

Simulación de la respuesta de la interacción de la radiación cósmica con las minas  
antipersonales en Colombia

Michael Leonardo Ariza Gómez  
Marcos Fernando Carrillo Moreno

Trabajo de Grado para Optar al título de Ingeniero Químico

Director

PhD. Víctor Gabriel Baldovino Medrano

Codirectores

Msc. Adriana Carolina Vásquez Ramírez

PhD. Luis Alberto Núñez de Villavicencio

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2019

## Contenido

Introducción.....	1
1. Metodología .....	6
1.1 Software empleado en la simulación .....	7
1.2 Caracterización elemental y geometría de la mina antipersonal.....	8
1.3 Caracterización elemental y geometría del suelo.....	10
1.4 Geometría del sistema en GEANT4, mina antipersonal y el suelo.....	12
1.5 Simulación de la interacción del flujo de fondo de rayos cósmicos, con las diferentes configuraciones de suelo-mina.....	13
1.6 Simulación de la interacción de muones de 500 MeV con las diferentes configuraciones de suelo-mina.....	15
2. Resultados y análisis .....	15
2.1 Resultados de la simulación de la interacción de la mina con secundarios a nivel de Bucaramanga .....	15
2.1.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV .....	15
2.1.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas .....	17
2.2 Resultados de la simulación de la interacción con los muones de 500 MeV....	19
2.2.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV .....	19
2.2.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas .....	20
3. Conclusiones.....	23
Referencias Bibliográficas.....	25
Apéndices.....	28

## Introducción

Los conflictos armados alrededor del mundo han generado grandes cantidades de víctimas, usando distintos métodos para este fin. Uno de estos son las denominadas minas antipersonas, que son de especial preocupación debido a que son indetectables a simple vista y permanecen años activas. Estas son minas poco profundas con objetos explosivos ocultos debajo del suelo, que están diseñados para mutilar o matar.

Desde tiempos antiguos los romanos diseñaron estos dispositivos para afectar a su adversario. En este caso, se trataba de una pequeña lanza plantada en el suelo que podía causar lesiones al pisarla, no eran tan devastadoras como las minas explosivas, las cuales, fueron usadas por primera vez por los chinos alrededor del año 1277 DC (Lewis, 1999). Sin embargo, el uso masivo de estos artefactos se empezó a documentar a mediados del siglo XIX, en la guerra civil americana (1862) por parte del bando de la confederación. Más adelante, en la primera guerra mundial (1914-1918), este tipo de tecnología se modificó para ser empleada contra los tanques enemigos, estas nuevas minas se denominaron minas antitanques; en contraste, en la segunda guerra mundial (1939-1945) ambos tipos de minas fueron utilizados, y la producción en masa de estos artefactos contribuyó a que se construyeran más de 300 millones de minas, fabricadas por Estados Unidos y la Unión Soviética durante este conflicto (Rogers, 2014).

Después de esta guerra, el diseño de las minas se refinó y se enfocó en 5 criterios: efectividad, tamaño, detectabilidad, esfuerzo logístico y velocidad de minado; esto tuvo como consecuencia que para el año 2000, más de 600 tipos de minas fueran producidas (Rogers, 2014). Además, impulsó el desarrollo de los materiales para emplearse como minas antipersonales. Algunos de ellos son de fabricación industrial, como el RDX, TNT, PETN, C4, HMX, amonita, entre otras, que normalmente son utilizadas por los ejércitos y en aplicaciones civiles. Por otro lado, se tienen los explosivos de producción artesanal que son utilizados por las fuerzas insurgentes, como en el caso del ANFO o el TAPT, que son de fácil fabricación casera (OTAN, 2007).

Este flagelo ha afectado a numerosas cantidades de territorios en el mundo, en especial a regiones donde han existido conflictos armados, ya sean externos o internos, como guerras civiles, el caso de Afganistán, Camboya, Angola, Colombia, la región del Cáucaso o actualmente en Siria, además de otros más de 50 países (Chiovelli, Michalopoulos, & Papaioannou, 2018); este problema perjudica directamente a la comunidad, debido a que es una amenaza que atenta contra la vida de cualquiera que participe o no, en estos enfrentamientos.

Esta problemática no solo se enfoca en las personas que tuvieron contacto directo con el explosivo, sino que es un riesgo en común, ya que las comunidades son forzadas a ser desplazadas de sus territorios, por sospecha a encontrarse con estos dispositivos. Esto afecta la economía de la región, debido a que los territorios minados terminan siendo inutilizados. Las consecuencias del conflicto son multifacéticas, de tal manera que afectan la seguridad de la comunidad y al mismo tiempo inciden en la agresión, permeando en los aspectos de la sociedad, como pérdidas de vidas, heridos, desconfianza y deterioro de la capacidad institucional, entre otros, es por esto que es de gran importancia para el desarrollo normal y natural de la vida de las personas que estos dispositivos sean detectados y desactivados de la manera más eficiente posible.

Según cifras dadas por la ***International Campaign to ban Landmines*** (ICBL), Colombia en el año 2018 se convirtió en el segundo país con mayor cantidad de víctimas de minas antipersonal en el mundo, con un total de 11765 personas afectadas en más de medio siglo de conflicto (ICBL, 2018). Esto debido al conflicto armado interno que ha sufrido el país y del cual han participado varios grupos al margen de la ley como el ELN, las FARC, el EPL, las AUC, que surgieron por diversas problemáticas, como: persecución de la población civil debido a su orientación política, posesiones de tierra, inestabilidad política e industria del narcotráfico, entre otros. El uso de estos dispositivos en Colombia se empezó a documentar en la década de los 70, siendo el ELN que las empezó a utilizar como táctica militar. Sin embargo, estas agrupaciones se dispusieron a crear sus propios artefactos debido a que las minas convencionales representan un alto costo, de tal

manera que, al realizar minas caseras, eliminaban este factor. No obstante, esto representa una amenaza, porque estos dispositivos son hechos a base de una receta tradicional, donde no existe parámetros que indiquen que proporción se debe agregar para obtener un artefacto de estos. Principalmente este producto contiene compuestos químicos altamente volátiles, y también se utilizan materiales no convencionales como tuercas, tornillos, vidrio, material fecal humana y animal. Esto representa un problema mayor debido a que complican la detección y la desactivación de estos dispositivos por la gran variabilidad de su composición (Castañeda, 2015).

Existen tecnologías que permiten la detección de estos artefactos, entre estos métodos encontramos aquellos que usan animales como perros, ratas, abejas o la mosca de la fruta (Marshall, Warr, & de Bruyne, 2010). Existen procedimientos que detectan iones, como la espectrometría de movilidad iónica, o la espectrometría de masas (Buryakov, 2011), distinto a los que detectan los metales empleando el principio de inducción electromagnética (Lopera & Milisavljevic, 2007), y otros métodos de radiación electromagnética en la banda del microondas, como es el caso del Georradar (GPR). La tomografía de impedancia eléctrica utiliza la conductividad eléctrica del suelo para tomar una imagen del mismo; y algunos casos se usa la radiación ionizante o neutrones, como es el caso de la espectroscopia en radiación de Tera hercios que usan ondas electromagnéticas del orden de 0.5 a 10 THZ (Cardona, Jiménez, & Vanegas, 2014). La Dispersión Raman utiliza la interacción luz- molécula, la energía de los estados vibratorios y rotacionales pueden intercambiarse y se emite una energía cuántica de luz más baja. Sin embargo, el efecto Raman es extremadamente débil, no tiene suficiente sensibilidad para la aplicación de detección de minas terrestres. La espectroscopia de resonancia nuclear de cuádruplo (NQR), es una técnica que envía pulsos de radiofrecuencia que excita los núcleos de nitrógeno en el explosivo, lo que induce un potencial eléctrico en una bobina receptora. El espectro registrado de cada explosivo es único y por lo tanto la detección es altamente específica y menos susceptible a falsas alarmas [34]. Su principal inconveniente es una señal baja /relación de ruido (SNR) [30]. Además, se ve afectado por la radio interferencia de frecuencia (RFI), por la distancia entre la bobina de detección, el explosivo, y la temperatura. La espectroscopía de

absorción (IR), reflectividad y reflexión total atenuada de infrarrojos (ATR) son métodos poderosos de identificación y de explosivos a través de la medición del espectro vibratorio molecular. La absorción resonante de la luz por estas vibraciones se observa cuando el momento dipolar de la molécula cambia [24]. Sin embargo, los espectros infrarrojos de moléculas grandes pueden tener anchos de banda amplios, lo que conduce a un espectro indistinto. Además, muchos explosivos se descomponen a las altas temperaturas necesarias para lograr la presión de vapor requerida para la detección. La activación de neutrones y emisión gamma, son otros métodos y técnicas más comunes para la detección de explosivos.(Brown, Greenfield, McGrane, & Moore, 2016). Aunque exista una gran variedad sobre técnicas de detección, todavía no existe una forma que proporcione, una alta selectividad, aplicabilidad a distancias cercanas y de campo, y la portabilidad requerida por los profesionales de detección de explosivos(Brown, Greenfield, McGrane, & Moore, 2016b).

Entre las técnicas anteriormente mencionadas, destacan por su versatilidad. Los procedimientos que usan bombardeo directo de neutrones para la detección de explosivos (Heider & Dunn, 2015). Las siguientes técnicas: Thermal Neutron Analysis (TNA), Fast Neutron Analysis (FNA), Fast Thermal Neutron Analysis (FTNA), Fast Neutron scattering analysis (FNSA) or neutron elastic scatter (NES). Una fuente de neutrones como el  $^{252}\text{CF}$ , Am/Be, Deuterio-Deuterio o Deuterio-Tritio en la que la energía de los neutrones emitidos puede variar entre los 0.7 MeV hasta los 14.1 MeV. Sin embargo, el coste de estos generadores puede ser realmente alto, además de la logística con la que tienen que contar como, generadores, reflectores, detectores. Esta tecnología debe utilizarse en aplicaciones de campo donde se pueda contener la cantidades de radiaciones ionizantes, todo esto para prevenir la exposición a esta energía que de alguna u otra manera afecta la salud (Gierlik et al., 2016), de tal manera que se implementaron en lugares que puedan soportar el funcionamiento de estas técnicas, como por ejemplo, en aeropuertos o puertos de carga (Whetstone & Kearfott, 2014).

En la naturaleza encontramos una fuente inagotable de partículas subatómicas que se generan a partir de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre. Los

rayos cósmicos son partículas que constantemente llegan a la Tierra desde distintos sitios del universo. Los de más baja energía provienen del sol y las estrellas, y otros más energéticos, pueden originarse del centro de la galaxia o de cambios violentos en el universo, como las explosiones de supernova (Villaseñor, 2006). Las propiedades de los rayos cósmicos se han medido a través de la detección de cascadas atmosféricas extendidas, es decir, a partir de las partículas secundarias. Estos rayos tienen una energía de hasta  $3 \times 10^{20}$  MeV, que se encuentran compuestos por un 92% de protones, 6% de partículas alfa, 1% de electrones, 1% de núcleos de los elementos del litio al níquel y unos pocos núcleos de elementos más pesados que el níquel, también se pueden encontrar antinúcleos, electrones y positrones, neutrinos y antineutrinos, a estas partículas son lo que se les llama, partículas primarias (Medina, 2010); (H.-M. Mok, 2012).

Los rayos cósmicos actualmente poseen una amplia red de aplicaciones, como por ejemplo, en meteorología pueden emplearse como una especie de sondas de detección remota para determinar las condiciones atmosféricas (H. M. Mok & Cheng, 2001). En agricultura, los rayos cósmicos se pueden usar para monitorear el contenido de agua ambiental cerca de la superficie terrestre y así optimizar el uso del agua (Köhli et al., 2015), además se han utilizado para la detección de minas naturales empleando la muografía, una técnica que permite la exploración de zonas poco accesibles como los volcanes (Asorey et al., 2017).

En este proyecto, se evalúa la factibilidad del uso de la radiación cósmica para la detección de las minas antipersonales, como alternativa no convencional frente a los métodos actuales que presentan algunas complicaciones, son poco eficientes y de alto riesgo en su aplicación. Para esto se busca simular la interacción de una mina antipersonal típica en Colombia con los rayos cósmicos a partir de la herramienta Geant4. Las simulaciones están enfocadas en analizar la interacción de radiación cósmica con los explosivos contenidos en la mina, con el fin de estimar e identificar las respuestas de la mina, tiempo después de haber interactuado con el núcleo de los elementos químicos que constituyen el (ANFO).

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Analizar la interacción de la radiación cósmica con un tipo de mina antipersonal improvisada encontrada en Colombia.

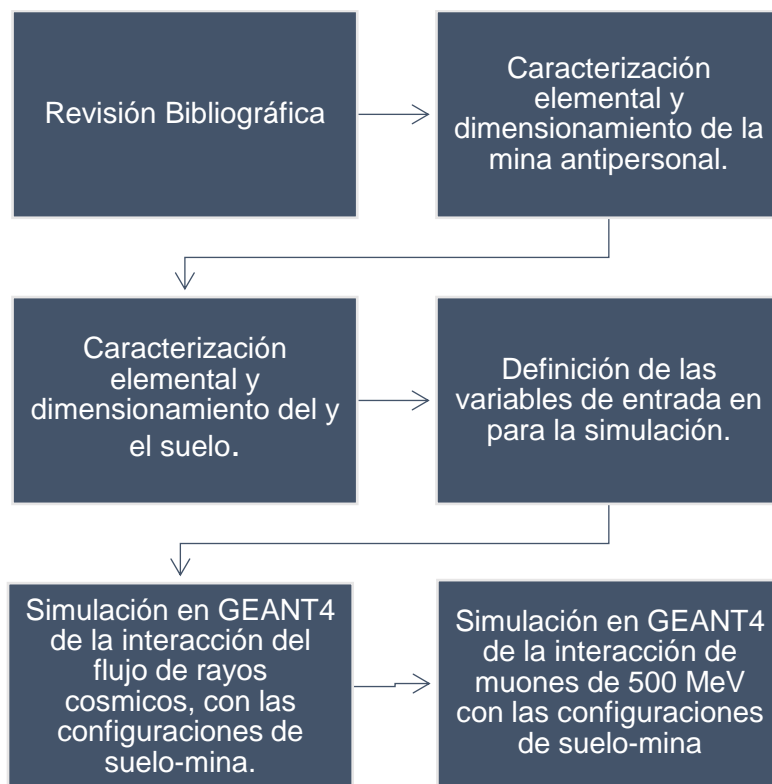
### **Objetivos específicos**

- Determinar el tipo de partículas resultantes de la interacción entre los componentes de una mina antipersonal enterrada y el flujo de partículas secundarias a nivel de Bucaramanga
- Analizar el espectro de energía de las partículas resultantes para buscar posibles diferencias entre un suelo y un suelo con mina.
- Evaluar el efecto que la humedad y el abono de los suelos pueda tener sobre la discriminación de la presencia de una mina antipersonal.

## **1. Metodología**

A continuación, se presenta la metodología seguida para simular la interacción de los rayos cósmicos con las minas antipersona. En primer lugar se describe el tipo de dispositivo escogido, su composición química y dimensiones; la composición elemental del suelo, y el flujo de partículas empleado. Seguido de esto se describen las variables del suelo como la humedad y el contenido de abono orgánico; y el tiempo de exposición ante el flujo de partículas para cada tipo de simulación. En la figura 1 se muestra la metodología empleada para este trabajo, representada en un diagrama de flujo.





**Figura 1.** Diagrama de flujo de la metodología empleada para el desarrollo de la simulación.

### 1.1 Software empleado en la simulación

Se emplea un conjunto de herramientas computacionales colectivamente llamada ARTI, la cual se usa para simular detectores Cherenkov de agua ante el flujo de partículas secundarias provenientes de la radiación cósmica, en cualquier latitud, longitud y altitud. (C. Sarmiento, Suárez, Vásquez, & et al., 2019). ARTI utiliza en su primera etapa la herramienta CORSIKA para calcular el flujo de partículas secundarias al nivel del suelo en cualquier posición geográfica; en su segunda etapa se emplea el código MAGCOS para hacer las correspondientes correcciones del flujo debido al campo magnético terrestre. Por último, ARTI recoge estos flujos y utiliza GEANT4 para simular de forma detallada la interacción de estas partículas con los detectores Cherenkov de agua.

En este trabajo, se utiliza la última etapa de ARTI para simular respuesta de las minas antipersonas con el flujo de partículas secundarias a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m) obtenido por (Jaimes-Motta, 2018). Debido a que el suelo típico colombiano presenta diferentes características, esta respuesta se simuló para minas enterradas en suelo seco, suelo húmedo y suelo abonado. A continuación se detalla la geometría y composición de

la mina utilizada y los distintos tipos de suelo simulados en geant4.

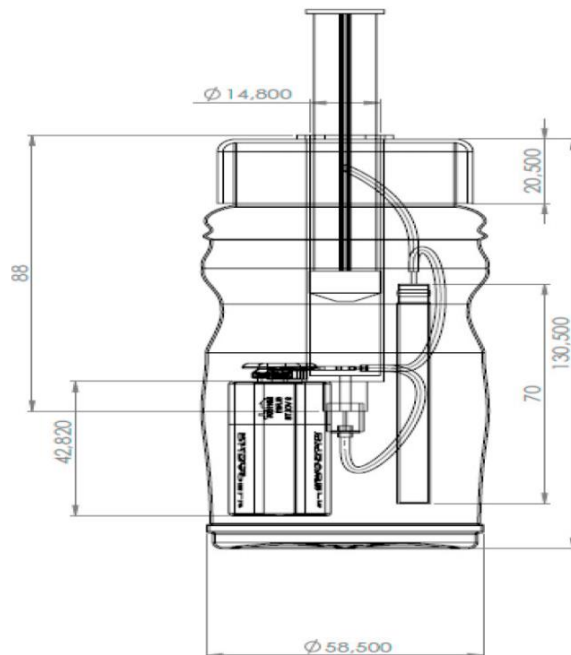
## **1.2 Caracterización elemental y geometría de la mina antipersonal**

Para la selección de la mina antipersonal a simular se realizó una búsqueda de los dispositivos que se encuentran con mayor frecuencia en Colombia, y se escogió una mina antipersonal que cuenta con un mecanismo de activación por presión, que cuando es empujado cierra un circuito eléctrico el cual activa un detonador que está en contacto con el explosivo principal (Paz, 2005); este dispositivo es aproximadamente de 5.85 cm de ancho y 13.05 cm de alto, la geometría se muestra en la figura 2.

Para la simulación en GEANT4 se escogió el material del que está compuesto la mina, en este caso de ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil); este explosivo que se clasifica como oxidante se compone de nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) y combustible orgánico habitualmente Diesel No2 o ACPM (L. F. Sarmiento, 2013). El nitrato de amonio es una sal inorgánica normalmente en forma granular y de alta porosidad para que pueda absorber el fuel oil en estado líquido; este combustible es agregado en suficiente cantidad para que reaccione con el oxígeno disponible en la porción del  $\text{NO}_3$  del nitrato de amonio (Cranney & Sudweeks, 2012). Se seleccionó este explosivo ya que se encuentra en más del 80% de las minas antipersona encontradas por las fuerzas militares en Colombia debido a la facilidad con la cual se adquieren los componentes del explosivo, como es el caso del nitrato de amonio que es usado comúnmente como fertilizante (Jaramillo, 2009).

La geometría de la mina se simuló de forma esférica con un radio de 4.81 cm porque los volúmenes de minas antipersona encontrados en la literatura varían de  $300\text{cm}^3$  a  $900\text{cm}^3$  (Acción contra minas, 2011); asimismo por simplicidad, ya que la mina tiene pequeñas partes que aumentarían la complejidad de la simulación, y además porque el propósito principal de este proyecto es observar la respuesta a la interacción de las partículas secundarias con los componentes químicos de la mina más que de su geometría.

La composición de la esfera de ANFO se tomó como 94.3% nitrato de amonio y 5.7% de fuel oil no2, esta proporción se escogió debido a que es la fracción másica en la cual se genera la máxima cantidad de energía en la detonación (Reyes, 2009).



**Figura 2.** Mina antipersonal con mecanismo de activación eléctrico fabricado por el ELN y las FARC, emplea una jeringa que crea un corto circuito que activa el detonador, para su activación es necesario 5 kg de masa (Paz, 2005) .

El geant4 permite crear estos materiales a partir de la composición elemental, la masa atómica y la densidad de cada compuesto, de esta forma se creó el nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) y el fuel oil no2, y para formar el ANFO se mezclaron el combustible orgánico y el  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  en las proporciones mencionadas anteriormente. La composición y la masa atómica del nitrato de amonio se tomó de su fórmula molecular, y su densidad la cual es  $1.72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  se halló en (Babrauskas, 2016). La composición del Diesel se encontró en (Liang, Lu, Keener, Liu, & Khang, 2005); para crear el Diesel se tuvo en cuenta que este es una mezcla compleja de gran cantidad de hidrocarburos algunos de los cuales están presentes en la mezcla en una muy pequeña proporción (menor de 0.001 % porcentaje en peso), por esta razón se simuló los compuestos presentados por Liang que tiene una fracción másica mayor de 0.01% y son presentados en la tabla 2, donde se muestra el nombre, la fórmula molecular, la masa molar, la densidad y la fracción másica para cada sustancia.

Compuesto	Fórmula	Masa molar g/mol	Densidad g/cm <sup>3</sup> a 20°C	Fracción másica
Alcanos				

<b>n-dodecane</b>	$C_{12}H_{26}$	170.33	0.7945	3.205
<b>n-tridecane</b>	$C_{13}H_{28}$	184.37	0.762	5.389
<b>n-tetradecane</b>	$C_{14}H_{30}$	198.39	0.7628	4.875
<b>n-pentadecane</b>	$C_{15}H_{32}$	212.42	0.769	5.169
<b>n-hexadecane</b>	$C_{16}H_{34}$	226.41	0.773	4.479
<b>n-heptadecane</b>	$C_{17}H_{36}$	240.47	0.777	4.874
<b>Alcanos ramificados</b>				
<b>2,6,10-trimethyl undecane</b>	$C_{14}H_{30}$	198.39	0.8±0.1	53.84
<b>Cicloalcanos saturados</b>				
<b>heptylcyclohexane</b>	$C_{13}H_{26}$	182.35	0.81	2.883
<b>octylcyclohexane</b>	$C_{14}H_{28}$	196.37	0.81	2.515
<b>nonylcyclohexane</b>	$C_{15}H_{30}$	210.39	0.8±0.1	2.321
<b>Hidrocarburo policíclico aromático</b>				
<b>Naphthalene</b>	$C_{10}H_8$	128.17	1.0253	0.165
<b>Biphenyl</b>	$C_{12}H_{10}$	154.21	1.04	0.0095
<b>Hidrocarburo policíclico aromático alquilados</b>				
<b>2-methylnapthalene</b>	$C_{11}H_{10}$	142.20	1±0.1	0.494
<b>1,7 dimethylnaphtalene</b>	$C_{12}H_{12}$	156.22	1±0.1	0.549
<b>trimethylnaphtalene</b>	$C_{13}H_{14}$	170.25	1±0.1	2.657
<b>Alquilbencenos</b>				
<b>Toluene</b>	$C_7H_8$	92,14	0.867	0.201
<b>Bencene</b>	$C_6H_6$	78,11	0.876	6.349

**Tabla 1.** Compuestos que forman el FUEL oíl No2 usados en la simulación, tomado de (Liang et al., 2005)

### 1.3 Caracterización elemental y geometría del suelo

Normalmente, las minas antipersonal se suelen encontrar enterradas en el suelo, en lugares estratégicos donde pueden hacer bastante daño como caminos, riberas de ríos y en campos de cultivos ilícitos; es por esta razón que es necesario simular el suelo además de la mina antipersonal para poder diferenciar la respuesta generada por el suelo y por un suelo con mina.

Se tuvo en cuenta que la composición elemental de los suelos a nivel mundial varía de región en región, y por lo tanto sería poco práctico tomar todas estas fracciones; por esta razón se tomó de (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006) una composición elemental que es una representación general de las fracciones encontradas normalmente en los suelos, estas fracciones másicas se presentan en la tabla 2. Para crear el suelo en GEANT4, es necesario tener: la composición elemental, la masa atómica y la densidad del material. Para el suelo presentado en la tabla 2 la densidad

seleccionada es de  $2700 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$  (Köhli et al., 2015).

Tomando como base el suelo de tabla 2 que se denomina suelo seco, se configuraron 4 tipos de suelo más. El primer tipo de suelo es el suelo seco y como su nombre lo indica no presenta ningún tipo de humedad en su composición, este suelo es la base para los otros tipos de suelo que se presentan a continuación. El segundo y el tercer tipo de suelo son los suelos secos con un contenido de humedad de 10% y 30% (P/p) y se propone estudiar el efecto de la humedad ya que los neutrones interactúan con los núcleos de los átomos de hidrogeno generando fotones (Köhli et al., 2015), las cuales se espera se generen en mayor cantidad para estos tipo de suelos. El cuarto y el quinto tipo son los suelos abonados con nitrato de amonio en un porcentaje 0.0001% y 0.0002% (P/p) con respecto del suelo base; se estudia el efecto del  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ya que este es usado normalmente como fertilizante en los campos de cultivo y puede existir un efecto de apantallamiento que impida diferenciar el suelo del ANFO, el cual también se compone de nitrato de amonio.

Para determinar los porcentajes de humedad se seleccionó el rango según datos obtenidos en (FAO, 2019), en los cuales se muestran los valores de la humedad de los suelos en diferentes lugares del mundo, permitiendo determinar la variabilidad de la humedad. Para determinar el porcentaje de nitrato en el suelo abonado se realizó un tratamiento matemático con datos obtenidos en FERMAGRI con el fin de estimar el porcentaje de nitrato en la superficie de suelo. La geometría del suelo se tomó como un cubo de 13.6 cm de lado, y rodea completamente la mina; se seleccionó este tamaño con el fin de que la mina estuviera a 2 cm sobre la parte inferior y la superficie del suelo.

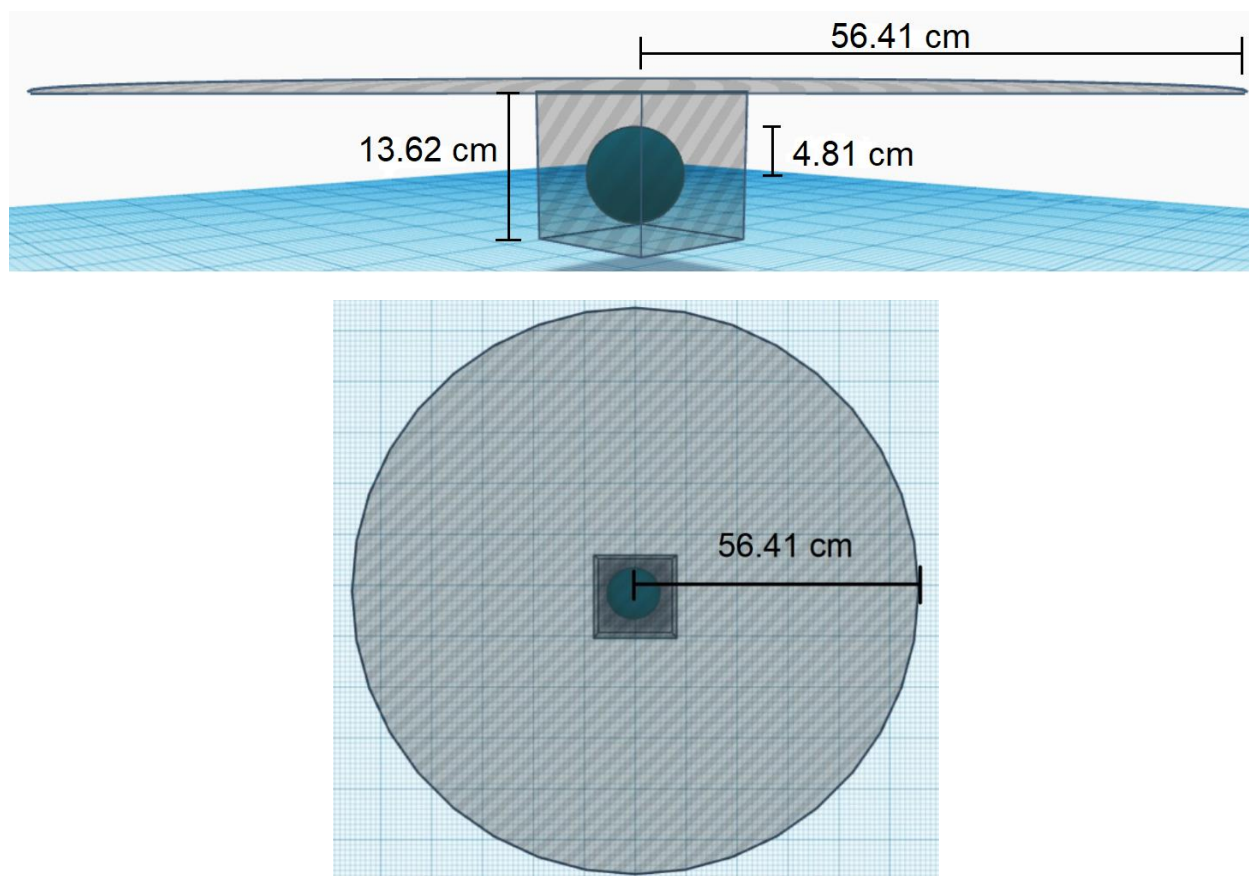
Elemento	Porcentaje en peso (%)
Oxigeno (O)	49
Silicio (Si)	33
Aluminio (Al)	7.13
Sodio (Na)	0.63
Potasio (K)	1.36
Calcio (Ca)	1.37
Hierro (Fe)	3.8
Magnesio (Mg)	0.6

<b>Carbono (C)</b>	2
<b>Azufre (S)</b>	0.08
<b>Nitrógeno (N)</b>	0.1
<b>Fosforo (P)</b>	0.09
<b>Titanio (Ti)</b>	0.46
<b>Hidrogeno (H)</b>	0.38

**Tabla 2.** Porcentaje en peso de los elementos que conforman el suelo seco usado en la simulación tomado de (Juárez Sanz et al., 2006)

#### 1.4 Geometría del sistema en GEANT4, mina antipersonal y el suelo

A continuación se muestra la geometría del sistema general simulado en geant4, en la figura 3, las dimensiones del suelo y la mina se describieron en las secciones anteriores; además de estas geometrías se creó una superficie de 1m<sup>2</sup> sobre la superficie del suelo, donde se generan de forma aleatoria la posición inicial de las partículas del flujo que interactúa con la mina.



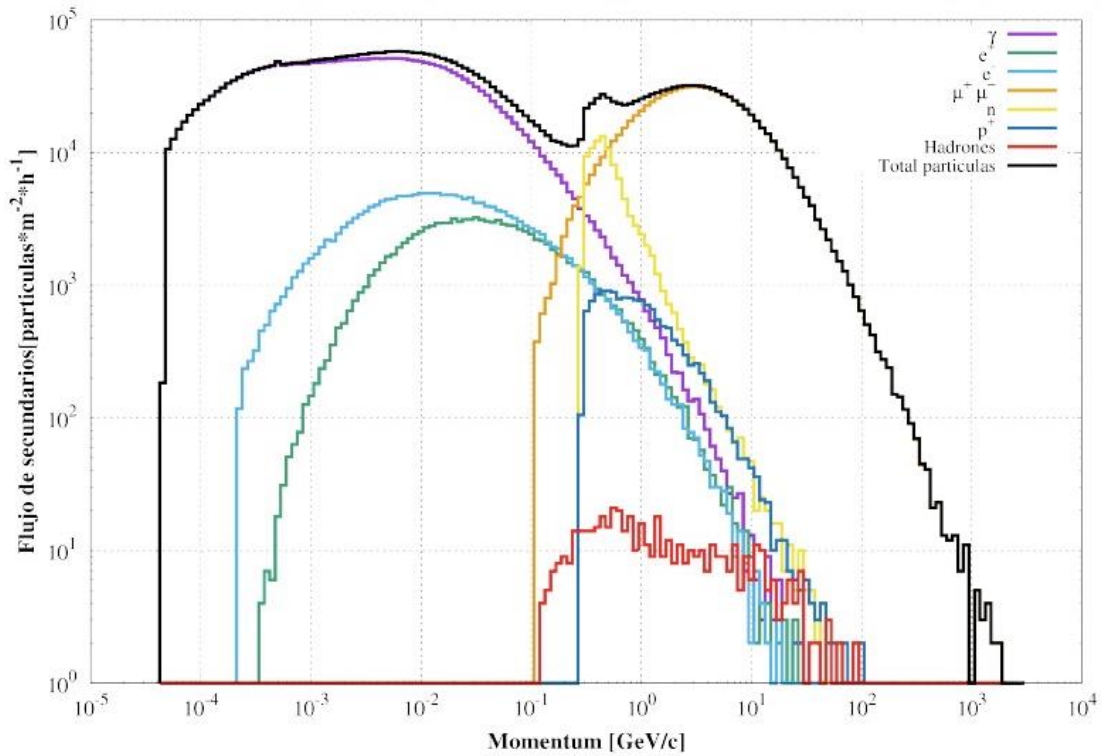
**Figura 3.** Dimensiones de la geometría del sistema. En la imagen superior se observa un cubo de 13.62 cm de lado el cual representa al suelo; la esfera de 4.81 cm de radio es la mina compuesta por ANFO; la

circunferencia en la parte superior es el plano donde se genera aleatoriamente las posiciones de las partículas secundarias. La imagen inferior es la vista superior de la geometría del sistema.

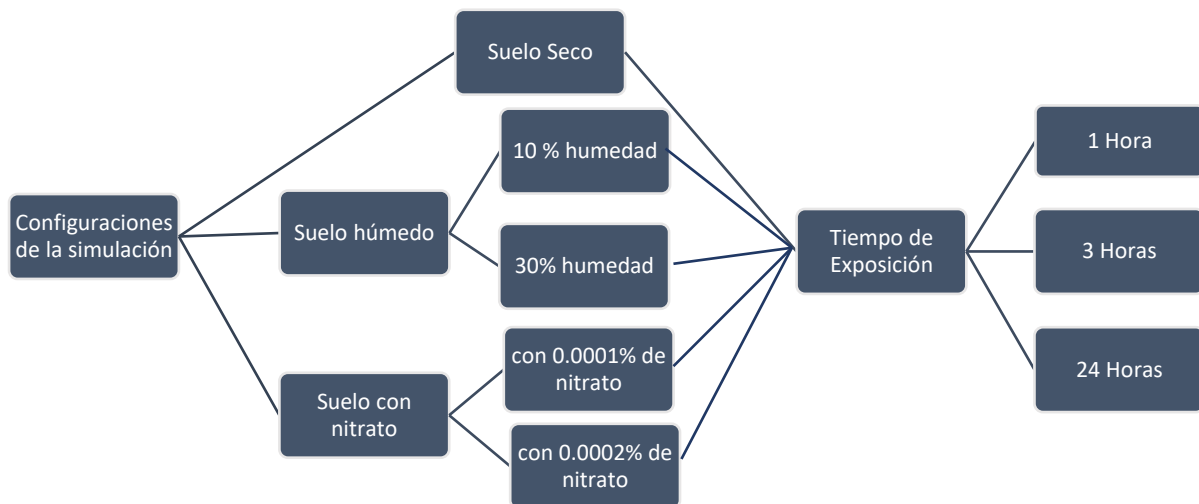
### **1.5 Simulación de la interacción del flujo de fondo de rayos cósmicos, con las diferentes configuraciones de suelo-mina.**

Para esta simulación se usó el espectro completo de partículas del flujo de fondo de rayos cósmicos a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m). El flujo de partículas secundarias usada en esta simulación fue obtenido por (Jaimes-Motta, 2018) y se puede observar en la Figura 3. Estas partículas fueron introducidas en el software GEANT4 (donde se simula la interacción de las partículas con las geometrías suelo-mina) a partir del código ARTI.

La variable que modifica la cantidad de partículas es el tiempo de flujo en horas, para Bucaramanga se tiene que en una hora de flujo hay  $3'855.333$  partículas/ $m^2$ . Para la simulación con el flujo de fondo de rayos cósmicos se seleccionaron 3 tiempos de flujo para poder comparar los efectos del tiempo de exposición, estos tiempos fueron de 1, 3 y 24 horas respectivamente. En total se realizaron 30 simulaciones, donde para cada configuración de suelo sin mina se realizó su respectiva simulación usando suelo con mina para su posterior comparación. Las 30 configuraciones se presentan en la figura 5.



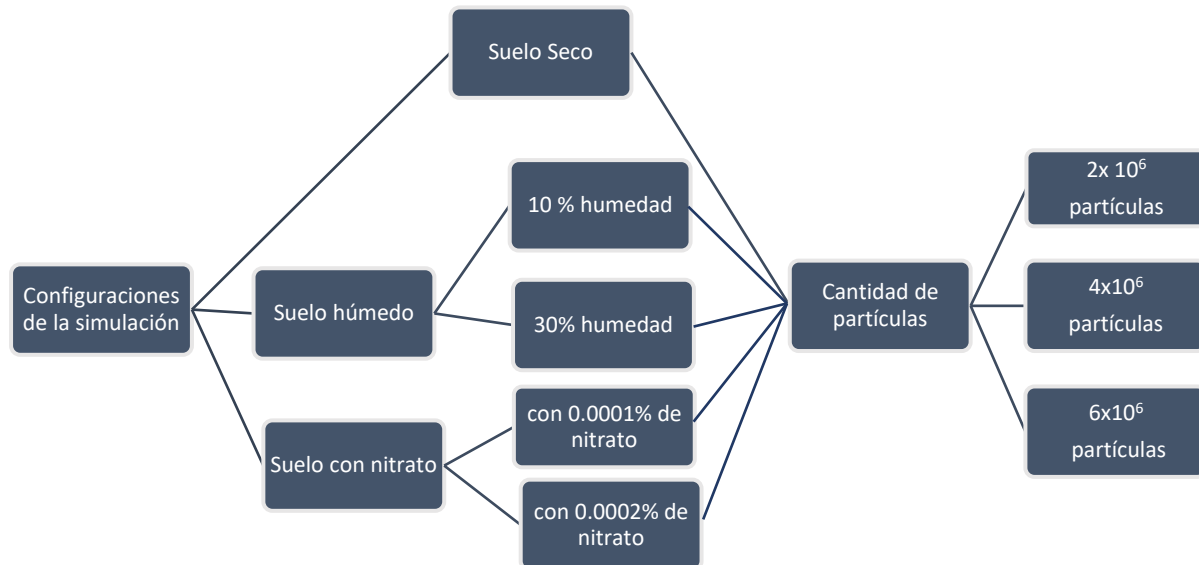
**Figura 4.** Espectro de partículas secundarias producidas a nivel de Bucaramanga (956 m.s.n.m) en un hora de flujo. Tomado de (Jaimes-Motta, 2018)



**Figura 5.** Total de configuraciones realizadas en la simulación usando el flujo de fondo de rayos cósmicos a nivel de Bucaramanga.



## 1.6 Simulación de la interacción de muones de 500 MeV con las diferentes configuraciones de suelo-mina.



**Figura 6** Diagrama que muestra las diferentes configuraciones realizadas para la interacción del suelo con los muones de 500 MeV.

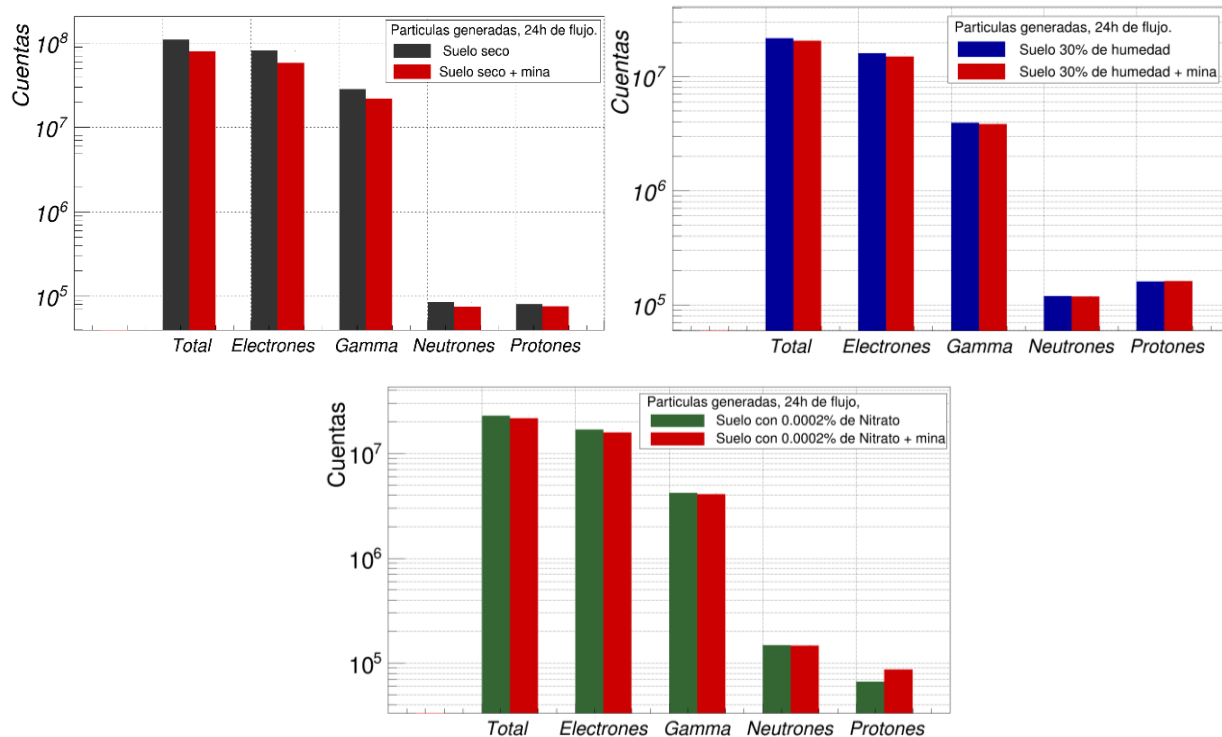
Se realizó esta simulación usando como partícula incidente muones de 500 MeV que se generan perpendicularmente en el centro de la geometría mostrada en la figura 1. Para este caso se realizaron en total 30 simulaciones; las configuraciones suelo-mina seleccionadas se muestran en la Figura 6. Se realizaron 10 simulaciones para cada cantidad de muones seleccionado.

## 2. Resultados y análisis

### 2.1 Resultados de la simulación de la interacción de la mina con secundarios a nivel de Bucaramanga.

A continuación, se mostrarán una serie de resultados que se generaron a partir de las simulaciones realizadas; en esta sección se presenta los resultados obtenidos en la simulación que emplea el flujo de secundarios; se analiza los espectros de energía que se obtienen, comparando las distintas interacciones de flujo con respecto a las configuraciones de mina.

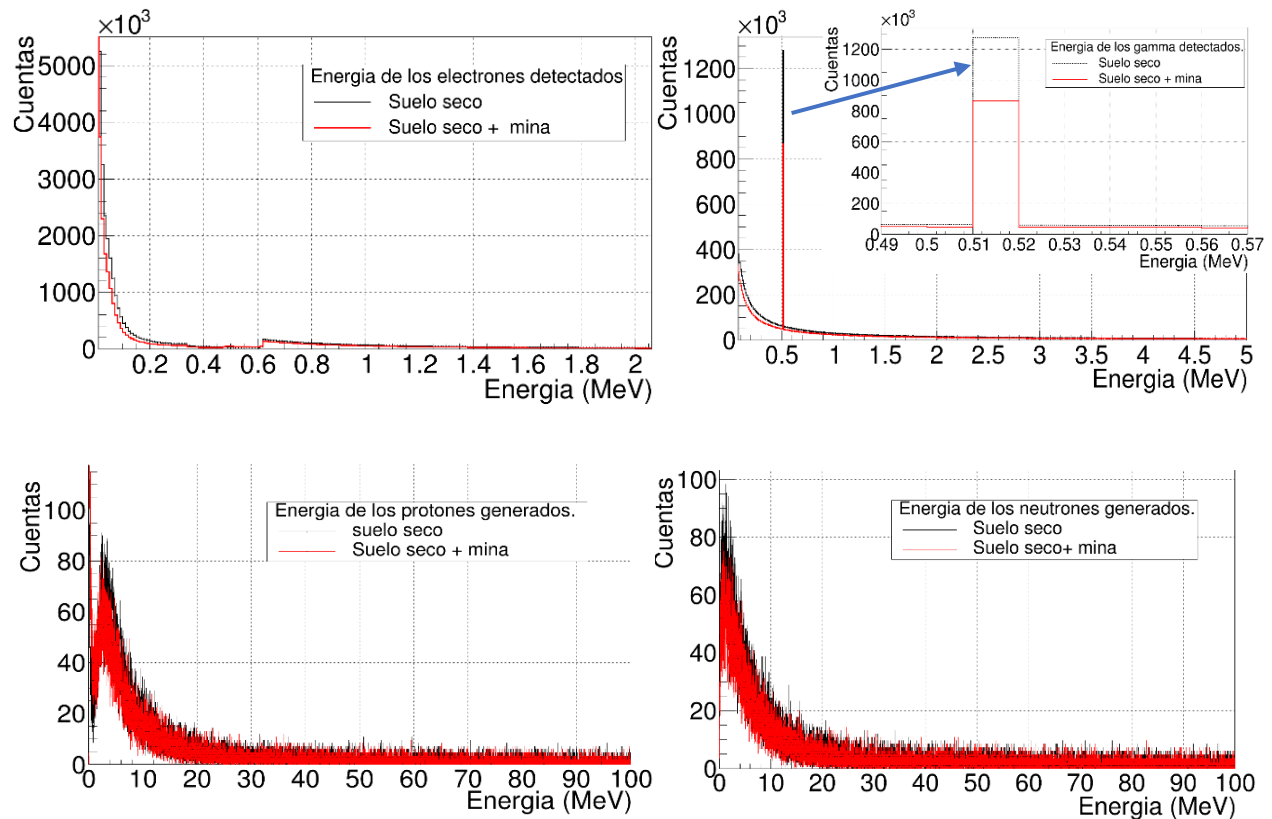
#### 2.1.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones el flujo de secundarios a nivel de Bucaramanga.



**Figura 6.** Total de partículas generadas en las diferentes configuraciones de suelo-mina, a partir de la interacción con un flujo de secundarios de  $4 \times 10^6 \frac{\text{Partículas}}{\text{m}^2 \text{h}}$ . Suelo seco (arriba a la derecha), suelo con 30% de humedad (arriba la izquierda), suelo con 0.0002% nitrato de amonio (abajo).

Al analizar los histogramas de las distintas configuraciones suelo-mina, se logra evidenciar la cantidad de partículas que se producen a partir de la interacción del flujo de secundarios con las minas, de tal manera que se puede equiparar, que tantas partículas se logra obtener de cada distribución, es decir, el número de partículas generadas en el suelo con el número de partículas generadas en el suelo con mina. La figura 6, muestra el número de partículas generadas en la interacción con el flujo de  $4 \times 10^6$  secundarios a nivel de Bucaramanga, Con suelo seco, suelo al 30% de humedad y suelo con 0,0002% de nitrato de amonio y a la vez con. Las partículas que se originaron en mayor cantidad son electrones-positrones ( $e^-$ ,  $e^+$ ), fotones ( $\gamma$ ), neutrones-antineutrones ( $n$ ,  $\bar{n}$ ) y protones ( $p^+$ ). De tal manera que el porcentaje que oscila de estas partículas en los histogramas son respectivamente: (74%-73), (27%-24%), (0,7%-0,5%) y (0,6%-0,3%). Como resultado no se puede apreciar un contraste, para las diferentes configuraciones, ya que todas presentan una similitud en la cantidad de generación de las partículas.

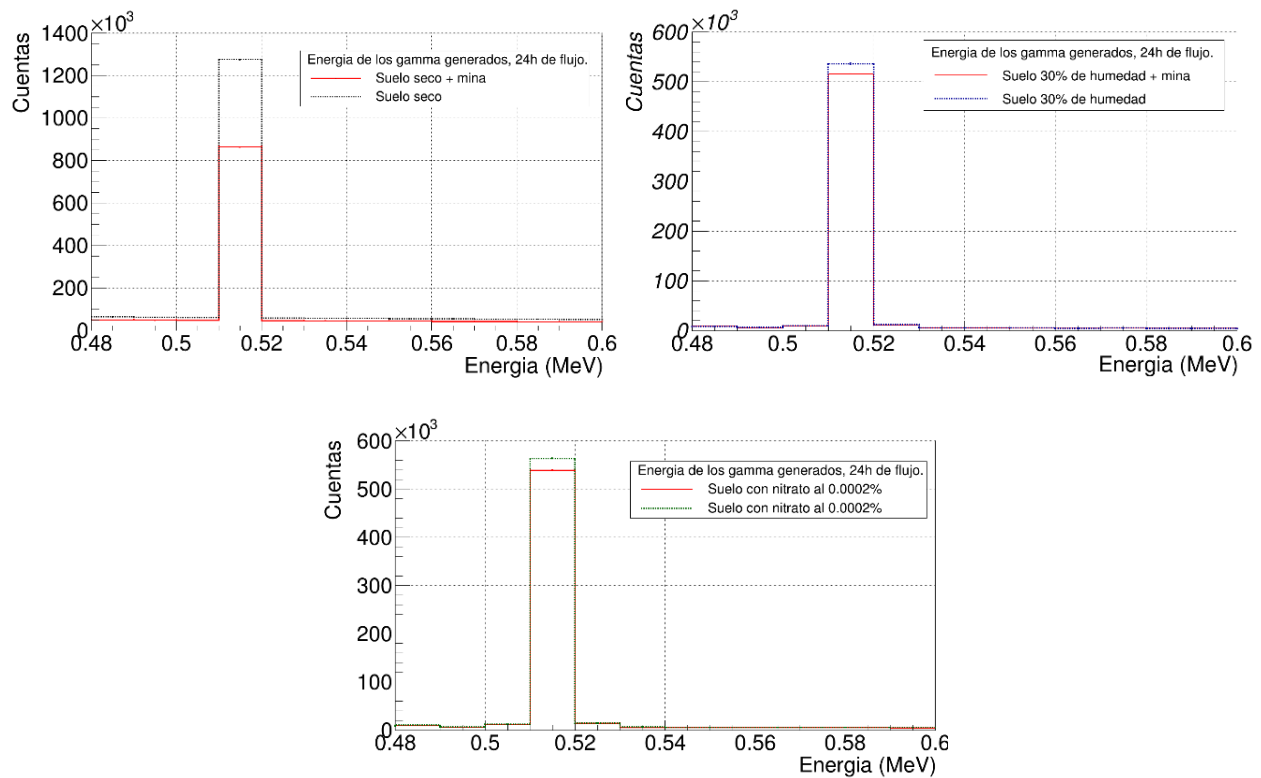
### 2.1.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas en la interacción con el flujo de secundarios.



**Figura 7.** Espectros de energía de las partículas generadas en las simulaciones después de 24 horas de interacción con flujo de secundarios a nivel de Bucaramanga: Electrones (Arriba izquierda), Gammas (Arriba derecha), Neutrones (Abajo izquierda), Protones (Abajo derecha).

Al observar el histograma del espectro de energía a comparación con la figura 6, este denota un cambio significativo en la energía de los fotones de rayos gamma como se presenta en la figura 7, y no solo en este caso se presenta, sino también se puede contemplar en las demás configuraciones de mina. Este pico representativo que se encuentra ubicado en el punto 0.511 MeV, está asociado a la masa en reposo del electrón, es decir, estos fotones provienen de la aniquilación par electrón-positrón (Luis, 2016).

Debido a que el espectro de energías de partículas generadas presenta una diferencia representativa en el caso de los fotones, se analizó esta gráfico a diferentes configuraciones que son: suelo con nitrato, suelo con humedad y suelo seco como se muestra en la figura 8.



**Figura 8.** Espectro de energía de los rayos gamma generados en las simulaciones después de 24 horas de interacción con: suelo seco (arriba izquierda), suelo con 0.002%  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (arriba derecha) y suelo con 30% de humedad (abajo) con el flujo de fondo de rayos cósmicos.

Para cuantificar la diferencia del espectro de energía de fotones cuando se tiene el suelo solo y suelo con mina, se calculó la diferencia porcentual a partir de la ecuación (1).

$$\frac{|E_s - E_m|}{E_s} \times 100 \quad (1)$$

Donde  $E_s$  representa la energía de los rayos gamma generados o detectados en la configuración suelo sin mina, y  $E_m$  representa la energía de los rayos gamma usando la configuración suelo con mina. En la tabla 3. se listan los resultados para todas las configuraciones donde puede observar que en todas ellas se obtuvo diferencias porcentuales significativas.

Tiempo de exposición Tipo de suelo	1h (%)	3h (%)	24h (%)
Suelo base seca	31.44 %	31.80%	32.25%
Suelo 10% humedad	6.43%	4.69%	4.00%

<b>Suelo 30% humedad</b>	3.67%	4.68%	3.75%
<b>Suelo nitrato 0.0001%</b>	5.50%	3.42%	3.85%
<b>Suelo nitrato 0.0002%</b>	2.30%	4.64%	4.30%

**Tabla 3.** Diferencias porcentuales entre el número de fotones de 0.511 MeV producidos en el suelo con mina respecto a los producidos en el suelo.

La tabla 3 permite visualizar las diferencias porcentuales entre el número de fotones de 0.511 MeV producidos en el suelo con mina respecto a los producidos en las distintas configuraciones, en el cual, entre ellos la gráfica que presenta la mayor diferencia porcentual, es la configuración del suelo base seca con 32.25%.

Al observar la tabla 3, es evidente que el efecto del  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  no es de gran relevancia, esto es debido a que, al comparar las diferencias porcentuales de los fotones del suelo en base seca con el suelo abonado no presenta una notable diferencia respecto al espectro de energía.

## **2.2 Resultados de la simulación de la interacción con los muones de 500 MeV**

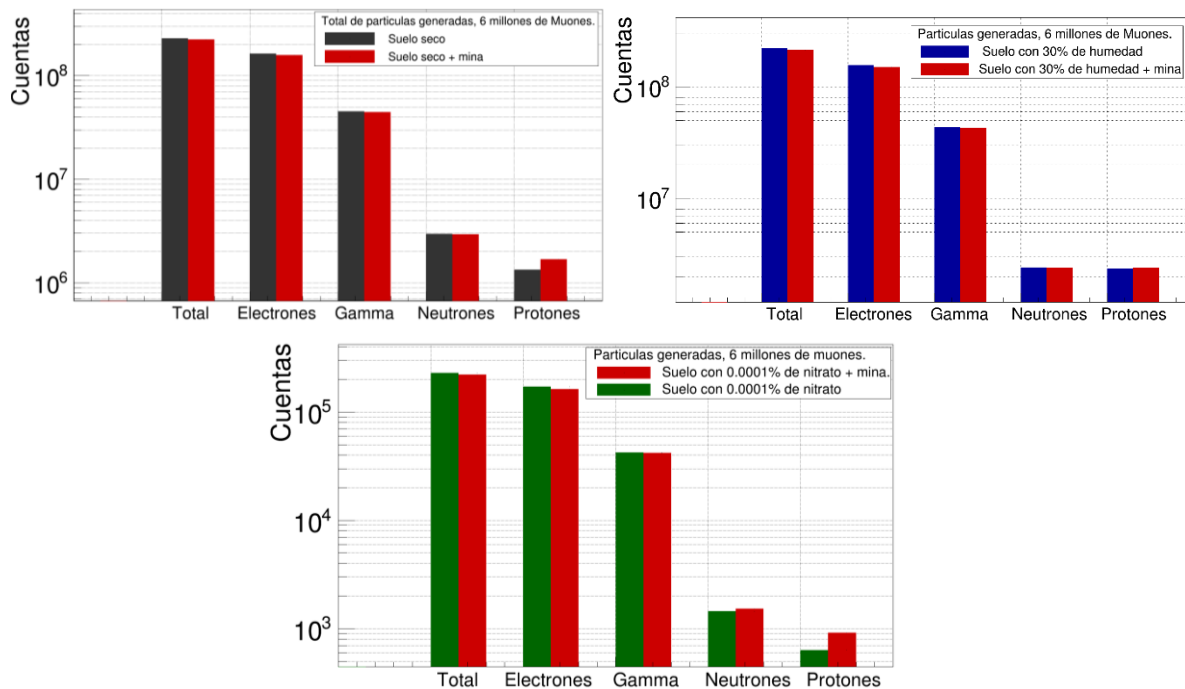
La simulación de la interacción de los muones con las configuraciones del suelo generó varios tipos de partículas que se clasificaron y contaron a partir del código empleado.

A partir de esto se estudiaron dos criterios: la cantidad de partículas generadas y las energías de estas partículas justo después de interactuar con cada configuración suelo mina.

### **2.2.1 Partículas generadas de la interacción de las configuraciones suelo-mina con muones de 500 MeV**

Para todas las configuraciones de suelo-mina se obtuvo el número de partículas generadas en el suelo con el número de partículas generadas en el suelo con mina. En la figura 10 se muestran los histogramas del número de partículas generadas en la interacción de un flujo de  $6 \times 10^6$  muones con el suelo seco, con el suelo de 30% de humedad y con el suelo 0.0001% de nitrato de amonio. Las partículas que más se produjeron son electrones y positrones ( $e^-$ ,  $e^+$ ), fotones ( $\gamma$ ), neutrones y antineutrones ( $n$ ,

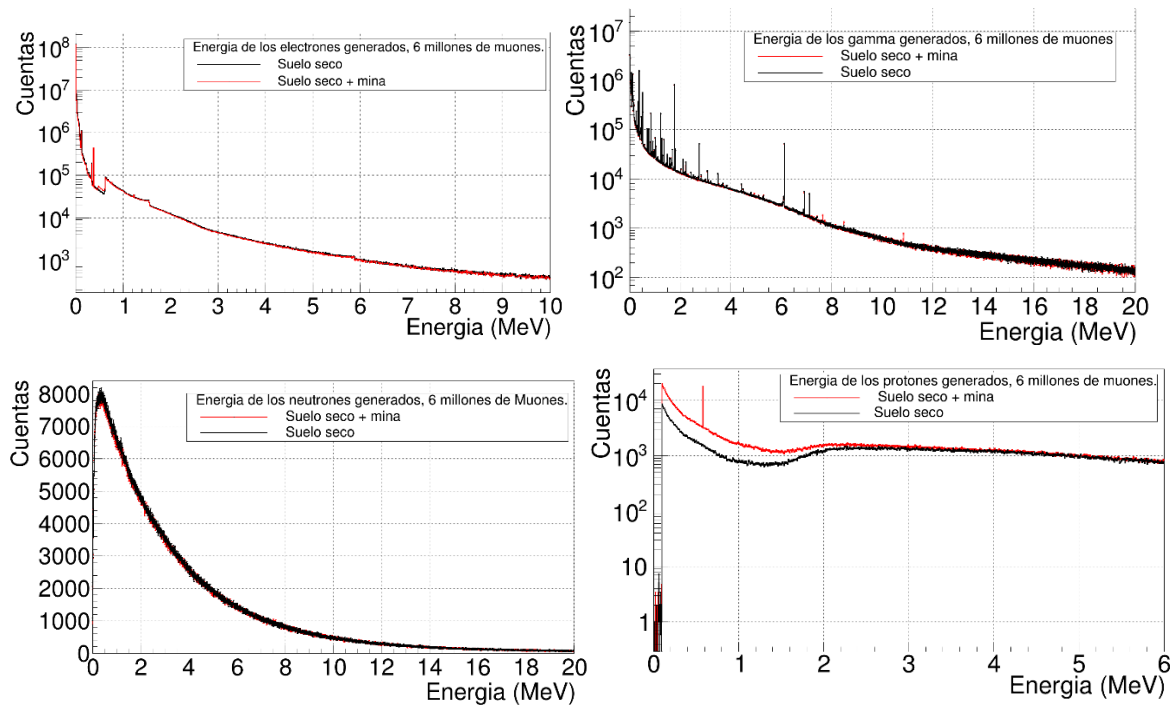
$\bar{n}$ ) y protones ( $p^+$ ). Se puede observar que el número de electrones representa alrededor del 70% de partículas generadas, seguido de los fotones con un porcentaje de 20 a 25%, los neutrones con 1 a 2 % y los protones con un 0.5% a 2%. En las gráficas se observa que no hay una diferencia apreciable en el número de partículas que se generaron, sólo existe una diferencia más apreciable para los protones en el caso del suelo seco y el suelo con 0.00001%; este comportamiento se repite para todos los tiempos de flujo de las configuraciones de suelo-mina estudiadas.



**Figura 9.** Total de partículas generadas en las diferentes configuraciones de suelo-mina, a partir de la interacción con un flujo de  $6 \times 10^6$  muones. Suelo seco (arriba a la derecha), suelo con 30% de humedad (arriba la izquierda), suelo con 0.0001% nitrato de amonio (abajo).

## 2.2.2 Análisis del espectro de energía de las partículas generadas

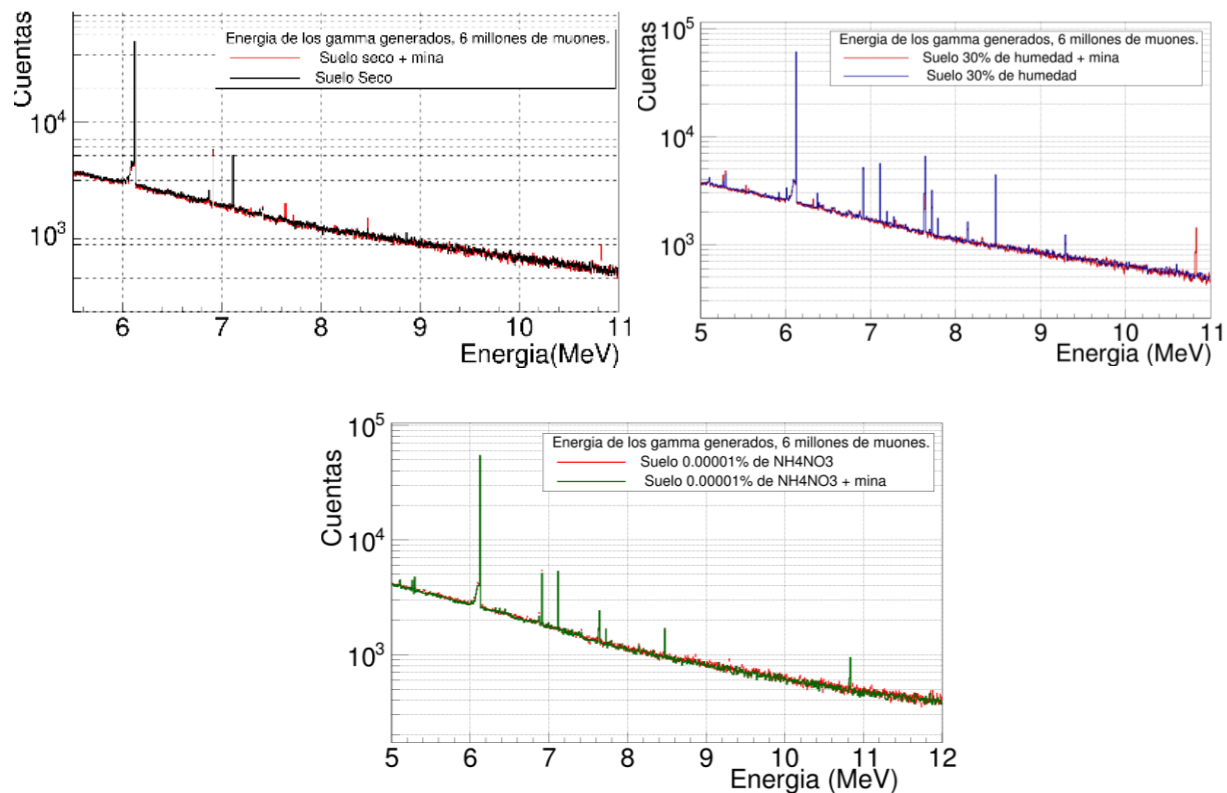
Se analizó el espectro de energías de las partículas generadas en el anterior inciso, con el fin de observar si existe una diferencia entre el suelo y el suelo con mina. El espectro de energía de las partículas generadas para el suelo seco y con un flujo de  $6 \times 10^6$  muones se presentan en la figura 10.



**Figura 10.** Espectros de energía de las partículas generadas. Arriba izquierda: Espectro de energía de los electrones. Arriba derecha: Espectro de energía de los fotones. Abajo izquierda: Espectro de energía de los neutrones. Abajo derecha: Espectro de energía de los protones.

En la figura 10 se muestra que la energía de los protones y fotones mostraron una diferencia apreciable, en el primer caso la diferencia se presenta entre los 0.1 MeV y los 3 MeV; para el segundo caso la diferencia se muestra en energías específicas: en 6.13 MeV, 8.4 MeV y 10.829 MeV. Estos puntos específicos se generan debido a la captura térmica de neutrones por los núcleos, lo cuales quedan excitados, generando un desequilibrio en el núcleo que se compensa con la emisión de rayos gamma con una energía característica del elemento con el que reacciona el neutrón. (Koltick & McConchie, 2007).

El pico de emisión de rayos gamma en 6.13 MeV está asociado al  $^{16}\text{O}$ , el pico de 8.4 MeV está asociado al  $^{28}\text{S}$ , y el pico de 10.829 MeV corresponde a un pico de emisión del  $^{14}\text{N}$  (Marziale, 2016). Para este caso el pico de emisión del nitrógeno es de interés, porque al ser la energía que muestra mayor diferencia con respecto de los otros picos puede emplearse como punto característico diferenciador.



**Figura 11.** Espectro de energía de los gamma generados, para suelo seco, suelo con 30% de humedad y suelo con 0.00001% de nitrato de amonio, para un flujo de  $6 \times 10^6$  muones. Se puede notar que el pico alrededor de 10.8 MeV muestra una diferencia con respecto al espectro de energía de los suelos sin mina, que es mas notorio para las suelos húmedos.

En la gráfica 11 se muestra el espectro de energía de los fotones generados, se puede observar que existen energías específicas donde se diferencian estos dos espectros, pero solo alrededor de 10.83 MeV la diferencia entre las dos curvas es mucho más marcada; estas graficas representan el patrón de comportamiento de la energía de los fotones generados por las 15 configuraciones de suelo.

En la tabla 4 se listan los resultados para todas las configuraciones donde se observa que en todas ellas existen diferencias porcentuales significativas. Para un flujo de  $6 \times 10^6$  muones la mayor diferencia fue de 187.16% para el suelo a 30% de humedad, la menor diferencia fue de 60.95% para la configuración de suelo seco. Para el flujo  $4 \times 10^6$  muones la diferencia más grande fue de 142.25% para la configuración de suelo-mina con un suelo de 30% de humedad, la menor diferencia porcentual fue de 61.35% para la configuración de suelo seco. Por último para un flujo de  $2 \times 10^6$  muones la diferencia más significativa se presentó para el suelo con 30% de humedad, y la diferencia menos significativa fue para la configuración con suelo seco.



<b>Cantidad de partículas</b> <b>Tipo de suelo</b>	<b>2x10<sup>6</sup> partículas</b>	<b>4x10<sup>6</sup> partículas</b>	<b>6x10<sup>6</sup> partículas</b>
<b>Suelo base seca</b>	19.84%	61.35%	60.95%
<b>Suelo 10% humedad</b>	99.12%	94.87%	83.73%
<b>Suelo 30% humedad</b>	187.16%	142.25%	187.16%
<b>Suelo nitrato 0.0001%</b>	63.94%	50.87%	163.11%
<b>Suelo nitrato 0.0002%</b>	72.12%	48.43%	159.77%

**Tabla 4.** Diferencias porcentuales entre el número de fotones de 10.83 MeV producidos en la mina respecto a los producidos en el suelo.

### 3. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos para la interacción de flujo de rayos cósmicos y el flujo muones, presentados en la figura 7 y figura 10 respectivamente, se muestran las partículas que se generaron a partir de estas interacciones mencionadas con las diferentes configuraciones de suelo-mina, donde el porcentaje de fluctuación de partículas fueron: electrones y positrones (70%-80%), seguido de los fotones (20% a 30%), los neutrones-antineutrones (0,7%-2%) y protones-antiprotones (0,6% a 1%). Al comparar la cantidad de partículas que se generan en los suelos sin mina y con mina, se observó que se generó una mayor cantidad de partículas para suelo sin mina, esto implica que la composición química de la mina tiende a generar menos partículas durante la interacción con los rayos cósmicos.

Al evaluarse el espectro de energía para el flujo de rayos cósmicos a nivel Bucaramanga se puede observar en la figura 8 la respuesta de los fotones de rayos gamma resalto sobre las otras partículas, permitiendo discriminar la mina para cada configuración, donde

existe una energía particular de 0.511 MeV en el cual se generaron mayor cantidad de partículas para el suelo sin mina. La tabla 3 muestra que las diferencias porcentuales entre los picos de 0.511 MeV son mayores para las configuraciones de suelo seco, donde para un flujo de 24h llegó a ser del 32.25%, para el suelo húmedo alrededor de 3.75% y para el suelo con  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  es 4.30%. Esta diferencia indica que para detectar minas antipersona con el flujo de secundarios es necesario que el suelo sea seco. La variable de tiempo de exposición no aumenta significativamente la diferencia porcentual para ninguna configuración suelo-mina, lo que indica que con el flujo de 3 horas es suficiente para hacer la discriminación.

Para los resultados obtenidos del espectro de energía resultante de la interacción del flujo de muones con las configuraciones suelo mina. Muestran que la humedad es relevante en la diferenciación del pico de emisión del nitrógeno (10.83 MeV) donde la cantidad de partículas que se generan para esta energía es mayor en los suelos minados, esta diferencia aumenta a medida que la humedad del suelo es mayor. Además, el efecto de la cantidad de partículas empleadas en la interacción no evidencia una diferencia notoria para los suelos con humedad.

La interacción del flujo de secundarios con las configuraciones suelo-mina mostraron que el  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  utilizado como fertilizante y la humedad del suelo son inhibidores para poder diferenciar las minas con respecto del suelo, esto se evidencia al observar las diferencias porcentuales obtenidas para estos suelos y compararlos con los resultados obtenidos para suelos secos.

## Referencias Bibliográficas

- Acción contra minas. (2011). *TIPOS DE MINAS ANTIPERSONAL EN COLOMBIA*. Bogotá. Retrieved from [WWW.ACCIONCONTRAMINAS.GOV.CO](http://WWW.ACCIONCONTRAMINAS.GOV.CO)
- Asorey, H., Nunez, L. A., Sanabria-Gomez, J. D., Sarmiento-Cano, C., Sierra-Porta, D., Suarez-Duran, M., ... Vesga-Ramírez, A. (2017). Muon Tomography sites for Colombia volcanoes, 1–24. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1705.09884>
- Babrauskas, V. (2016). Explosions of ammonium nitrate fertilizer in storage or transportation are preventable accidents. *Journal of Hazardous Materials*, 304, 134–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.040>
- Brown, K. E., Greenfield, M. T., McGrane, S. D., & Moore, D. S. (2016a). Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(1), 49–65. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>
- Brown, K. E., Greenfield, M. T., McGrane, S. D., & Moore, D. S. (2016b). Advances in explosives analysis - Part I: Animal, chemical, ion, and mechanical methods ABC Highlights: Authored by Rising Stars and Top Experts. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 408(1), 35–47. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9040-4>
- Buryakov, I. A. (2011). Detection of explosives by ion mobility spectrometry. *Journal of Analytical Chemistry*, 66(8), 674–694. <https://doi.org/10.1134/s1061934811080077>
- Cardona, L., Jiménez, J., & Vanegas, N. (2014). Landmine Detection Technologies To Face the Demining Problem in Antioquia Tecnologías Para La Detección De Minas Frente Al Problema De Desminado En Antioquia. *Dyna*, 81(183), 115–125. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n183.37441>
- Castañeda, C. X. (2015). *Minas antipersona y artefactos explosivos improvisados como elementos como elementos de la conspiración subersiva contra Colombia*. Villavicencio. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14296/2015carolcastaneda.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chiovelli, G., Michalopoulos, S., & Papaioannou, E. (2018). Landmines and Spatial Development, 1–51. Retrieved from <http://www.nber.org/papers/w24758>
- Cranney, D., & Sudweeks, W. (2012). Chemical Explosives. In *Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology: Twelfth Edition* (pp. 1473–1495). [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4259-2\\_37](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4259-2_37)
- FAO. (2019). Propiedades Físicas. Retrieved October 1, 2019, from <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>

- Gierlik, M., Borsuk, S., Guzik, Z., Iwanowska, J., Kaźmierczak, Korolczuk, S., ... Urban, A. (2016). SWAN - Detection of explosives by means of fast neutron activation analysis. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 834, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.07.042>
- Heider, S. A., & Dunn, W. L. (2015). A simulation study of fast neutron interrogation for standoff detection of improvised explosive devices. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 341–344. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.04.013>
- ICBL. (2018). *Landmine Monitor 2018 - 20th Annual Edition*. Retrieved from [www.the-monitor.org/cp](http://www.the-monitor.org/cp)
- Jaimes-Motta, A. (2018). *Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 m s.n.m)*. Universidad Industrial de Santander.
- Jaramillo, Y. A. (2009). *Determinación de técnicas de detección de explosivos óptimas para el departamento de antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Juárez Sanz, M., Sánchez Andreu, J., & Sánchez Sánchez, A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*. San Vicente del Raspeig: Digitalia. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=318168&lang=es&site=eds-live>
- Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., & Zacharias, S. (2015). Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 51(7), 5772–5790. <https://doi.org/10.1002/2015WR017169>
- Koltick, D., & McConchie, S. (2007). A neutron based vehicle borne improvised explosive device detection system. *Proceedings - International Carnahan Conference on Security Technology*, 261, 292–300. <https://doi.org/10.1109/CCST.2007.4373503>
- Lewis, A. R. (1999). The History of Landmines. *The Journal of Military History*, 63(4), 1055–1056. <https://doi.org/10.2307/120638>
- Liang, F., Lu, M., Keener, T. C., Liu, Z., & Khang, S. J. (2005). The organic composition of diesel particulate matter, diesel fuel and engine oil of a non-road diesel generator. *Journal of Environmental Monitoring*, 7(10), 983–988. <https://doi.org/10.1039/b504728e>
- Lopera, O., & Milisavljevic, N. (2007). Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground-penetrating radar : A Colombian case study, 63, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.02.002>
- Marshall, B., Warr, C. G., & de Bruyne, M. (2010). Detection of Volatile Indicators of Illicit Substances by the Olfactory Receptors of *Drosophila melanogaster*. *Chemical Senses*, 35(7), 613–625. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjq050>
- Marziale, M. D. (2016). *Thermal neutron analysis for improvised explosive device detection*. Purdue University. Retrieved from

[https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1813&context=open\\_access\\_dissertations](https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1813&context=open_access_dissertations)

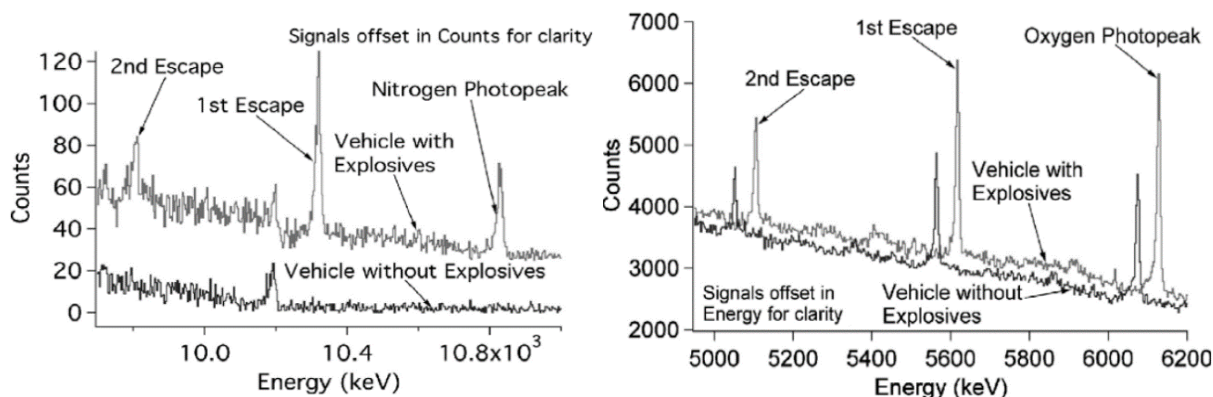
- Medina, J. (2010). *Introducción al estudio de los rayos cósmicos*. Madrid, España.: Universidad de Alcalá. Retrieved from <https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouissp/detail.action?docID=3195292#>
- Mok, H.-M. (2012). *Cosmic Rays : Climate, Weather, and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=606397&lang=es&site=eds-live>
- Mok, H. M., & Cheng, K. M. (2001). The Day-night Variation of Cosmic Rays Intensity at Sea Level Under the Influence of Meteorological Fronts and Troughs. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsarx&AN=edsarx.physics%2F0105005&lang=es&site=eds-live>
- OTAN. (2007). *Detection and Disposal of Improvised Explosives*. (H. Schubert & A. Kuznetsov, Eds.), *Detection and Disposal of Improvised Explosives*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4887-6>
- Paz, H. (2005). Minas Antipersonales En Colombia. *Indumil*, 7–12. Retrieved from <http://copernico.escuelaing.edu.co/hpaz/images/PDF/Articulo Minas.pdf>
- Reyes, A. J. (2009). *Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA. Retrieved from <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/10946>
- Rogers, C. M. (2014). Legal Landmines. *BusinessWest*, 31(5), 19. Retrieved from <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=f5h&AN=97507294&lang=es&site=eds-live>
- Sarmiento, C., Suárez, M., Vásquez, A., & et al. (2019). Modeling the LAGO ' s detectors response to secondary particles at ground level from the Antarctic to Mexico.
- Sarmiento, L. F. (2013). *Mecanismos microbiológicos para la detección de minas antipersonal*. Universidad de los Andes. Retrieved from <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto22013220.php?id=2664.pdf>
- Villaseñor, L. (2006). Rayos cósmicos ultraenergéticos: *Revista Ciencia*, 57, 64–73. Retrieved from [https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/57\\_1/rayos\\_cosmicos.pdf](https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/57_1/rayos_cosmicos.pdf)
- Whetstone, Z. D., & Kearfott, K. J. (2014). A review of conventional explosives detection using active neutron interrogation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 301(3), 629–639. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3260-5>

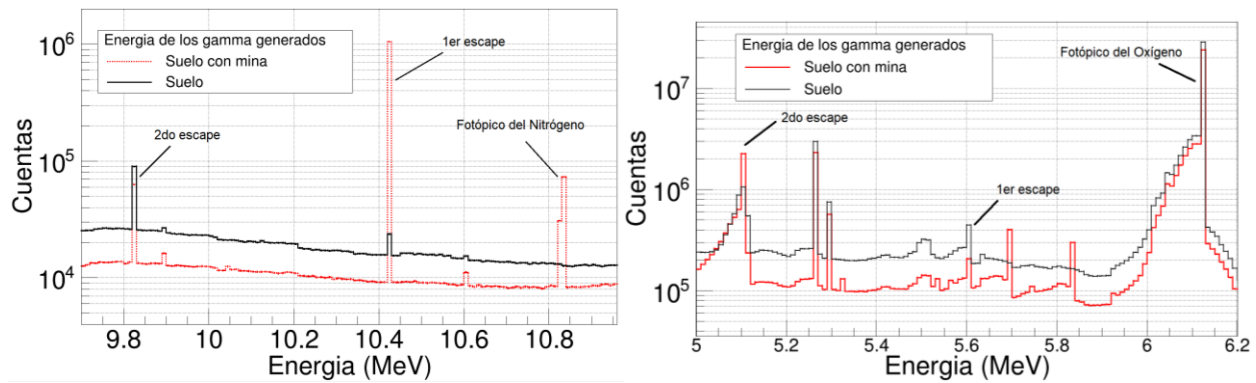
## Apéndices

### Apéndice A. Validación del código

Para validar el código utilizado en este trabajo, se simularon las condiciones del sistema de detección de explosivos empleado por (Koltick & McConchie, 2007). Este sistema totalmente automatizado fue creado con el fin de detectar gran variedad de explosivos escondidos en carros a partir del bombardeo de neutrones termicos; para este fin primeramente se emplea un generador de neutrones rápidos con una frecuencia de  $10^8$  neutrones/s y de 14 MeV, estos neutrones pasan a un reflector de uranio empobrecido que disminuye su energía hasta 1 MeV, y entran en contacto con el interior del vehículo, excitando los núcleos (en especial de los compuestos explosivos) a través de la dispersión inelástica induciendo señales de rayos gamma, detectando la cantidad de partículas y el espectro de energía estas.

Se realizaron dos simulaciones empleando como explosivo el ANFO y usando la geometría de la figura 3, esto para evaluar los resultados y compararlos con los obtenidos por Koltic; la primera simulación se utilizó suelo con mina y la segunda suelo sin mina; se bombardeó este sistema con  $10^8$  neutrones de 14 MeV con una posición inicial justo encima en el centro del suelo con mina





**Figura 12.** Espectro de energía de los gamma generados. (arriba) Resultados obtenidos por Koltick (Koltick & McConchie, 2007) en los cuales se observan varios puntos característicos como los fotópicos del oxígeno y el nitrógeno obtenidos de forma experimental. (abajo) Resultados obtenidos en la simulación, se puede observar los picos característicos del nitrógeno y el oxígeno.

Se graficaron los espectros de energía de los gamma que se generaron y se compararon con los resultados obtenidos por (Koltick & McConchie, 2007) quienes realizaron un montaje experimental que contó con un generador de neutrones de  $10^8$  neutrones/s bombardeando un vehículo con explosivos y sin ellos, recompilando los fotones que se generaron en esta interacción. Los resultados obtenidos por Koltick y en la simulación se presentan en la figura 12.

Al comparar los datos obtenidos en la simulación con los producidos por Koltick se presentan unas similitudes evidentes; en primer lugar se obtuvieron los fotópicos del oxígeno y los del nitrógeno en los mismos rangos de energía en 6.15 MeV y 10.81 MeV respectivamente, no obstante para el caso de la simulación la diferencia entre el suelo y el suelo con mina muestra una diferencia muy pequeña alrededor del fotópico del oxígeno, caso contrario para el fotópico del nitrógeno donde es mucho más apreciable; en segundo lugar los escapes para cada fotópico no se obtuvieron en las energías de los gamma captados por Koltick, en cambio se observaron en otros rangos de energías, esto puede ser debido a las diferencias en las composiciones elementales del suelo, el carro y los explosivos.