de materiales de construcción a partir de simulación Monte Carlo, transmisión y retrodispersión de rayos gamma

Edisson Leonardo Peralta Bernal

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Físico

Director:

Ph.D. Fernando Cristancho Mejía

Línea de Investigación:

Física Nuclear

Grupo de Investigación:

Grupo de Física Nuclear de la Universidad Nacional de Colombia (GFNUN)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2020

A mis padres.

En memoria de Yeisson Peralta.

Agradecimientos

Principalmente a mis padres y a mis hermanas, cuyo apoyo incondicional hizo posible este documento e investigación. Al profesor Fernando Cristancho, mi director, quien me guió y asesoró a lo largo de este proceso de aprendizaje. A Freddy Alexander Torres, quien me prestó ayuda y apoyo en momentos determinantes. Al grupo de física nuclear GFNUN, por acogerme con agrado como uno mas de ellos. Y finalmente a mis amigos, quienes de una u otra manera me han apoyado y brindado su ayuda sin interés alguno.

Resumen

Los morteros, son una parte fundamental a la hora de hacer edificaciones, por ende, es muy importante conocer sus propiedades físicas. En aras de estudiarlas, se realizaron una serie de simulaciones en Geant4 que permiten determinar el coeficiente de atenuación en transmisión, y retrodispersión de rayos gamma en varios tipos de morteros (mezclas de cemento y arena), fabricados sin ningún tipo de reglamentación oficial. Sin embargo, se detalla su elaboración, con el fin de lograr reproducibilidad en futuras investigaciones. Usando los coeficientes de trasmisión encontrados se encuentra la dependencia de estos con respecto a la energía. Adicionalmente usando el coeficiente de atenuación de retrodispersión se pone en práctica un método que permite detectar anomalías (huecos o agujeros) en el interior de los morteros.

Abstract

Mortars are a fundamental part when making buildings, therefore, it is very important to know their physical properties. In order to study them, a series of simulations were carried out in Geant4 that allow determining the transmission attenuation coefficient and backscattering of gamma rays in various types of mortars (cement and sand mixtures), manufactured without any type of official regulation. However, its elaboration is detailed, in order to achieve reproducibility in future research. Using the transmission coefficients found, the dependence of these with respect to energy is found. Additionally, using the backscatter attenuation coefficient, a method is put into practice that allows detecting anomalies (voids or holes) inside mortars.

Índice general

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
1 Efectos relevantes de la física de rayos gamma.	1
1.1 Emisión gamma	1
1.2 Efecto fotoeléctrico.	1
1.3 Efecto Compton.	3
1.4 Producción de pares.	4
1.5 Transmisión.	5
1.6 Retrodispersión.	6
1.7 Método Monte Carlo.	8
1.8 Geant4.	8
2 Aspectos generales de los Morteros.	9
2.1 Características.	9
2.2 Construcción.	12
3 Simulación en Geant4.	14
3.1 Transmisión.	14
3.2 Retrodispersión.	18
4 Método diagnóstico.	22
4.1 Procedimiento y análisis.	22
5 Conclusiones y recomendaciones	28
5.1 Conclusiones	28
5.2 Recomendaciones	29
Bibliografía	30

1 Efectos relevantes de la física de rayos gamma.

En este capítulo se describen algunos aspectos generales de los rayos gamma, entre los cuales se encuentra su producción y principales formas de interacción. También se describen los dos métodos utilizados, los cuales son transmisión y retrodispersión. Por otro lado, se da una breve explicación acerca del método Monte Carlo y del conjunto de herramientas llamado Geant4 utilizado para realizar las simulaciones.

1.1. Emisión gamma

En esta, a diferencia de los decaimientos alfa, beta o emisión espontánea no hay ningún cambio en la cantidad de nucleones en el núcleo, es decir, tanto N como A se mantienen. Como se puede inferir, no hay transmutación de elementos. Esta emisión consiste únicamente en perder energía de excitación, que por lo general queda después de un decaimiento alfa o beta. La radiación gamma es electromagnética, así como la luz visible, microondas y ondas de radio. Todas estas conforman el espectro electromagnético. Los gammas se encuentran en el sector más energético del espectro, por ende su longitud de onda es la más pequeña.

1.2. Efecto fotoeléctrico.

Este efecto consiste en lo siguiente, un fotón sufre una interacción con un átomo, en esta el fotón desaparece por completo. Posteriormente es expulsado un fotoelectrón de las capas superiores. Algo importante que vale la pena destacar es que la interacción mencionada se da con el átomo como un todo. La energía del fotoelectrón expulsado es $E_e = E_\gamma - E_b$, donde E_γ es la energía del rayo gamma incidente y E_b es la energía que mantiene al electrón ligado a su nivel de energía [1].

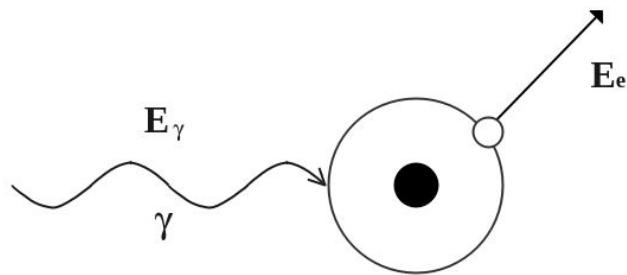


Figura 1-1: Gráfica que representa el efecto fotoeléctrico.

Luego de esto, el átomo queda en un estado excitado ya que posee un exceso de energía E_b . Para quedar nuevamente en su estado de equilibrio es necesario que ocurra una de las dos posibilidades. La primera consiste en que la energía se redistribuye entre los electrones existentes, lo que puede llevar a una liberación masiva de electrones del átomo; a esto se le conoce como cascada Auger. La segunda radica en que el hueco dejado por el fotoelectrón es llenado por un electrón de mayor energía, esto conlleva a una emisión de un rayo X que se conoce como fluorescencia de rayos X [2].

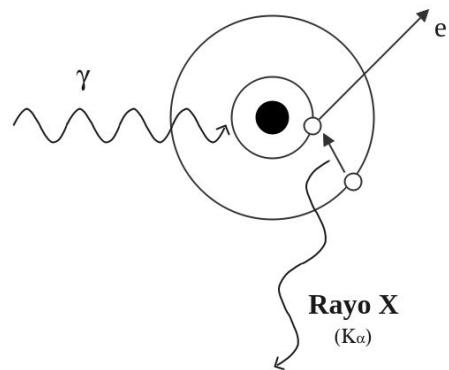


Figura 1-2: Fluorescencia de rayos X.

1.3. Efecto Compton.

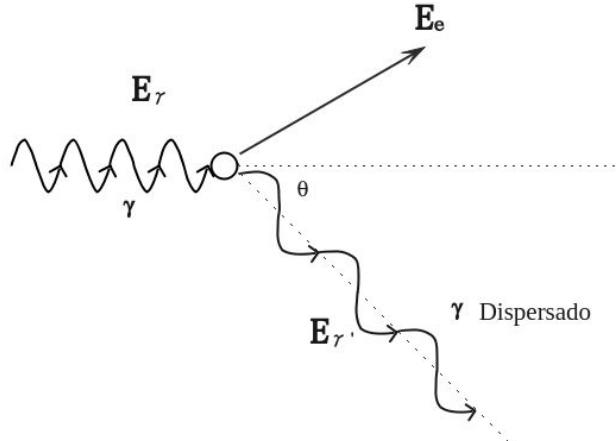


Figura 1-3: Efecto Compton.

Se da cuando un rayo gamma interactúa con un electrón, transfiriéndole parte de su energía. Luego de la interacción tanto el rayo gamma como el electrón cambian su trayectoria. Por el principio de la conservación de la energía, se llega a que después del choque el electrón tendrá la energía;

$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}; \quad \text{o escrito de otra manera,}$$

$$E_e = E_\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{1 + E_\gamma(1 - \cos\theta)/m_e c^2} \right\}. \quad (1-1)$$

Como se puede ver, la cantidad de energía transferida al electrón depende del ángulo de dispersión (scattering). Adicionalmente, bajo ninguna circunstancia el total de la energía del fotón es transferida al electrón, no obstante, la máxima energía transferida al electrón se logra cuando $\theta = 180^\circ$.

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \epsilon) = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \epsilon(1 - \cos\theta)]^2} \left[1 + \cos^2\theta + \frac{\epsilon^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \epsilon(1 - \cos\theta)} \right] \quad (1-2)$$

Finalmente, existe una fórmula que muestra la sección eficaz diferencial de fotones dispersados por un electrón. Esta se conoce como formula de Klein-Nishina, ecuación (1-2), donde r_e es el radio clásico del electrón y $\epsilon = E_\gamma/m_e c^2$ [3] [4].

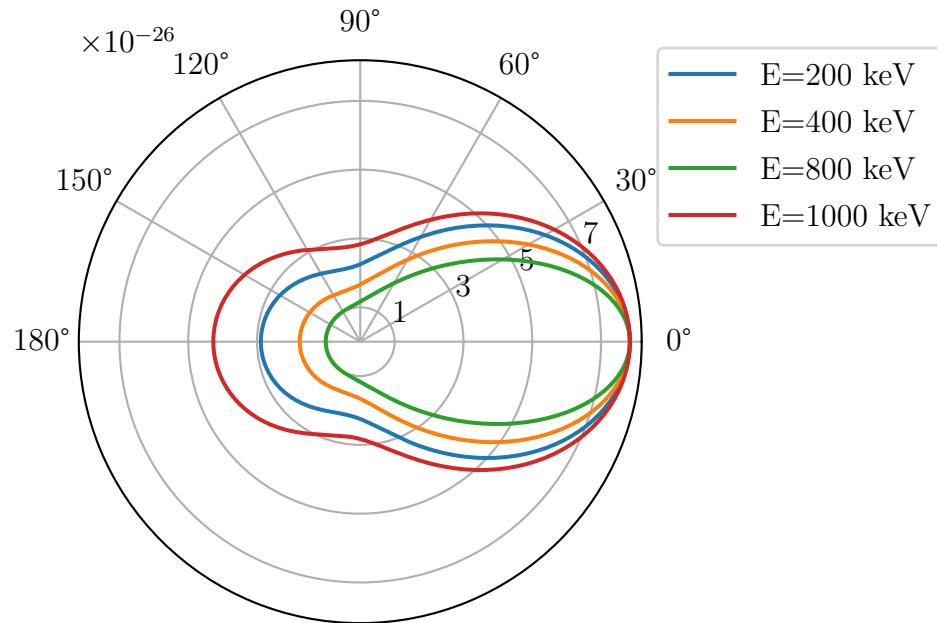


Figura 1-4: Gráfica de la fórmula de Klein-Nishina para varios ángulos.

1.4. Producción de pares.

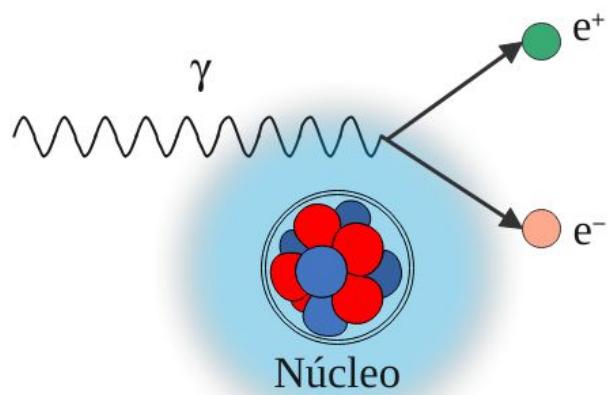


Figura 1-5: Producción de pares.

Este efecto es bastante peculiar, ya que a diferencia de los anteriores, en este el rayo gamma interactúa con el núcleo. Esta interacción tiene lugar en el rango del campo de Coulomb

ocasionado por el núcleo, y tiene como resultado la transformación de un rayo gamma en un par positrón-electrón. Es importante añadir que este efecto solo se da cuando el rayo gamma posee una energía mayor a la masa en reposo de las dos partículas creadas. La masa del electrón y del positrón es de 511 keV, cada una, juntándolas es 1022 keV. Por otro lado, la producción de pares puede ocurrir en el campo del electrón; pero debido intensidad de este, la probabilidad que ocurra es muy baja y el umbral de energía muy grande [1].

1.5. Transmisión.

La probabilidad que un fotón interactue con la materia es la suma de las secciones eficaces de los efectos mencionados anteriores. Esta se escribe como:

$$\sigma = \sigma_F + \sigma_C + \sigma_{P-P}. \quad (1-3)$$

La definición de sección eficaz dice que esta es una medida de la interacción entre partículas disparadas contra un blanco o centro dispersor.

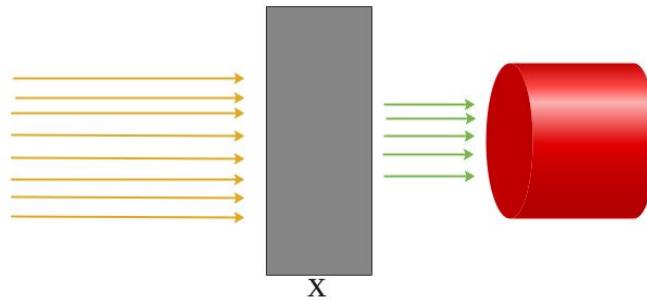


Figura 1-6: Esquema del montaje de transmisión. Rayos amarillos son la intensidad inicial y rayos verdes la intensidad resultante después de atravesar un grosor x.

Si se dispara una determinada intensidad de fotones contra un blanco, muchos de estos, debido a la sección eficaz, van a interactuar con la materia, haciendo que la intensidad inicial disminuya con el grosor del blanco. El parámetro que da información acerca de como disminuye la intensidad con el grosor se conoce como coeficiente de atenuación. Este coeficiente puede ser escrito como:

$$\mu = N\sigma = \left(\frac{N_a \rho}{A} \right) \sigma, \quad (1-4)$$

donde N_a es el número de Avogadro, ρ la densidad del blanco y A el peso atómico. Es necesario mencionar que en este caso se asume un blanco mono-atómico. Si se pasa la densidad al otro lado de la igualdad se tiene:

$$\frac{\mu}{\rho} = \mu_m = \frac{N_a \sigma}{A}, \quad (1-5)$$

la cantidad μ_m se conoce como coeficiente de atenuación másico. En la figura 1-6 se pueden apreciar rayos gamma disparados hacia un material de grosor x , algunos de ellos atraviesan el material, otros no. Lo que implica que la intensidad inicial disminuye. La ecuación que nos da información acerca de como esta disminuye es:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1-6)$$

Donde I es la intensidad que rayos gamma que atraviesa el material y I_0 la intensidad inicial, los demás valores ya fueron descritos previamente.

$$\frac{\mu}{\rho} = \alpha \times E^{-n}; \quad (1-7)$$

Por otro lado, gracias a una gran cantidad de mediciones y observaciones experimentales se encuentra que existe una dependencia de μ con respecto a la energía. Según lo encontrado hasta el momento, está dada por la ecuación 1-7. Esta dependencia no tiene un origen definido, pues aun es objeto de investigación [5].

1.6. Retrodispersión.

Cuando los fotones son dispersados entre los ángulos 90° y 180° por un centro dispersor, se da un efecto llamado retrodispersión. En la figura 1-7 se muestra parte de la forma en que se comportan los fotones. Adicionalmente se muestra la forma del montaje que se emplea para obtener datos a partir de este efecto. Por otro lado, usando la ecuación (1-8) es posible comprender cómo disminuye la intensidad en función del grosor.

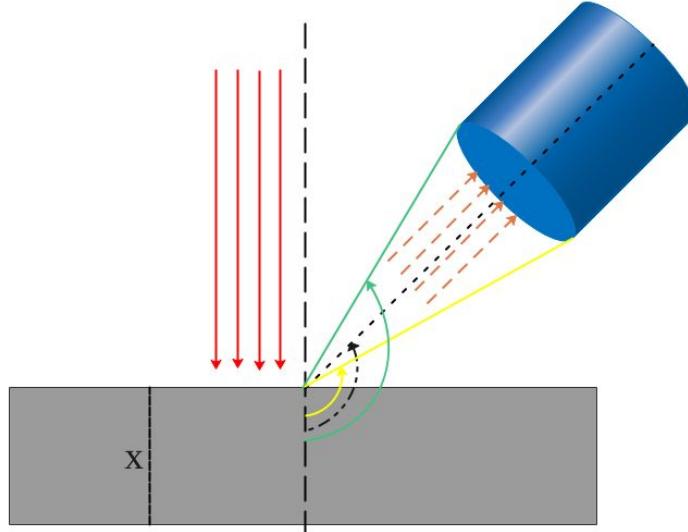


Figura 1-7: Esquema del montaje de retrodispersión. Los rayos rojos con la intensidad inicial, los rayos café son la intensidad resultante. El ángulo central (negro) es la inclinación del detector respecto a la incidencia de los rayos.

Por la forma funcional de esta ecuación, es fácil ver que tiene una asíntota. Dicha asíntota depende del material que se estudie, aunque, en este documento no tendrá gran relevancia. En la referencia [6] se hace la deducción de esta ecuación. Respecto a los parámetros de la ecuación, estos serán explicados a continuación.

$$I_B(x) = i_0[1 - e^{-\mu_T x}] \quad (1-8)$$

De acuerdo a la figura 1-7 se ve que la cara del detector mas próxima al blanco abarca un ángulo sólido, si se ve de perfil, se ven ángulos planos, estos son encontrados por geometría. Usando la ecuación (1-1) se puede encontrar cuál es el rango de energías a las cuales salen dispersados los rayos gamma y llegan al detector. El rango máximo y mínimo se determinan usando los ángulos de color amarillo y verde de la figura 1-7. Una vez encontradas estas energía es posible encontrar su valor de μ asociado, y con estos el valor de μ_T , pues este valor se define como:

$$\mu_T = \mu_1 + \frac{\mu_2}{\cos\theta}, \quad (1-9)$$

donde μ_1 y μ_2 son los valores asociados a la energía mas baja y mas alta, respectivamente, que llegan al detector. Las energías comprendidas entre estos valores se denominará región de interés y θ es el ángulo de inclinación del detector. El valor de i_0 esta relacionado con una serie de constantes que no es necesario mencionar, pues como se verá mas adelante en los experimentos, se realiza una normalización que lo convierte en 1 [6].

1.7. Método Monte Carlo.

Es una técnica numérica utilizada para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios. La efectividad de este método depende en gran medida de un buen generador de números aleatorios, por ende, dicho método tomó importancia a partir de la producción en masa de las computadoras. Pues éstas son buenas generadoras de números aleatorios [7].

1.8. Geant4.

Geant4 [8] es un conjunto de herramientas que se utilizan en el estudio de interacción radiación-materia. Tiene una gran variedad de áreas de aplicación, las cuales incluyen la física de altas energías, nuclear y de aceleradores, así como estudios en ciencias médicas y espaciales [7].

2 Aspectos generales de los Morteros.

2.1. Características.

Como un primer acercamiento al estudio de materiales de construcción se elaboraron 5 lotes de morteros, cuyas composiciones son distintas. Inicialmente cada lote consta de 4 placas. Es importante mencionar que estos no cumplen ningún tipo de reglamentación oficial.

En las simulaciones realizadas para transmisión se colocan 10 placas y para retrodispersión 12.

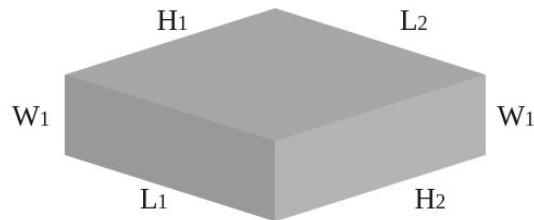


Figura 2-1: Forma de los morteros.

En las siguientes tablas se muestran las dimensiones de las placas correspondientes a cada lote. Estos tienen la forma que se muestra en la figura **2-1**.

Laminas de Morteros 1							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	136.28	9.666	9.745	9.663	9.647	0.886	0.916
2	142.01	9.684	9.714	9.636	9.681	0.858	0.959
3	145.92	9.726	9.572	9.579	9.546	0.880	1.069
4	138.57	9.736	9.704	9.581	9.585	0.934	1.016

Tabla 2-1: Medidas experimentales del lote morteros 1.

Laminas de Morteros 2							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	149.35	9.760	9.706	9.518	9.523	0.757	0.974
2	157.36	9.742	9.753	9.564	9.624	0.955	0.991
3	151.53	9.742	9.722	9.615	9.493	0.923	0.956
4	136.97	9.757	9.794	9.577	9.528	0.871	0.921

Tabla 2-2: Medidas experimentales del lote morteros 2.

Laminas de Morteros 3							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	148.71	9.825	9.820	9.583	9.712	0.975	0.935
2	150.32	9.672	9.616	9.528	9.577	0.968	0.929
3	139.83	9.613	9.640	9.463	9.521	0.949	0.916
4	133.72	9.864	9.839	9.526	9.550	0.852	0.916

Tabla 2-3: Medidas experimentales del lote morteros 3.

Laminas de Morteros 4							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	156.90	9.774	9.804	9.557	9.563	0.938	10.20
2	145.96	9.687	9.653	9.620	9.550	0.914	0.940
3	140.52	9.657	9.693	9.579	9.589	1.079	0.902
4	147.33	9.814	9.772	9.546	9.589	1.075	0.953

Tabla 2-4: Medidas experimentales del lote morteros 4.

Laminas de Morteros 5							
Lamina #	Masa [g]	H1 [cm]	H2 [cm]	L1 [cm]	L2 [cm]	W1 [cm]	W2 [cm]
	(+/- 0.01)	(+/- 0.001)					
1	136.58	9.762	9.734	96.67	96.10	1.009	0.877
2	133.28	9.660	9.646	96.00	96.42	0.850	0.887
3	128.12	9.629	9.673	95.11	95.30	0.927	0.824
4	130.35	9.670	9.677	95.77	96.93	0.869	0.912

Tabla 2-5: Medidas experimentales del lote morteros 5.

Otro dato importante es la densidad del material, por ello se calcula de densidad de los morteros mediante la ecuación (2-1). Es importante mencionar que esta densidad es calculada para todas las placas por mortero, es decir, se tomó un lote y se le calculó el promedio de la masa y de las diferentes dimensiones, y con estos nuevos valores se hizo el cálculo. Este mismo proceso se repite para todos.

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad (2-1)$$

Lote de Morteros	densidad (g/cm ³)
1	1.62(4)
2	1.75(5)
3	1.62(7)
4	1.62(3)
5	1.60(6)

Tabla 2-6: Densidad de los diferentes Morteros.

También es necesario saber cuales son las composiciones y el porcentaje empleado en cada lote, así que en las tablas **2-7**, **2-8**, **2-9**, **2-10** y **2-11** se muestran dichas composiciones. Estas fueron elegidas de acuerdo a la utilidad que tienen en la práctica, por ejemplo, se escogieron las mezclas mas usadas en las construcciones; pues de acuerdo a lo que se desee construir se tiene una u otra mezcla. Todas las características proporcionadas anteriormente son necesarias para construir las placas de morteros en Geant4.

Material Mortero 1	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	320	39.02
Arena Peña	300	36.58
Agua	200	24.34

Tabla 2-7: Proporción porcentual en la elaboración de morteros 1.

Material Mortero 2	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	160	22.53
Arena Peña	450	63.38
Agua	100	14.08

Tabla 2-8: Proporción porcentual en la elaboración de morteros 2.

Material Mortero 3	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	110	15.49
Arena Sílice	500	70.42
Agua	100	14.08

Tabla 2-9: Proporción porcentual en la elaboración de morteros 3.

Material Mortero 4	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	100	10.99
Arena Sílice	700	76.92
Agua	110	12.08

Tabla 2-10: Proporción porcentual en la elaboración de morteros 4.

Material Morteros 5	4 placas	
	g	%
Cemento Portland	600	75
Arena Sílice	0	0
Agua	200	25

Tabla 2-11: Proporción porcentual en la elaboración de morteros 5.

2.2. Construcción.

La variación entre las composiciones es notable, sin embargo, más adelante veremos que las características a estudiar no varían significativamente entre los primeros 4 morteros, pues para el lote 5 las diferencias se hacen notables.

La construcción de los morteros se hizo de la siguiente manera; se toman los materiales y reparten de acuerdo a las proporciones mencionadas en las tablas **2-7, 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11** y se vierten en un recipiente, posteriormente se mezclan. Una vez la mezcla es homogénea, es esparcida en unos moldes previamente hechos. Es importante mencionar que antes de hacer esto, a los moldes se les aplicó una capa de aceite, esto con la idea de evitar que al endurecerse la mezcla fuese imposible retirar las placas sin ser dañadas. El aceite usado fue 4T (4 tiempos), este no altera la composición de los morteros pues no se mezclan.

Una vez hecho esto, se pusieron bolsas plásticas sobre el cemento preparado. De esta manera se mantiene la humedad, y así obtener placas con buena resistencia y mantener su integridad estructural intacta. En las construcciones, luego de hacer columnas, planchas, pisos y demás, es costumbre aplicar agua a estas con el fin de mantener la integridad de dichas estructuras. Por alguna razón que aún no se sabe, si no se hace esto empiezan a aparecer una serie de grietas visibles en la superficie. Este fenómeno se presenta principalmente en los pisos, planchas y pañetes.

Después de los procesos mencionados, se dejaron secar en el laboratorio por 3 días. Fueron 3 días porque no se tenía ingreso a la UN días antes. Es importante mencionar que al ser piezas pequeñas no requieren de tanto tiempo para secarse y endurecerse. Pasados estos días, se procedió a sacar las placas de los moldes. Se lograron extraer sin mayores complicaciones. Ya retiradas se midió el grosor y lados a cada una de ellas, pues aunque los moldes tienen medidas bien definidas, durante la elaboración y secado es posible que las dimensiones se alteren. En las imágenes se muestra en proceso descrito anteriormente.



Figura 2-2: Elaboración de la mezcla.



Figura 2-3: Distribución de la mezcla en los moldes.



Figura 2-4: Placas listas para extraer.



Figura 2-5: Resultado final.

3 Simulación en Geant4.

De acuerdo a las composiciones y dimensiones de los morteros, estos son construidos en Geant4 y se procede a hacer las simulaciones correspondientes.

3.1. Transmisión.

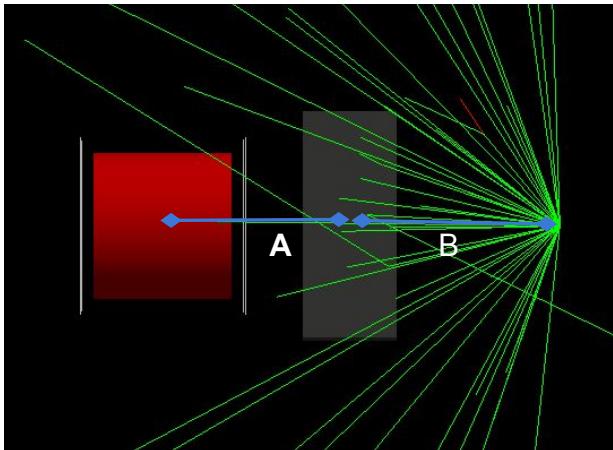


Figura 3-1: Montaje de transmisión en Geant4. distancias

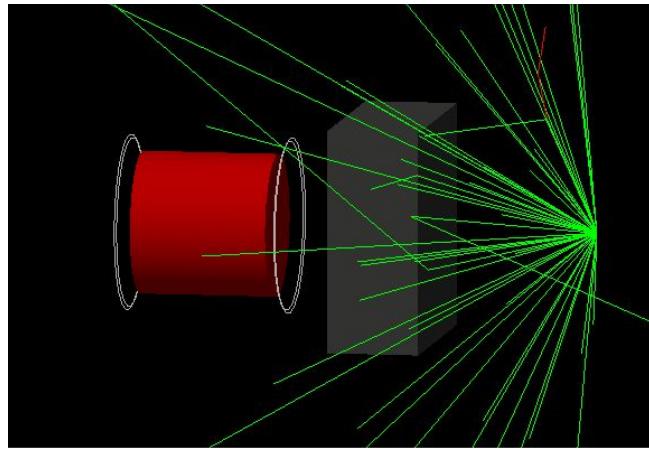


Figura 3-2: Montaje de transmisión en Geant4. Vista diagonal.

En las figuras 3-1 y 3-2 se puede apreciar el montaje construido en Geant4 para hacer la transmisión de rayos gamma en los distintos morteros. El cilindro de color rojo es el detector de Ge-HP utilizado, el mortero es la caja de color gris y las líneas verdes son los rayos gammas expedidos de las fuentes usadas. En la figura 3-1 se logran ver dos distancias destacadas, las cuales son bastante relevantes. $A + B$ (11 cm) y A es constante, por ende B no lo es, esto se debe a que se incrementa el grosor de la muestra para cada medición. La primera medición se hace sin placa, es decir, se mide I_0 , luego se empieza a aumentar el grosor centímetro por centímetro ya que la idea es simular que para cada medición se agrega una placa.

Las energías utilizadas en la simulación son (picos de izquierda a derecha) 81 keV, 122 keV, 356 keV, 511 keV, 662 keV, 1173 keV, 1273 keV y 1332 keV. Se usaron estas ya que en el laboratorio se tienen fuentes de ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{57}Co y ^{22}Na las cuales emiten fotones a las energías mencionadas.

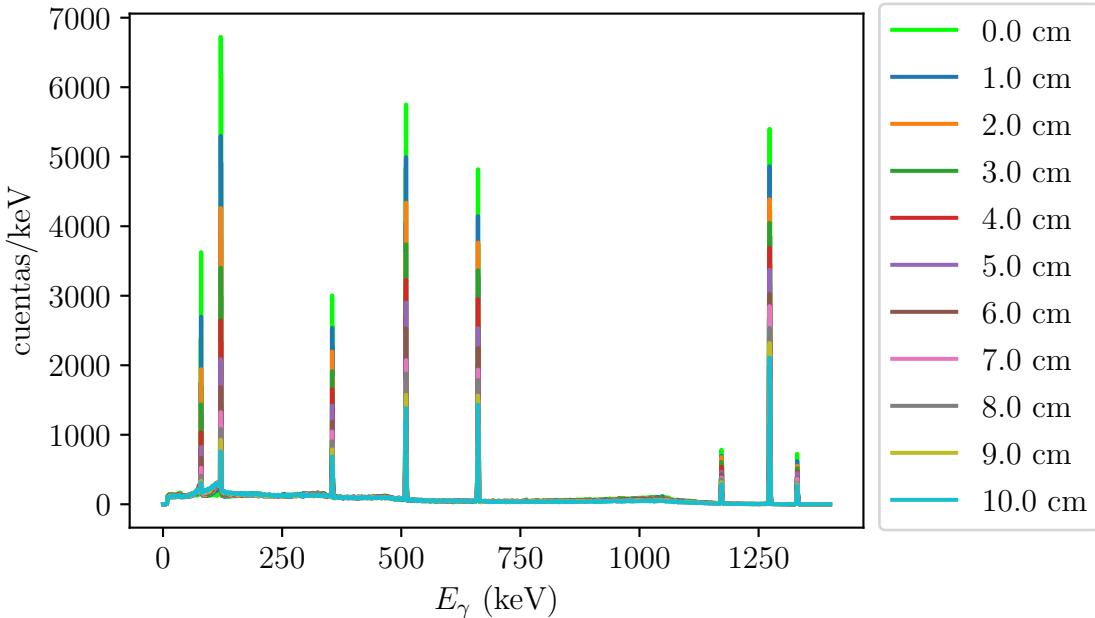


Figura 3-3: Espectro de 10 láminas de Morteros1. Transmisión

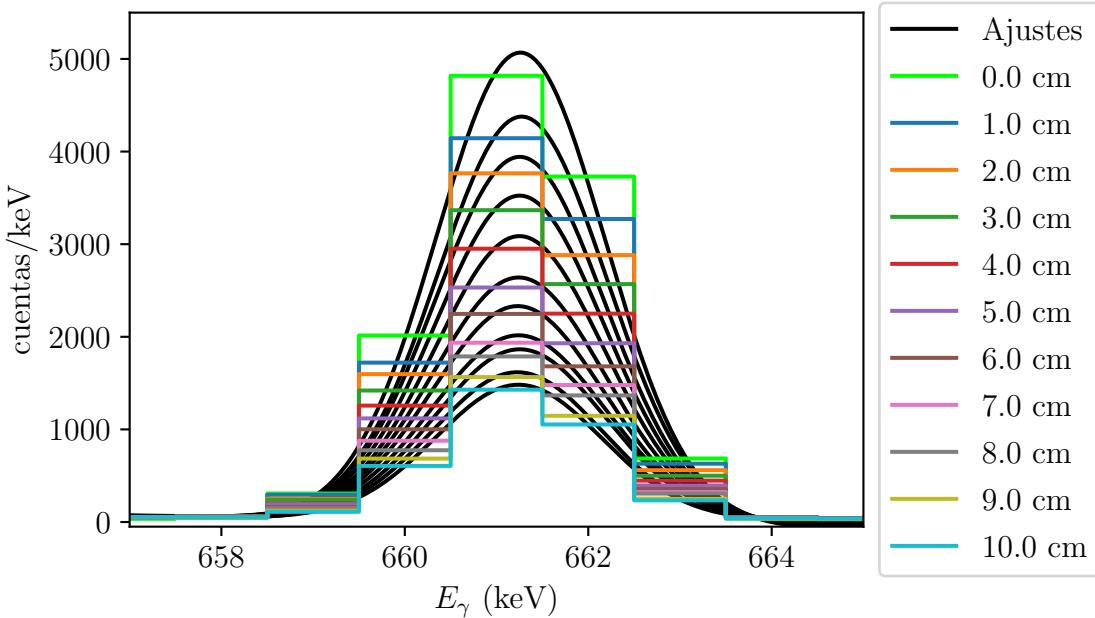
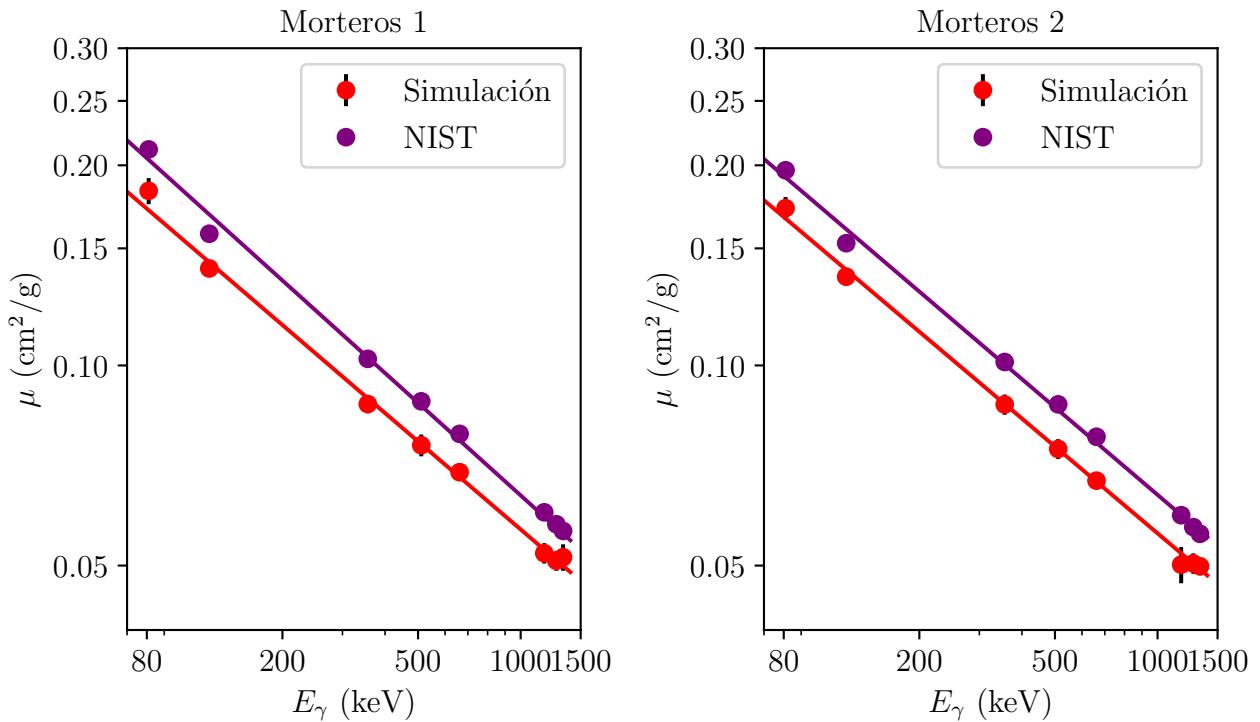


Figura 3-4: Ajustes realizados para los fotopicos. Morteros1.

Se obtienen 5 conjuntos de espectros en total, uno para cada lote de morteros, pero solo es necesario mostrar uno de ellos, pues los demás son similares y aportan muy poca información.

Las alturas son distintas ya que las actividades de las fuentes son distintas. Como se puede ver en la figura 3-3, cuanto mas grueso el material, la intensidad disminuye. Esto se debe a que obedece la ecuación 1-6, donde I_0 es la intensidad inicial, μ el coeficiente de atenuación y x el grosor del material. Esta ultima es la variable, en el presente texto será llamada t [4]. El valor de μ es encontrado para cada fotopico usando un ajuste Gaussiano como el de la figura 3-4. Ya que gracias a este se encuentran las distintas intensidades, con ellas se hace un ajuste y se encuentra el valor de μ .

Es fácil ver que se tendrán 8 valores, pues se tendrá uno para cada fotopico. Una vez encontrados los valores de μ , se realiza un ajuste que tiene la forma de la ecuación (1-7). Estos valores de α y n proporcionan información acerca de como varía el coeficiente de atenuación másico en función de la energía.



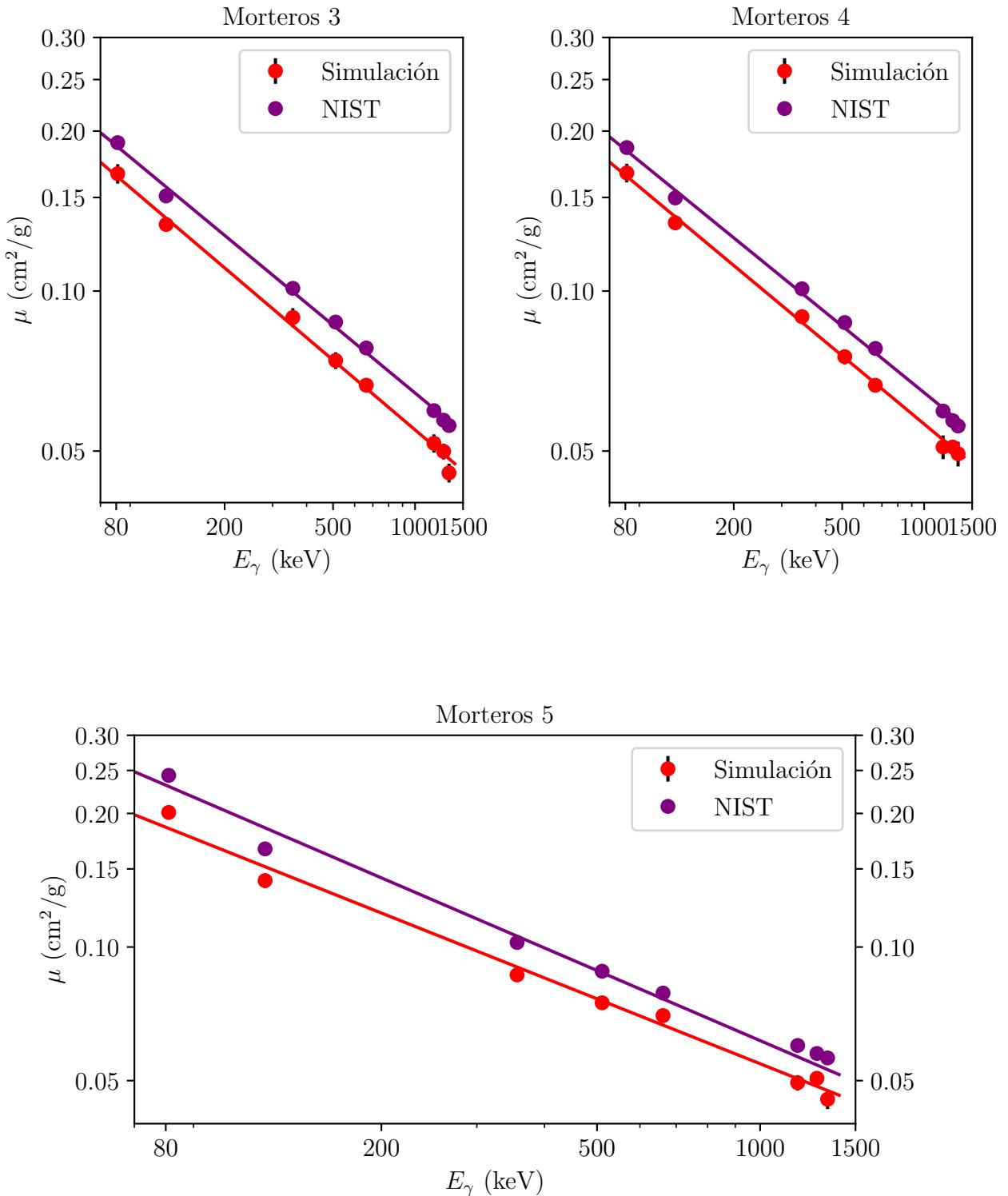


Figura 3-5: Ajuste para encontrar α y n a partir de los diferentes μ/ρ .

En las figuras anteriores podemos ver los ajustes, es importante mencionar que allí se gráfica

el coeficiente de atenuación másico μ/ρ , el cual fue definido anteriormente. Como se puede observar, los resultados obtenidos con la simulación son similares a los de la base de datos NIST [9]. Por otro lado, la incertidumbre para los datos de NIST esta asociada únicamente al ajuste. En la tabla 3-1 se muestra la comparación entre los valores de α y n . En la tabla 3-1 se condensa la información mostrada en las figuras.

Morteros	α_{Geant4}	α_{NIST}	Discrepancia(%)	n_{Geant4}	n_{NIST}	Discrepancia(%)
1	1.18(8)	1.56(15)	24	0.44(1)	0.46(2)	4
2	1.12(5)	1.31(9)	14	0.43(1)	0.44(1)	2
3	1.11(8)	1.20(7)	7	0.44(1)	0.42(1)	5
4	1.07(5)	1.15(6)	7	0.43(1)	0.42(1)	2
5	1.57(21)	2.31(39)	32	0.49(2)	0.52(3)	6

Tabla 3-1: Comparación entre los valores obtenidos de Geant4 y NIST.

3.2. Retrodispersión.

La figura 3-6 se muestra el montaje utilizado para la retrodispersión. El cilindro azul es el detector de NaI, la caja gris el mortero y las líneas verdes los rayos gammas disparados por la fuente de ^{137}Cs empleada. Esta fuente emite fotones a una energía de 662 keV. Adicionalmente se tiene la figura 3-7 la cual deja ver el arreglo desde una perspectiva que permite ver claramente la forma que tiene. Las distancias A (5,52 cm) y B (6 cm) y el ángulo permanecen constantes. Cabe mencionar que la distancia B comprende la distancia que hay desde la fuente hasta la superficie del mortero. Para este montaje se toman 12 espectros; uno para cada placa, es decir, por cada medición el grosor aumenta 1 cm.

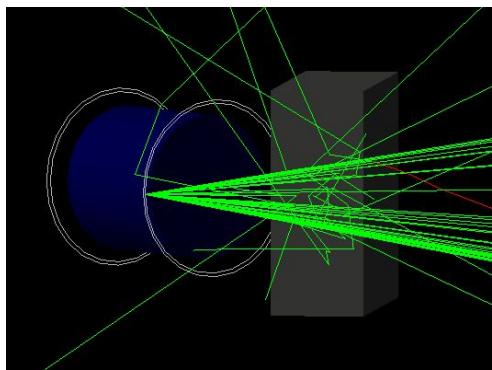


Figura 3-6: Vista lateral del montaje de retrodispersión.

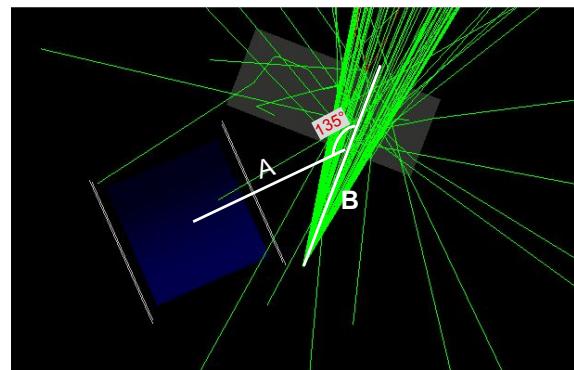


Figura 3-7: Vista superior del montaje de retrodispersión y algunas distancias importantes.

Cada simulación se realizó disparando 10 millones de rayos gammas a cada uno de los morteros para cada grosor distinto. Esto deja como resultado una gran cantidad de espectros agrupados por cada tipo de mortero. De acuerdo a la teoría, cuanto mas aumente el grosor, mayor será la intensidad del pico asociado a la retrodispersión. Sin embargo, después de determinado grosor la intensidad deja de incrementar; pues los rayos gamma que entran no vuelven a salir. A este grosor se le llamará distancia de saturación. En la figura 3-8 se puede apreciar el comportamiento de las intensidades a medida que aumenta el grosor del material.

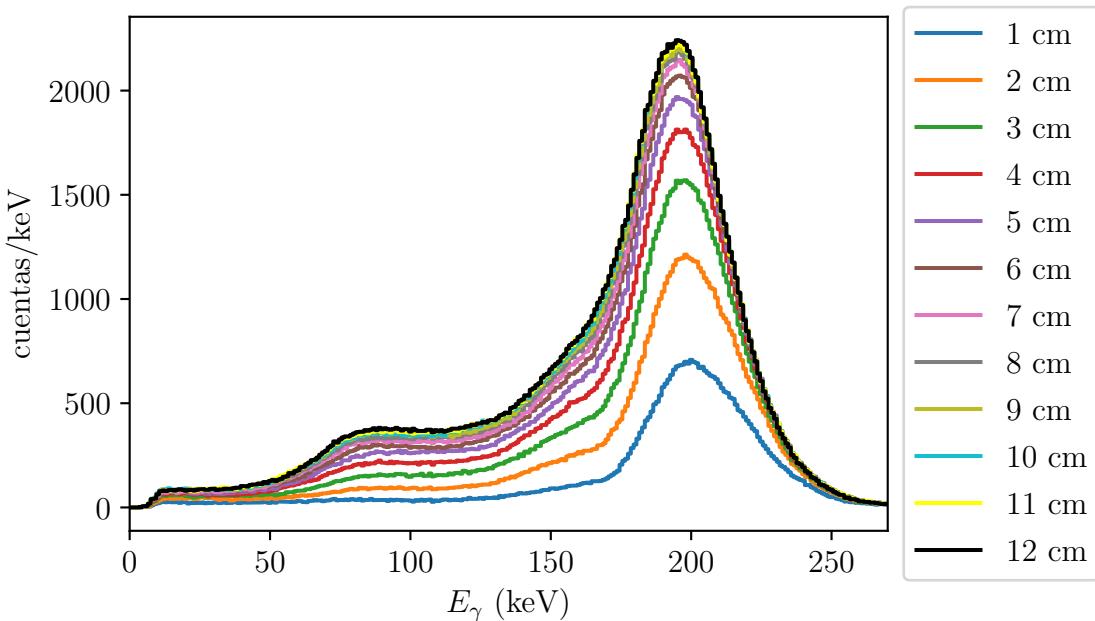
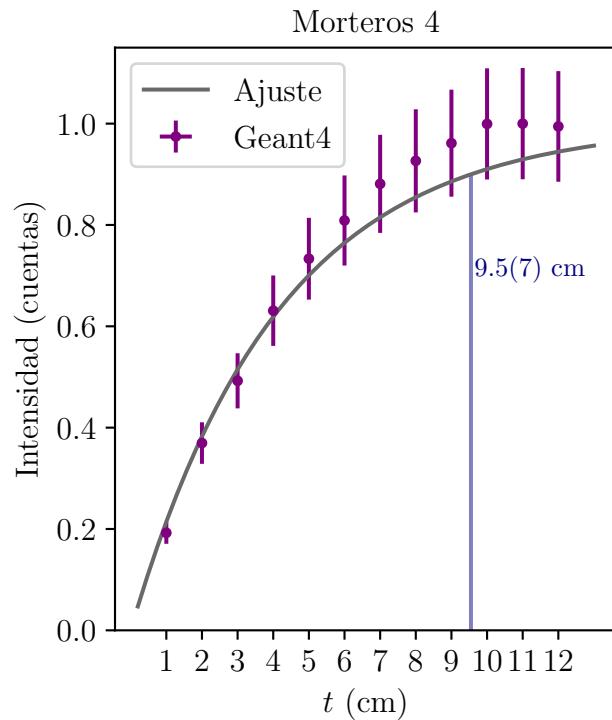
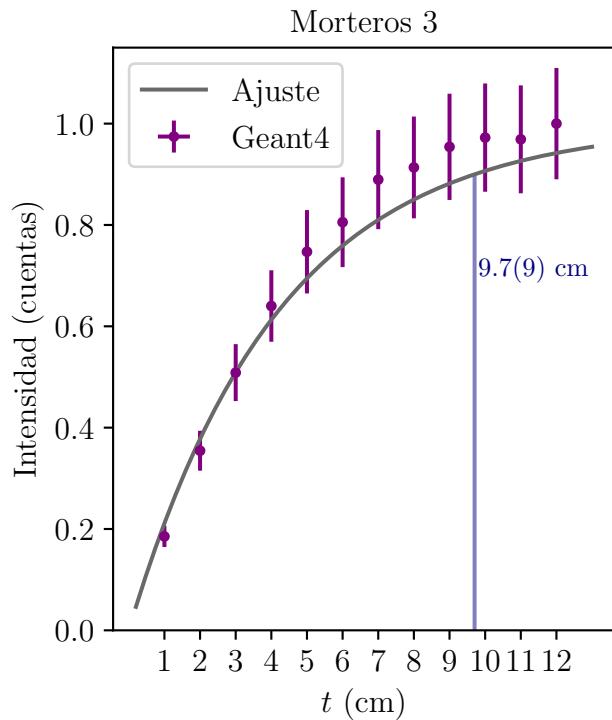
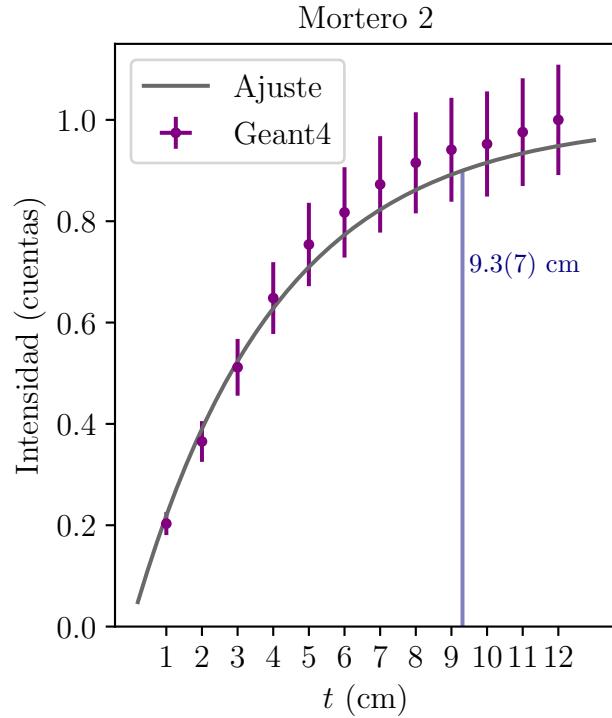
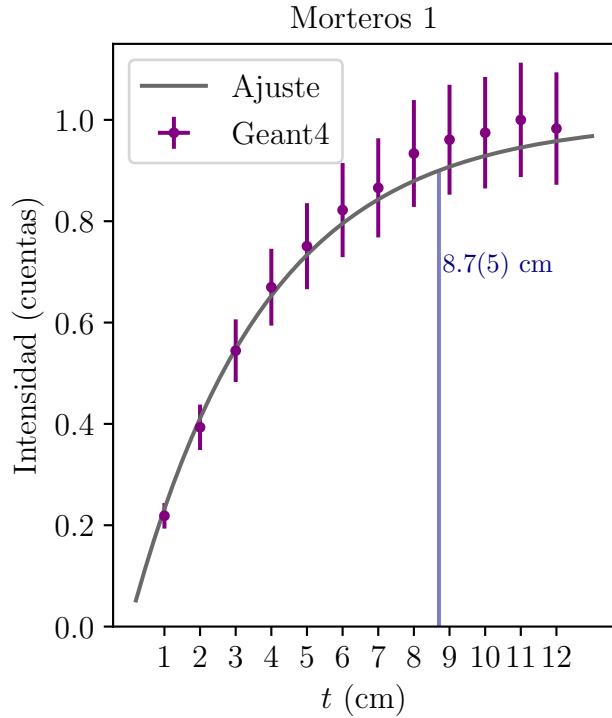


Figura 3-8: Espectro de 10 láminas de Morteros1.

De acuerdo a la figura 3-7 y a las dimensiones del detector, es posible encontrar que los ángulos que abarca la cara del detector mas próxima a las placas son desde 105° hasta 164° , y las energías asociadas son 262 keV y 197 keV respectivamente. Estás energías son encontradas usando la ecuación (1-1).

$$x_{saturacion} = \frac{-\ln(0,1)}{\mu_T} \quad (3-1)$$

Una vez encontradas las intensidades asociadas a cada grosor, se hace un ajuste tal y como se ve en la figura 3.2. Este ajuste permite encontrar el valor de μ_T , además, la distancia de saturación, la cual se encuentra a partir de la ecuación (1-8) normalizando las intensidades a la mayor de ellas y localizando el valor de intensidad 0,9. Luego de procedimientos matemáticos se llega a la expresión (3-1). Adicionalmente se encuentran estos mismos valores pero usando la base de datos NIST.



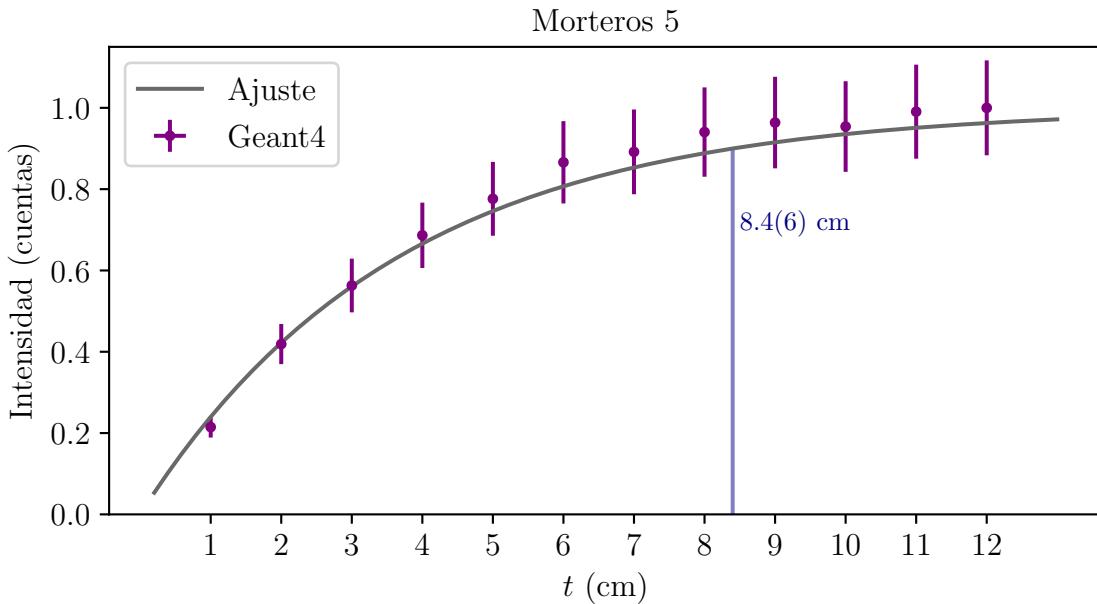


Figura 3-9: Valores de μ_T para Morteros 5.

En las figuras 3-9 se observa la tendencia que toman las intensidades para cada lote, además, es visible la distancia de saturación asociada. En la tabla 3-2 se encuentra la comparación entre los valores de μ_T obtenidos para la base datos y para la simulación junto con su respectiva discrepancia.

Morteros	μ_T Geant4	μ_T NIST	Discrepancia (%)
1	0.163(6)	0.275	40.7
2	0.141(6)	0.252	44.0
3	0.146(8)	0.253	42.3
4	0.148(6)	0.252	41.3
5	0.171(8)	0.258	33.7

Tabla 3-2: Comparación entre los valores obtenidos de Geant4 y NIST.

4 Método diagnóstico.

Como motivación a todo el desarrollo anteriormente expuesto, se mostrará un método que permite encontrar agujeros en los morteros. Para entender los aspectos básicos del método, es necesario explicar de forma concreta la elaboración de las partes de una construcción. Una de algunas piezas importantes en una edificación son las columnas, el proceso de construcción de estas consiste a groso modo en lo siguiente; se toman tablas y se arma un cajón, este es ubicado de manera vertical en el lugar donde se desee colocar la columna. Posteriormente dentro de este cajón es vertida la mezcla de cemento, agua y arena, luego se deja secar. Días después se quita el cajón, como es de esperarse, queda la columna. En algunos casos la mezcla no se distribuye de manera uniforme, lo que ocasiona que la columna quede con algunos huecos. Estos, pueden causar fallos estructurales serios a corto, mediano o largo plazo. La intención es detectarlos y buscar soluciones antes que sea demasiado tarde.

4.1. Procedimiento y análisis.

En la figura 4-1 se muestra el montaje realizado en Geant4 para cada uno de los lotes de morteros. En la placa se ha puesto de manera intencional un hueco, del cual sabemos sus dimensiones y su ubicación. No se agrega color, ya que de hacerlo, el hueco no sería visible; aunque en la figura 4-4, este es completamente visible. Es importante mencionar que agujero es colocado del lado opuesto al detector, ya que en la práctica se espera encontrarlos en lugares sin acceso a la visión directa. Para tomar datos se procede por pasos, es decir, se mueve en una dimensión el detector y la fuente, la idea que en cada paso se toma un espectro y se calcula su intensidad asociada. Ya que la intensidad depende del grosor del material, cuando la fuente y el detector estén sobre el hueco (o cerca de él) la intensidad será menor a los demás pasos. Al graficar, se observa una disminución significativa en la intensidad, y con ello, se encuentra la ubicación del hueco. Es importante mencionar que estos solo se pueden detectar cuando la distancia es menor a la distancia de saturación.

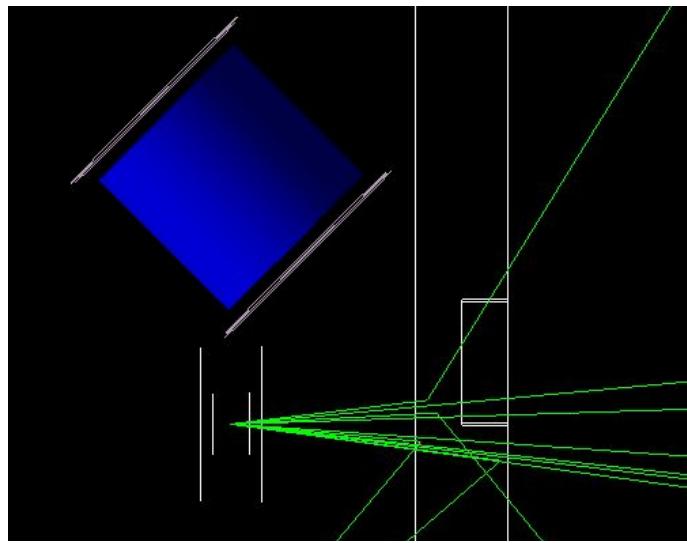
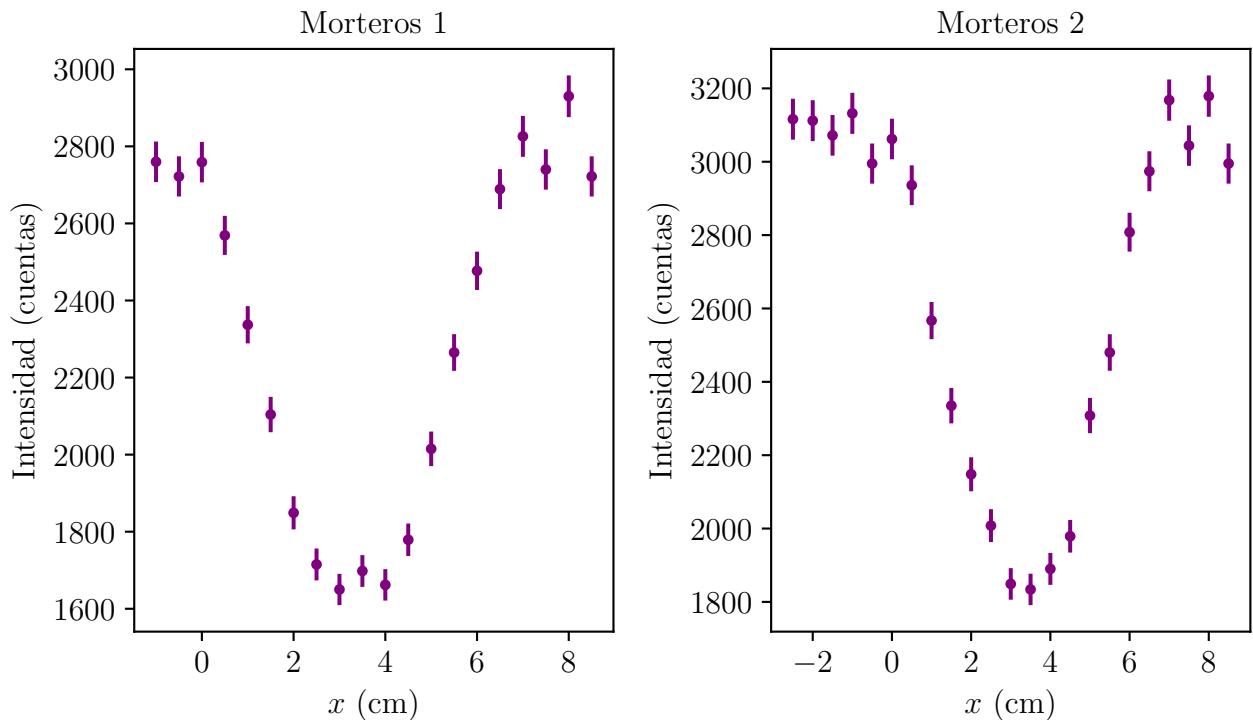


Figura 4-1: Diagrama en Geant4 para el método diagnóstico.

En las figuras 4-2 se muestra lo explicado anteriormente. Por practicidad, los huecos en cada una de las placas no coinciden con el centro geométrico del arreglo visto como un todo, esto se evidencia en los mínimos de las intensidades, ya que si bien coinciden para todos en el eje x , este no es el cero.



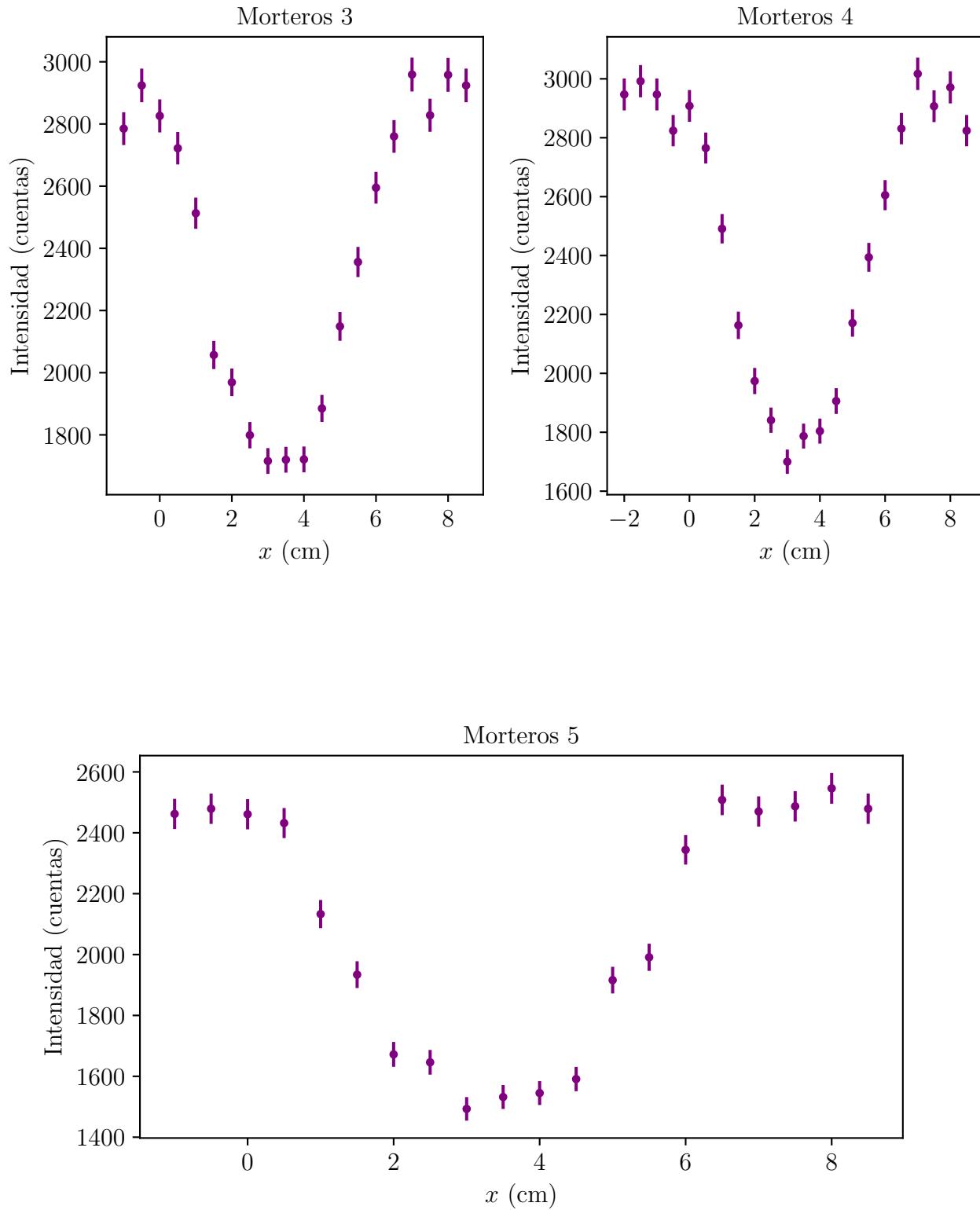
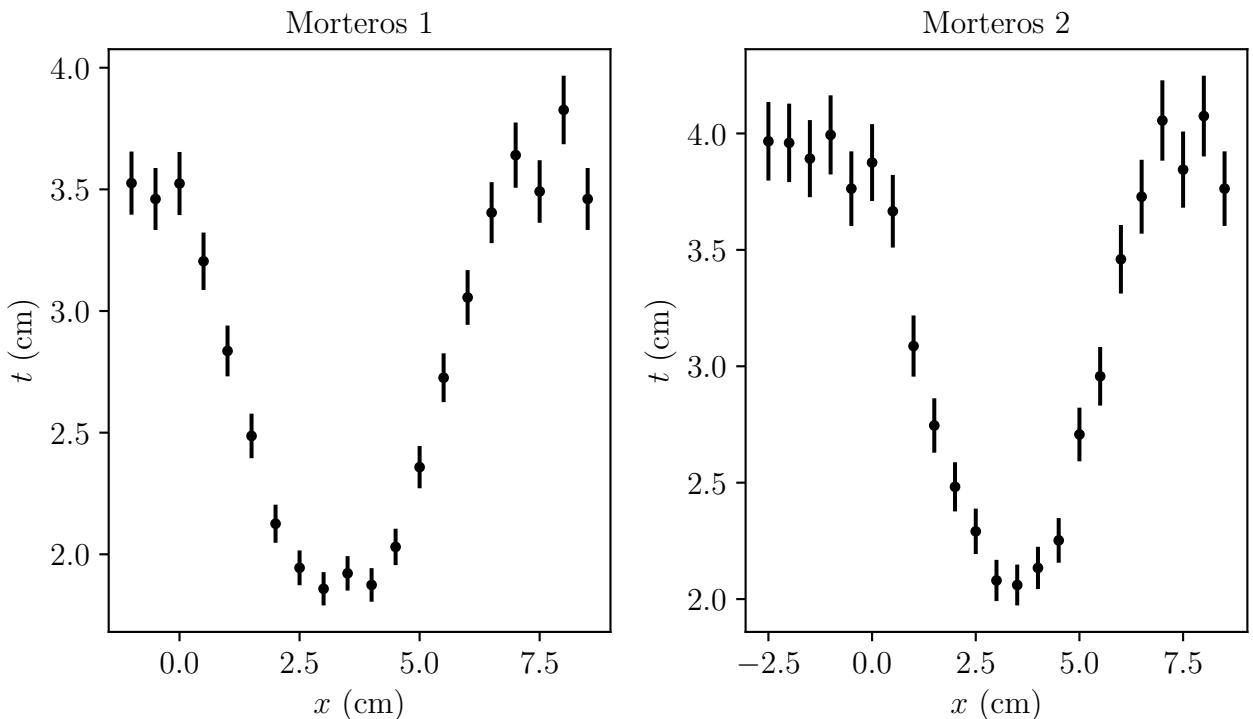


Figura 4-2: Comportamiento de las diferentes intensidades obtenidas para los distintos lotes de Morteros.

Ahora se procede a encontrar las dimensiones del hueco de acuerdo a las intensidades obtenidas, para esto, se despeja x de la ecuación 1-8. En este método, por practicidad, también las intensidades son normalizadas; logrando así que $i_0 = 1$. Ahora bien, despejando se tiene:

$$x = \frac{-\ln(1 - I_B)}{\mu_T}, \quad (4-1)$$

donde μ_T es el valor encontrado para cada mortero e I_B cada una de las intensidades normalizadas. Esta ecuación permite encontrar el grosor de la muestra que se pretenda analizar. Es importante mencionar que las normalizaciones para cada lote de morteros se realizan usando la mayor intensidad obtenida en las simulaciones de retrodispersión de acuerdo a cada mortero. En las figuras 4-3 se puede apreciar como varía el grosor respecto al desplazamiento en el eje x de la fuente y del detector. De igual manera se observan una serie de grosores similares entre sí al lado derecho e izquierdo de las figuras (la cantidad de estos varía de acuerdo al lote), esto se debe a que allí no hay hueco, es decir, grosor es el mismo. Adicionalmente los puntos más bajos hacen referencial centro del hueco. No se observa un cambio abrupto entre los puntos asociados al grosor y al hueco, esto se debe a que cada 0,5 cm se tomaba una medición; lo cual implica que en la posición para la cual la fuente se encontraba sobre el borde del agujero, parte de la intensidad incidente llegaba a este y parte no, lo que conlleva a una intensidad diferente a la máxima o mínima posible. Por esta razón se observan puntos intermedios.



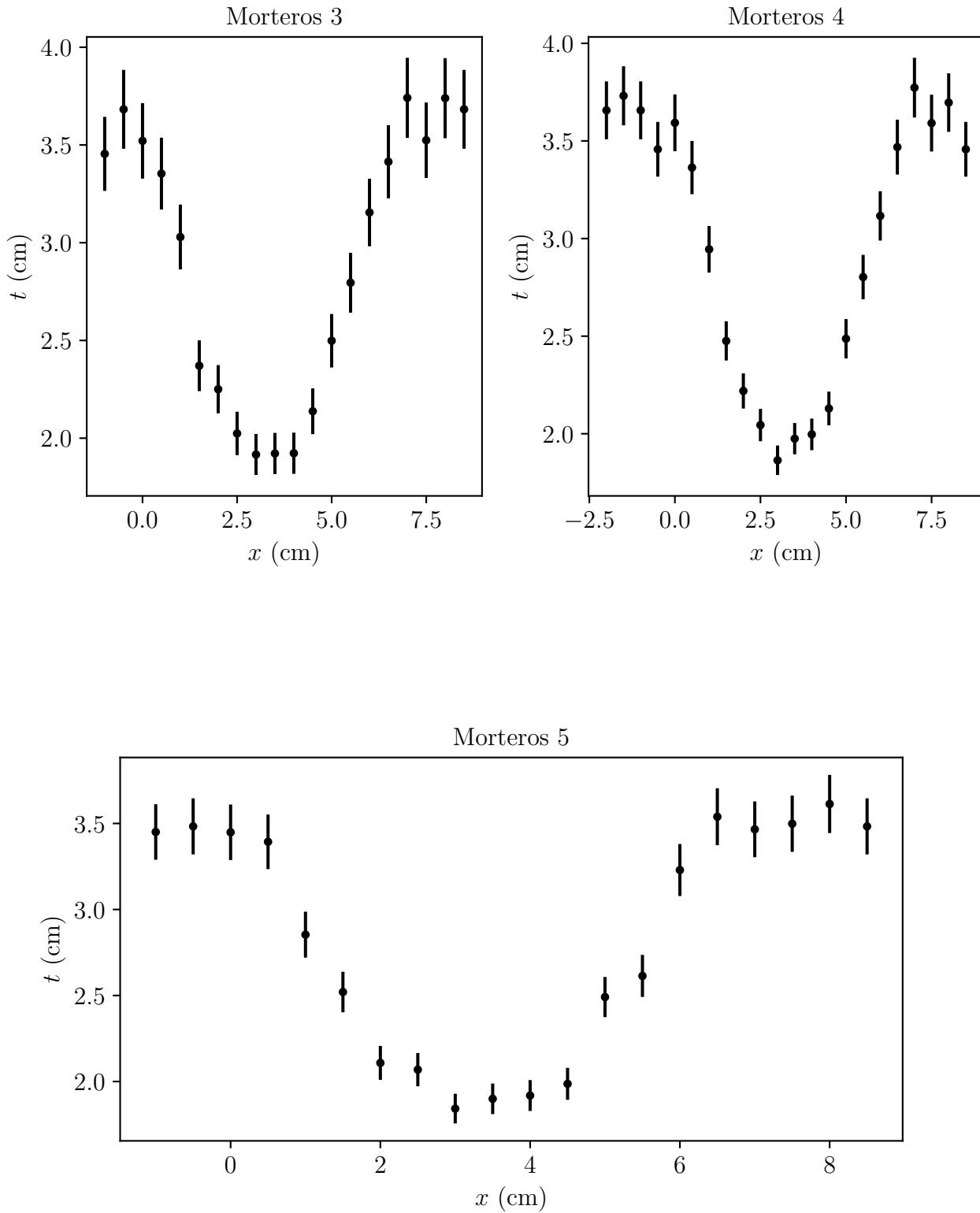


Figura 4-3: Comportamiento de los grosores en función del desplazamiento de la fuente y detector.

En la imagen **4-4** se muestran las dimensiones del hueco, las cuales son; sus lados son de 4cm \times 4cm y su profundidad de 1,5 cm. El grosor total del mortero es de 3 cm. Estas dimensiones son las mismas para todos los agujeros hechos a los morteros.

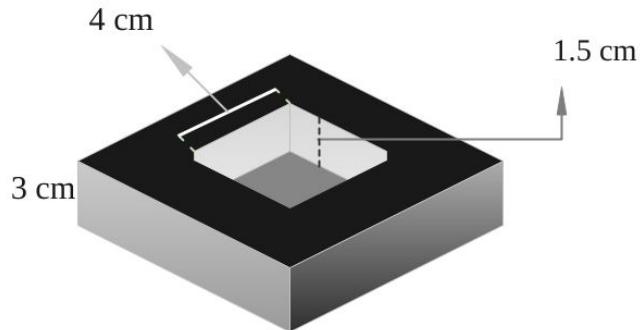


Figura 4-4: Dimensiones del agujero.

De acuerdo a las imágenes **4-3** es posible encontrar el grosor máximo promedio y el grosor mínimo promedio. El primero se calcula haciendo un promedio estadístico entre los 8 grosores máximos, 4 del lado derecho y 4 del lado izquierdo. Son 8 pues para esta cantidad de datos se garantiza que la intensidad de rayos gamma impacta en el lugar donde el grosor es máximo. De manera similar para el grosor mínimo se calcula un promedio estadístico, pero en este caso con los 4 valores mínimos. Son 4 porque para esta cantidad se garantiza que la totalidad de los rayos llega al fondo del hueco. Los resultados de estos cálculos se encuentran consignados en la tabla **4-1**. Allí se realiza una comparación entre las dimensiones reales del hueco y las obtenidas analizando los datos.

Lote de morteros	Profundidad real(cm)	profundidad calculada(cm)	Discrepancia(%)
1	1.5	1.6(1)	6.6
2	1.5	1.8(1)	20
3	1.5	1.6(1)	6.6
4	1.5	1.7(1)	13.3
5	1.5	1.58(7)	5.3

Tabla 4-1: Comparación entre los valores obtenidos de Geant4 y NIST.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Los valores de la tabla **3-1** muestran las discrepancias obtenidas para el método de transmisión. Como se observa, dichas discrepancias son pequeñas en la mayoría de los casos. Este resultado implica que el montaje hecho en la simulación y la simulación misma funcionan de manera adecuada. Nos obstante, se hace necesario construir 6 placas adicionales de cada lote de morteros con el objetivo de comparar los datos obtenidos con datos experimentales. Es importante mencionar que al comparar los datos de la tabla **3-1** entre sí, estos no fluctúan de manera considerable, salvo los asociados al lote 5. Los datos de estos morteros, están considerablemente alejados del resto; esto es debido principalmente a que en su composición no hay arena, es los demás lotes si.

Por otro lado, en el caso de la retrodispersión, se encontraron las distancias de saturación y el valor de μ_T asociado a cada material. Esta última cantidad, al ser comparada con NIST, muestra discrepancias bastante significativas, estas se muestran en la tabla **3-2**. Este resultado se debe principalmente a que todo el análisis se hace considerando únicamente el efecto Compton simple.

Al observar los datos de la tabla **3-2**, no es difícil darse cuenta que al comparar los valores de μ_T , obtenidos por la simulación, entre los distintos morteros no varía en gran medida, salvo para el lote 5. Mientras que para el μ_T obtenido de NIST el que mas varía es el del lote 1. Este resultado es algo sorpresivo, pues este comportamiento se esperaba para el lote 5, pero no del lote 1. El origen de este comportamiento se desconoce, y al no tener un patrón claro es posible que sea un caso fortuito.

En otro orden de ideas, para el método diagnóstico, de acuerdo a la tabla **4-1**, se obtuvieron discrepancias bajas entre el valor real de la profundidad del agujero y la profundidad calculada a partir del método. Esto se debe principalmente a que la profundidad es comparable con respecto al grosor total del mortero, pues es la mitad.

Si se realiza la misma comparación de la que se habló en los párrafos anteriores, pero esta vez sólo para la profundidad calculada, se percibe poca fluctuación, salvo para el lote 2. Finalmente el lote 5 es el que presenta menor discrepancia, y menor incertidumbre.

En general los datos obtenidos son bastante alentadores, pues permiten encontrar con buena precisión la profundidad del agujero. Para lograr ubicar la posición en la que este se encuen-

tra, es necesario hacer mediciones con desplazamiento por toda la superficie del material de estudio, pues de esta manera es posible hacer un mapeo 3D de la anomalía.

5.2. Recomendaciones

En cuanto a transmisión, sería conveniente realizar nuevas simulaciones y observar en detalle qué ocurre para el lote 1 y 5, ya que para estos se tiene las incertidumbres más grandes. En retrodispersión es necesario investigar y desarrollar nuevos métodos que permitan disminuir las discrepancias con respecto a NIST. Finalmente en cuanto al método diagnóstico, es necesario hacer un barrido por la superficie de manera que sea posible localizar la posición del hueco, además, estos barridos se deben hacer variando los pasos poca distancia; ya que de esta manera es posible encontrar las dimensiones de la anomalía con mayos exactitud.

Bibliografía

- [1] Gordon Gilmore. *Practical gamma-ray spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] Glenn F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.
- [3] F. Cristancho. Instrumentación nuclear. notas de clase. sin publicar, 2019.
- [4] William R. Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. American Association of Physics Teachers, 1990.
- [5] F. Cristancho. Conversación privada, 2019.
- [6] R.C. Hurtado. Caracterización de mortero mediante transmisión y retrodispersión de rayos gamma. tesis de pregrado. 2020.
- [7] Geant4 Collaboration. Geant4, a simulation toolkit. physics reference manual. Technical report, CERN, 2020.
- [8] Varios Autores. Geant4, a simulation toolkit. url<https://geant4.web.cern.ch/>, 2020. Accedido 20-11-2013.
- [9] National Institute of Standards NIST and Technology. Xcom nist.element compound mixture selection. url <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>, 2020.