



Informe final

Medición Preliminar del Flujo de Muones en los alrededores del Volcán Galeras

Jaime Alfredo Betancourt M.

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de física

Resumen

La tomografía muonica se basa en la observación de la absorción de muones en la materia, se conoce que la interacción de rayos cósmicos de alta energía con la atmósfera generan lluvias atmosféricas extendidas (EAS) de partículas, entre ellas los muones que son partículas con una masa doscientas veces mayor a la de los electrones. Una aplicación reciente es la utilización de muones atmosféricos para el estudio de la estructura interna de los volcanes. En este trabajo se pretende caracterizar de manera preliminar el flujo de muones (número de muones por metro cuadrado por segundo) y la distribución lateral de muones (MLD) a la altura de la ciudad de pasto en los alrededores del Volcán Galeras. Para este trabajo se hace uso de un detector prototipo opto-electrónico tipo centelleo con el que se cuenta actualmente.

Conocer estas variables al aire libre nos permite determinar como la intensidad (flujo) y la distribución lateral (MLD) de muones de rayos cósmicos disminuye como resultado de su paso a través de la montaña. Por efecto de interacción radiación materia. Estas herramientas son elementos de juicio muy importantes al momento de la realización de la tomografía.

Índice

Introducción

1. **Marco Teórico, estado del arte y antecedentes**
 1. **Rayos cósmicos**
 2. **Física de rayos cósmicos**
 3. **Bases de detección de los rayos cósmicos**
 4. **Detección Directa**
 5. **Detección indirecta**
 6. **Evolución de las cascadas y producción de muones**
 7. **Dependencia de los rayos cósmicos en función del ángulo cenital**
 8. **Rango de muones de rayos cósmicos a través de las rocas**
 9. **Distribución lateral de muones**
 2. **Antecedentes**
 1. **Exploración de sitios arqueológicos por tomografía de muones**
 2. **Imágenes de residuos nucleares**
 3. **Tomografía de volcanes**
2. **Metodología**
3. **Productos resultados de actividades de Investigación**
1. **Compilación de información**
 2. **Corsika: Cosmic Ray Simulations for Cascade (CORSIKA)**
 3. **Geometry and Tracking (Geant4)**
 4. **Paquetes que permitan el análisis y procesamiento de datos como el Root**
 5. **Sistema de detección**
 1. **Cámaras RPC (Cámara de placas resistivas)**
 2. **Detectores de Centelleo**
 3. **Detector prototipo opto-electrónico**
 4. **Material Centellador EJ-200**
 5. **Fotomultiplicadores**
 6. **Low Noise, Fast, Blue-Sensitive Silicon Photomultipliers**
 7. **Componentes Electrónicos.**
 8. **La tarjeta QuarkNet DAQ**
 9. **Discriminadores**
 10. **Dispositivo Complejo Lógico Programable (Complex Programmable Logic Device, CPLD)**
 11. **Convertidor de Tiempo a Digital (TDCs)**
 12. **Micro controlador (MCU).**
 13. **Sensores Auxiliares**
 6. **Sistema de detección segmentada**
 7. **Simulación Numérica (Método de Montecarlo)**
 8. **Estudio del Método de Monte Carlo**
 1. **Implementación de simulación numérica**
 2. **Estructura de Volcán Galeras en Geant4**
 3. **Conformación de la estructura Geométrica**
 4. **Transformación del solido a un formato compatible con Geant4**
 5. **Transformación del solido a un formato compatible con Geant4**

6. *Dos tipos de cráter*
7. *Interacción muones con cráter tipo roca y aire.*
8. *Grafica de simulación en tres dimensiones del cráter roca y aire*
9. *Procesos resultantes de la interacción de los muones con el cráter tipo roca y aire*
10. *Proyección XZ de las interacciones de los muones con el cráter de aire y roca.*
11. *Proyección YZ de las interacciones de los muones con el cráter de roca y aire*
12. *Simulación de Lluvias Atmosféricas*
13. *Simulación de Lluvias Atmosféricas (EAS) con Geant4*
14. *Simulación de un detector tipo centelleo*
15. *Barras de centelleo plástico (poliviniltolueno)*
16. *Planos de barras de centelleo*
17. *Simulación completa del detector en interacción con muones de energía de 31 GeV.*
18. *Proceso físico generado en el detector*
19. *Energía depositada por los muones en el detector.*
20. *Longitud recorrida por los muones en el material detector.*
21. *Rastreo de muones en el interior detector*

4. Productos de Generación de Nuevo Conocimiento

5. Productos de Formación de Recursos Humanos

6. Productos de Apropriación Social del Conocimiento

7. Conclusiones y Recomendaciones

8. Referencias bibliográficas

Anexos

INTRODUCCION

La tomografía es una técnica empleada para explorar estructuras complejas y heterogéneas debajo de la superficie terrestre mediante la construcción de imágenes.

Los modelos tridimensionales (3-D) de la estructura terrestre, permiten dar respuesta a algunos cuestionamientos básicos de su geodinámica. En regiones volcánicas, las imágenes pueden aportar información sobre sus cámaras magmáticas o sistemas hidrotermales y otros rasgos estructurales. La reconstrucción de la estructura interna de un volcán se constituye en un insumo para la interpretación geofísica del comportamiento de la actividad eruptiva y para determinaciones más precisas de hipocentros de señales sismo-volcánicas, entre otras.

1.1. Generalidades

El volcán Galeras (VG) es uno de los más activos de Colombia, en 1991 fue declarado uno de los Volcanes de la Década por el IAVCEI como parte del programa de las Naciones Unidas de la Década Internacional para la Reducción de Desastres Naturales. Se encuentra localizado en el departamento de Nariño en el suroccidente colombiano entre $1^{\circ}13.26' N$ y $77^{\circ}21.54' W$, con una altitud máxima de 4276 m sobre el nivel del mar (fig. 1). Los indígenas Quillacingas dieron el nombre de Urcunina "Montaña de fuego" al volcán Galeras; los primeros conquistadores españoles dieron este nombre, por su semejanza con las Galeras o barcos con que navegaban en el Mediterráneo. Su cono activo está ubicado a 9 km al occidente de San Juan de Pasto (477.540 habitantes aproximadamente). El VG es un estrato-volcán conformado por depósitos de flujos de lava andesítica, flujos piroclásticos y depósitos de caídas [1].

En 1989 se inició la vigilancia continua por parte de INGEOMINAS poco tiempo después de que Galeras mostrara nuevamente signos de actividad (Torres, 2006). El actual cono activo, con una edad estimada en cerca de 4500 años, tiene una historia de volúmenes relativamente pequeños, producto de erupciones que se han caracterizado por ser moderadamente explosivas. En el estudio geológico de sus productos se han identificado episodios eruptivos importantes registrados en los años: 4500, 4000, 2900, 2300, y 1100 años antes del presente y una erupción en 1866.

Durante los últimos 500 años, la mayoría de las erupciones se han catalogado como Vulcanianas, con columnas inferidas de baja altura ($< 10\text{km}$), que han producido emisiones de gases y cenizas, pequeños flujos de lava y erupciones explosivas con la generación de flujos piroclásticos, cuyos depósitos han alcanzado distancias de hasta 9.5 km desde el cráter.

1.2. Reactivación 1989

El proceso de inicio del ciclo de actividad de Galeras comienza en junio 1988, después de un periodo de relativo reposo, presenta con una fase de limpieza de conductos volcánicos que se caracterizó por el incremento en la actividad sísmica y manifestaciones de actividad superficial, a partir de un cráter secundario denominado "El Pinta" localizado en el sector oriental del cono, con emisiones de ceniza y gases volcánicos.

En octubre de 1991, el Volcán presentó grandes cambios morfológicos en el cono al tiempo que ocurrió una intrusión magmática. Entre julio y noviembre de 1991, se dio la extrusión y emplazamiento de un domo de lava andesítica con una altura de 50m respecto a la base del cráter volcánico, con diámetros entre 80 a 100m, y un volumen estimado de 400.000 m^3 (fig. 2). Entre diciembre 1991 y julio 1992, la actividad en superficie mostró una clara disminución terminando con una erupción que destruyó el domo [2].

En julio 16 de 1992 ocurrió una erupción vulcaniana que destruyó aproximadamente el 90% de la expresión superficial del domo. El material emitido estuvo conformado básicamente por bloques andesíticos y ceniza. La erupción de enero 14 de 1993 destruyó el material restante del domo, emitido ceniza y material incandescente. La columna alcanzó una altura entre 2 y 3 km y se dispersó en dirección SSW-NNE. No fue posible estimar el volumen exacto de material emitido, pero se considera un valor mínimo de 30.000 m³. La erupción de marzo 23 de 1993 originó una columna de gases que alcanzó una altura de 8 km. El volumen emitido se estimó en 835.000 m³. Fue la erupción que produjo los mayores cambios morfológicos en el cono activo: la formación de una fisura radial de 20m de longitud, que se la denominó Novedad; y la formación de otros cráteres y campos fumarólicos a los que se les llamó Marte, Florencia y La Joya, con diámetros entre 20 y 50m hacia el sector sur del cono activo.

En abril 4 de 1993 el evento eruptivo tuvo una columna 6km de altura. La ceniza se distribuyó hacia el SW, hasta una distancia de 32 km. El volumen emitido se calculó en 180.000 m³. En junio 7 de 1993 el evento eruptivo tuvo dos fases. La primera asociada a una explosión, y la segunda fase, 18 horas después, a emisión de gases y partículas sólidas principalmente, con una altura de columna de 7 km en dirección NNE.

La columna tuvo una altura de cientos de metros. Se estimó el volumen emitido en 1'255.000 m³, el mayor volumen calculado para ese ciclo de actividad de Galeras, a partir de este momento el volcán presenta un periodo de aparente calma hasta el 2004.

En julio de 2004 el volcán Galeras incrementó su actividad después de las erupciones ocurridas entre 1991 y 1993. Este nuevo periodo estuvo marcado por 17 erupciones entre 2004 y 2010, la mayoría de carácter explosivo, relacionadas principalmente con la extrusión y destrucción de dos domos de lava, el primero en el año 2006.

En general la actividad del VG, durante el tiempo de monitoreo, ha estado caracterizada por intrusiones, extrusiones y destrucción de domos; el primero que se emplazó en 1991 y posteriormente, un segundo emplazado en 2006 y después, en 2007 y 2008 que se sobrepusieron sobre los remanentes del domo de 2006.

Las redes de monitoreo que se mencionaron aportan datos que son valiosos para propósitos de prevención y de investigación. Pero desafortunadamente ellas son muy limitadas, los métodos corrientes son indirectos; por ejemplo uno de los métodos es usar registros sísmicos, que nos dan información acerca de los caminos que han tenido que recorrer las ondas sísmicas en diferentes tipos de rocas con diferentes densidades. Usando matemáticas complejas estas ondas pueden dar información acerca de la estructura interna de la montaña.

La tomografía de muones ha sido usada para investigar el interior de un volcán (Tanaka et al, 2007). La tomografía de muones permite obtener imágenes de la estructura interna del volcán de manera directa. Y presenta ventajas adicionales realmente importantes como:

1. Mientras los métodos indirectos pueden proveer información con una resolución espacial de algunos 100 m, la tomografía de muones nos da una resolución espacial de 10 m.
2. La tomografía de muones ofrece la posibilidad de continuar el monitoreo, lo que nos da la posibilidad de obtener la evolución temporal de la estructura interna del volcán.

Conocer el flujo de muones (flujo diferencial) al aire libre nos permite determinar como la intensidad (flujo) y la distribución lateral (MLD) de muones de rayos cósmicos disminuye como resultado de su paso a través de la

montaña. Por efecto de interacción radiación materia. Estas herramientas son elementos de juicio muy importantes al momento de la realización de la tomografía.

1. Marco Teórico, estado del arte y antecedentes

1.1. Marco teórico y estado del arte:

1.1.1. Rayos cósmicos

Se denominan rayos cósmicos a partículas subatómicas procedentes del espacio exterior (Figura 1) cuya energía, debido a su gran velocidad, es muy elevada ($10^{20}\text{eV} = 16,022$ Julios, teniendo en cuenta que la energía liberada por un sismo de 4,8 en la escala de Richter libera una energía de un julio, el valor oficial dado a conocer de la energía liberada por la bomba atómica lanzada sobre Hiroshima el 6 de agosto de 1945 fue de $8,9 \times 10^{20}$ ergios= $8,9 \times 10^{13}$ julios (Bolt, 1993). Si se estima que el mayor terremoto podría tener una energía del orden de los 10^{25} ergios= 10^{18} julios, ello equivaldría aproximadamente a 12.000 bombas atómicas como la lanzada sobre Hiroshima). Producidos por mecanismos astronómicos como por ejemplo; Núcleos activos de galaxias, explosiones de supernovas, mareas solares etc. [1]. Algunas de estas partículas viajan hasta llegar a nuestro planeta y nos brindan información sobre procesos fundamentales de la física y el universo. Los rayos cósmicos fueron descubiertos por Victor Hess en 1913, físico austríaco. Se descubrieron cuando se comprobó que la atmósfera terrestre presenta la propiedad de conductividad eléctrica debido a la ionización causada por radiaciones de alta energía. Hess demostró que la ionización atmosférica aumenta proporcionalmente con la altitud, concluyó que la radiación debía proceder del espacio exterior. El descubrimiento de que la intensidad de radiación depende de la altitud indica que las partículas que provienen del espacio están eléctricamente cargadas y que son desviadas por el campo magnético terrestre [2].

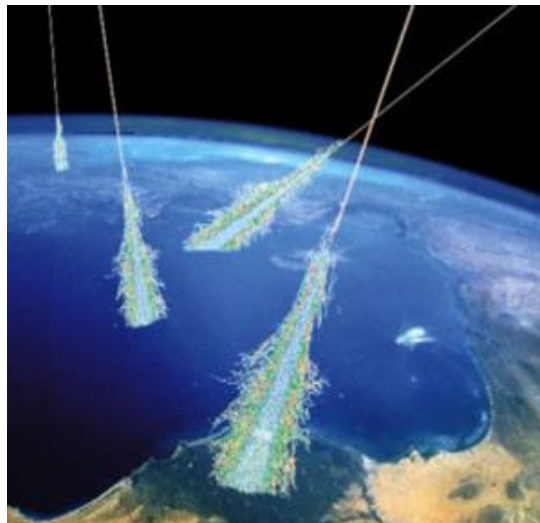


Figura 1 Lluvia de Rayos Cósmicos provenientes del exterior (Fuente CERN). Los rayos cósmicos al penetrar la atmósfera adquieren la forma de una escoba por qué interactúan con las moléculas de la atmósfera produciendo más partículas.

Los rayos cósmicos están constituidos principalmente por núcleos atómicos (N), protones (p), electrones (e^-), positrones (e^+), rayos gama (γ) y neutrinos (ν). Estas partículas al interactuar con oxígeno o nitrógeno presentes en la atmósfera generan otro tipo de partículas como; electrones (e^-), positrones (e^+), piones cargados (π^+ o π^-) y neutros (π^0), muones (μ^\mp), neutrinos (ν) y fragmentos nucleares.

Por casi un siglo los científicos han estudiado su composición, espectro de energía (sigue una ley de potencia $N(E)dE \approx E^{-\gamma} dE$), propagación y mecanismos de aceleración, en busca de su origen. Los Muones (μ^-) que son partículas elementales (no poseen estructura interna), masivas ($m_\mu=105.6\text{MeV}/c^2=207m_e$), pertenecen a la segunda generación de leptones (partículas livianas), su spin es $1/2$ por lo tanto son consideradas como fermiones (obedecen la estadística de Fermi), poseen carga eléctrica negativa como el electrón (e^-), su vida es más larga que otras partículas inestables (tiempo de vida de un muon $\tau=2.2 \mu\text{s}$), su correspondiente antipartícula es antimuon (μ^+).

La pérdida de energía de los muones que pasan a través de la atmósfera, es proporcional a la cantidad de materia que atraviesan, siendo partículas, interactúan con la materia ionizándola y excitándola. El medio que atraviesan los muones se caracteriza generalmente por su densidad (g/cm^3), multiplicada por la distancia recorrida en centímetros. Esto a veces se llama longitud de interacción y se mide en g/cm^2 . La pérdida de energía por longitud de interacción de los muones es de aproximadamente 2MeV por g/cm^2 . La profundidad de la interacción con la atmósfera, es de unos 1000 cm^2 , por lo que los muones pierden alrededor de 2GeV al pasar por la atmósfera. Con una energía media de muones en la superficie del mar de 4GeV , esto sugiere una energía original de muones en las proximidades de la atmósfera terrestre de 6 GeV .

El flujo de muones es función del ángulo de cenital (Θ), la energía (E) y la longitud de interacción, no es muy grande alrededor de un muon por centímetro cuadrado por minuto al nivel del mar ($1\mu/\text{cm}^2/\text{min}$), pero nos llegan continuamente y nos permite sondear la estructura interna de los volcanes.

1.1.2. Física de rayos cósmicos

Los experimentos de rayos cósmicos suelen aprovechar entonces los efectos de la llegada de estas partículas (núcleos o protones) a la atmósfera terrestre. A partir del ingreso de las partículas primarias en la atmósfera, se produce una serie de interacciones con la materia presente en la atmósfera, fenómeno denominado Extensive Air Shower (EAS), que suele ser traducido como "cascada" de partículas o lluvia de partículas. Este fenómeno, consiste en que la partícula primaria interacciona con la materia presente en la alta atmósfera, con energía suficiente para crear nuevas partículas (10^{11} aproximadamente), ellas también con energía suficiente para avanzar y crear nuevas partículas. Este proceso se repite en el avance hasta que la energía disponible no permita creaciones de nuevas partículas y se producen fenómenos de absorción y pérdida de energía.

Mediante el análisis de la fenomenología de estas cascadas de partículas secundarias, es entonces que los experimentos de rayos cósmicos estudian las características de las partículas primarias de ultra-alta energía (10^{20} eV). Por lo tanto, es importante estudiar las características de la evolución de las cascadas; los parámetros involucrados y su detección.

1.1.3. Bases de detección de los rayos cósmicos (muones)

La detección de los rayos cósmicos aprovecha la tecnología usada en física de partículas, los métodos de

detección dependen de la energía y tipo de partículas a detectar. Los más usados son por detección directa y detección indirecta al interactuar con la atmósfera

1.1.3.1. **Detección directa:** La mayor parte de los rayos cósmicos son partículas que interactúan de manera electromagnética con la materia. Las partículas cargadas (protones, muones, etc.) son partículas que ionizan la materia y se pueden detectar con tubos Geiger Muller o centelladores. En el caso de partículas neutras (neutrones, fotones, etc.) son partículas que se detectan al paso del material del detector para producir otras partículas que luego serán detectadas mediante los mecanismos mencionados anteriormente. Otra técnica comúnmente usada es mediante la técnica de luz Coherente. Una partícula energética que viaja más rápido que la luz en un medio emite una onda de choque, llamada luz Cherenkov. Un ejemplo de un medio puede ser agua que es económica y transparente, permitiendo la detección de la luz e indirectamente la detección de partículas de altas energías.

1.1.3.2. **Detección indirecta (interacciones con la atmósfera):** Al aumentar la energía de los rayos cósmicos se vuelven más infrecuentes y la detección directa se hace cada vez más difícil. Afortunadamente los rayos cósmicos de muy alta energía ($E > 10^{14}$ eV), al chocar con las moléculas de la atmósfera producen una cascada de partículas secundarias (ionizantes y no ionizantes). Llamadas cascadas aéreas extendidas (CAE). El número de partículas secundarias es muy alto para detectarlas individualmente y el área es muy extensa. Por tal motivo los experimentos que tratan de detectar partículas de estas características están espaciados sobre una gran área, como es el caso del experimento Pierre Auger [3].

Otro método consiste en la detección de luz de fluorescencia emitida cuando las partículas electromagnéticas secundarias interactúan con la atmósfera.

1.1.4. ***Evolución de las cascadas y producción de muones***

La atmósfera como gran volumen de materia para interacciones tiene, entre otras, las siguientes características que podemos enumerar:

1. Su baja densidad atómica permite una extensa dispersión de las partículas secundarias (como muones).
2. El espesor vertical es suficiente para que las cascadas alcancen el desarrollo máximo de partículas, permitiendo relacionar proporcionalmente el número total de partículas con la energía total.
3. La inhomogeneidad del perfil de densidad permite establecer para su estudio las diferentes zonas de desarrollo de las cascadas donde se producen los procesos de multiplicación (ej. como producción de muones) y absorción de partículas.

La cascada generada por la interacción entre la partícula primaria y la alta atmósfera tiene la forma aproximada, en cada instante de tiempo, de un disco centrado en el eje de la lluvia que va aumentando su diámetro a medida que avanza. Este disco se mueve prácticamente a la velocidad de la luz. Si pudiéramos observar el frente de la cascada en un instante observaríamos que ese disco concentra cercano al eje a "muones" (μ) que mayoritariamente avanzarán sin interactuar y a numerosos electrones y rayos originados por partículas cercanas al eje. A medida que nos alejamos del centro el espesor del disco aumenta producto de partículas ampliamente dispersadas, la parte frontal constituido mayoritariamente por muones, que interactuaron poco; mientras que varios microsegundos después se encuentra la última de las partículas electromagnéticas.

Cuando examinamos las partículas involucradas en la lluvia, observamos que en el caso de que la partícula primaria sea un nucleón (p) o un núcleo (N), la cascada comienza con una interacción hadrónica (interacción de

protones o núcleos con moléculas de la atmosfera). A partir de ese punto, debido al tipo de partículas involucradas en la lluvia, podemos identificar dentro de la cascada tres componentes:

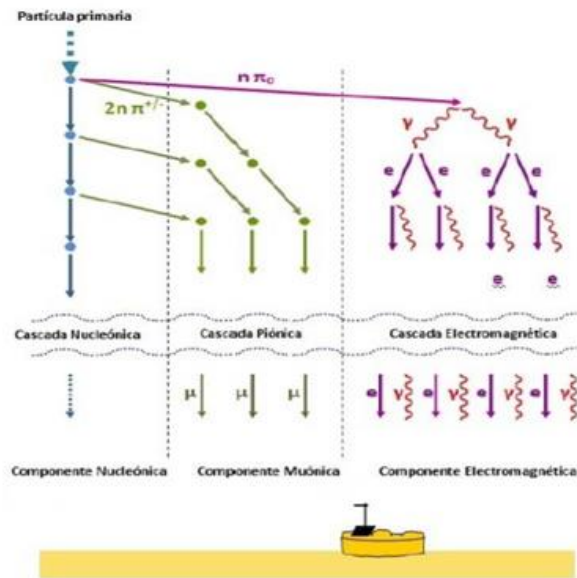


Figura 2 Diagrama esquemático mostrando los procesos principales en las cascadas.

- La componente electromagnética
- La componente muónica
- La componente nucleónica: Esta componente se encuentra concentrada en un área estrecha cercana al núcleo, mientras que las componentes muónicas y electromagnéticas cubren un área extensa. Dependiendo del tipo de partícula primaria, la energía y la inclinación del eje de la cascada, se observara a nivel del suelo una distinta contribución de cada una de las componentes (Figura 2).

La componente muónica se origina a partir del decaimiento de los piones cargados y kaones (K^+) producidos a partir de las interacciones hadrónicas en las sucesivas generaciones de partículas. Los piones π^+ y π^- de la generación inicial en su mayoría no decaen, sino que realizan nuevas interacciones. Después de algunas generaciones, las energías de los piones cargados y kaones individuales ha disminuido lo suficiente, y acorde a su vida media ($(2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s y $1,24 \times 10^{-8}$ s. [4]), es que comienzan a producirse los decaimientos del tipo (pion decayendo en un muon más un neutrino del tipo muonico y kaón cargado decayendo en un muon más un neutrino del tipo muonico):



Generando la cascada muónica compuesta por muones y sus correspondientes neutrinos. Los muones no se

multiplican y se absorben muy lentamente por ionización, con lo cual la mayoría penetra hasta alcanzar el nivel del suelo, estos procesos pueden verse claramente en el diagrama de la Figura 3.

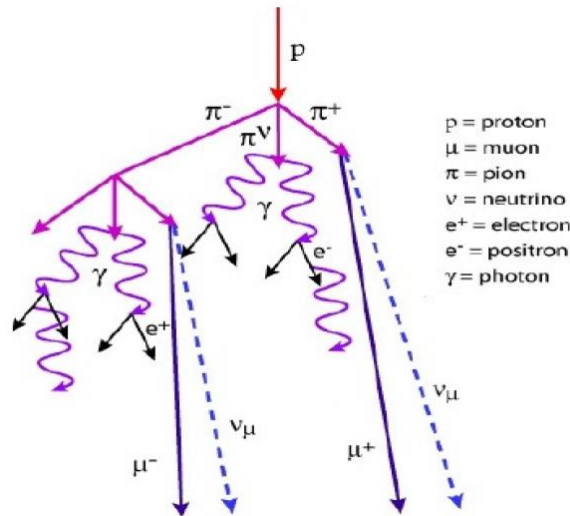


Figura 3 Diagrama esquemático de la formación de muones a partir de un protón [5].

Es importante mencionar también que la cascada muonica (flujo muónico) se ve fuertemente influenciada por el ángulo de inclinación (Θ) de la lluvia [6], consecuentemente para una lluvia de gran inclinación, la mayoría de la energía que llega a la superficie es aportada por muones.

1.1.5. Dependencia de los rayos cósmicos en función del ángulo de inclinación (Θ)

La expresión de Thomson y Whalley [7], asume que las partículas padres de los muones son piones (π^\pm) y kaones (K^\pm) con producción de un espectro de energía de la forma $AE^{-\gamma}$, con $\gamma \cong 2.70$. El espectro de energía de muones en un intervalo diferencial de energía $N_\mu dE_\mu$ al nivel del mar que arriban con un ángulo de inclinación Θ está dado por:

$$N_\mu(E_\mu, \Theta) dE_\mu = AW_\mu(E_\mu + \Delta E_\mu)^{-\gamma} \left[\frac{0,36b r_k^{\gamma-1} B_k \sec \Theta}{E_\mu + \Delta E_\mu + B_k \sec \Theta} + \frac{r_\pi^{\gamma-1} B_\pi \sec \Theta}{E_\mu + \Delta E_\mu + B_\pi \sec \Theta} \right] dE_\mu \quad (3)$$

Donde W_μ es la probabilidad supervivencia de un muon. El cociente del momento del muon con el momento del pion (π^\pm) padre es ($r_\pi=0,78$), y del kaón padre ($r_k=0,52$). $B_\pi=90\text{GeV}$ y $B_k=442\text{GeV}$ son las energías de los piones y kaones respectivamente para una longitud de decaimiento correspondiente al ancho de la capa atmosférica. El cociente correspondiente modo de decaimiento K_μ es $b_r=0,635$ y ΔE_μ es la energía perdida por los muones en la

atmósfera desde el tope hasta el nivel del mar.

1.1.6. Rango de muones de rayos cósmicos a través de las rocas

Una gran cantidad de energía de los muones se pierde al paso a través de las rocas. Esta pérdida de energía al paso a través de la materia se expresa en función de E (pérdida de energía por unidad de longitud), de la siguiente forma:

$$-\frac{dE}{dx} = K(E) + b_b E + b_p(E)E + b_n E \quad (4)$$

Los términos que aparecen en la ecuación son producidos por: $K(E)$ energía de ionización, $b_b E$ Bremsstrahlung (radiación debido a la desaceleración de una partícula cargada), $b_p E$ producción de pares y $b_n E$ por interacciones nucleares. Sus valores han sido ya determinados [8], por lo tanto, una única relación entre x (rango) y la intensidad ($N_\mu(E_c, \theta)$) de penetración de los muones, está determinada a través de las relaciones 3 y 4 donde E_c es la energía mínima de los muones de rayos cósmicos que llegan a un ángulo de inclinación θ que penetran la roca. El flujo integrado de muones a varios ángulos (θ) de penetración a través de una roca (m) con una densidad de 2.5 g/cm^3 se muestra en la Figura 4:

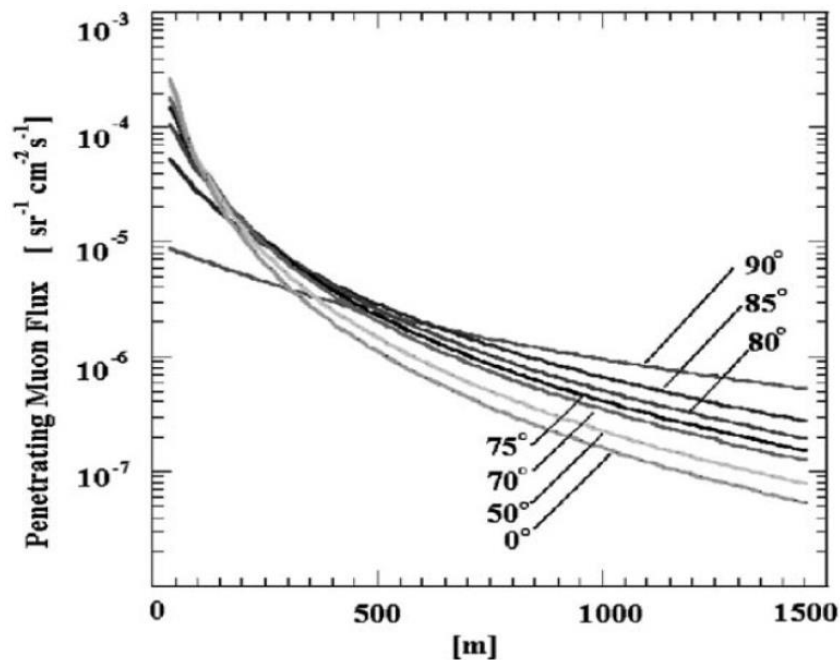


Figura 4 Flujo integrado de muones a varios ángulos (θ) de penetración a través de una roca (m) con una densidad de 2.5 g/cm^3 [9].

1.1.7. Distribución lateral de muones

Los muones generados por decaimientos en las EAS (lluvias atmosféricas extendidas) interactúan débilmente con la atmósfera perdiendo una mínima cantidad de energía, proporcionando un flujo considerable de muones que

arriban a la superficie terrestre. La tomografía posibilitará el desarrollo de un método para la detección temprana de una posible erupción del VG. El estudio de las lluvias atmosféricas extendidas permite obtener el flujo de muones, la distribución lateral de muones (MLD) y el espectro de energía para los muones que arriban a la altura de la ciudad de Pasto. La MLD consiste en obtener el número de muones por metro cuadrado en función de la distancia desde el punto de impacto con respecto al plano de la lluvia (ver Figura 5 [10]). Mediante el estudio de la MLD se pretende cual es el número estimado de muones que llegan a la superficie en la altura de la ciudad de Pasto.

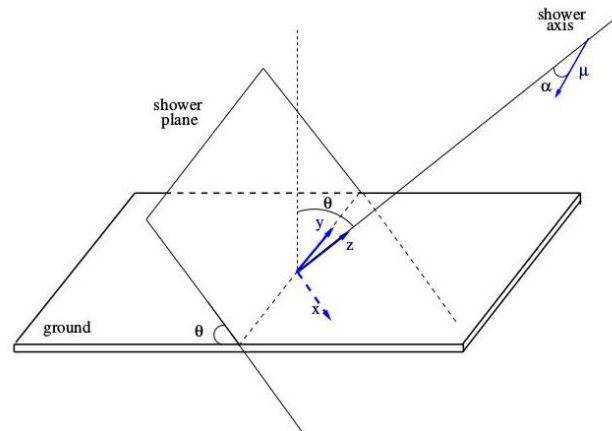


Figura 5 Esquema que muestra el plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), la superficie terrestre y el sistema de coordenadas.

Se puede medir lluvias verticales a diferentes ángulos cenitales (por ej: $\theta = 0^\circ$ para obtener un número máximo de muones que arriban a la superficie y para valores mayores de θ un número menor de muones). Respecto al primario (protones o núcleos) y su energía inicial que puede ser de 1, 10, 100 TeV, según se observa en la Figura 6 [11] debido a que en estas energías el flujo de partículas es el mayor posible.

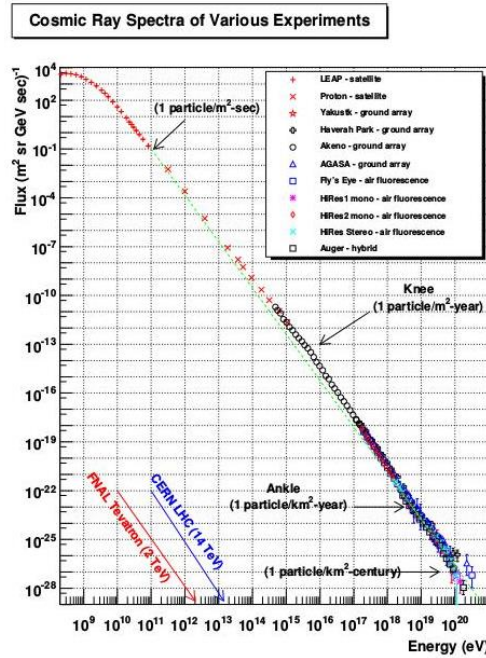


Figura 6 Flujo de partículas en función de la energía.

Para la medición preliminar de las EAS, Es necesario utilizar el modelo atmosférico más adecuado que se ajuste a las condiciones y se tomará el modelo tropical de CORSIKA [12] y los valores de las componentes Bx y Bz del campo magnético generados en la calculadora geomag [13] para la ciudad de Pasto.

Trabajos adicionales se deben realizar para trabajos futuros en lo que respecta a la simulación en GEANT4 de una EAS generada por un protón enviado desde una altura de 50 km, con una energía de 100 GeV y con un ángulo cenital $\theta = 0^\circ$ que impacta inicialmente en la atmósfera y luego en el cono volcánico. Para la altura se toma como punto de referencia la base de un cono volcánico ideal con dimensiones de 8.18 km de diámetro en la base y una altura de 1.75 km, estas medidas son las aproximadas a las del VG vistas desde la ciudad de Pasto que esta a una altura media de 2527 msnm [14].

Con la medición se pretende obtener número de muones por metro cuadrado por segundo (flujo=muon/metro-cuadrado-segundo) provenientes de un primario que puede ser un protón a diferentes energías 1 TeV, 10 TeV y 100 TeV. y la MLD.

En estas condiciones la MLD obtenida a partir de la información extraída de las mediciones se compara con la ecuación de Nishimura-Kamata-Greisen [15][16] para el arreglo de detectores KASCADE-Grande [17]:

$$\rho_\mu = N_\mu \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{r}{10r_0}\right)^2\right)^{-\gamma} \quad (5)$$

En cuanto a la atmósfera es importante realizar un cálculo del perfil atmosférico para la ciudad de Pasto usando los datos presentes en la plataforma Global Data Assimilation System (GDAS) [18].

1.2. Antecedentes

1.2.1. Exploración de sitios arqueológicos por tomografía de muones

En 1969 el físico premio nobel Luis Alvares desarrollo un método para explorar la parte interior de la pirámide de Guiza en Egipto, usando rayos cósmicos [19]. Los muones pierden energía por ionización [20] al atravesar la materia hasta ser absorbidos, una mínima relación dada por:

$$\frac{dE}{dx} = 2,3 \frac{\text{MeV/gm}}{\text{cm}^3} = 0,6 \text{ GeV/m} \quad (6)$$

Es posible midiendo el flujo y el espectro de muones en una dirección, estimar el espesor de la roca y buscar cavidades, que aparecerían como un exceso relativo del flujo de muones. Se puede medir el número de muones (N) para llegar a una sensibilidad (ξ) suficiente:

$$N = \left[\frac{\xi L}{(n-1)X} \right]^2 \quad (7)$$

Donde n es un factor que depende de la energía del muon y X es la dimensión típica de la cavidad. Basados en estos cálculos Álvarez pudo tomar una tomografía similar a la de los rayos X ubicando unos detectores (cámaras de detección, spark chambers) debajo de la pirámide midiendo el flujo que le llegaba de distintas direcciones (Figura 7). Las diferencias de flujo provendrían de cavidades o cámaras escondidas en la pirámide. En 1969 después de explorar no encontró ninguna evidencia de que tales cámaras existieran.

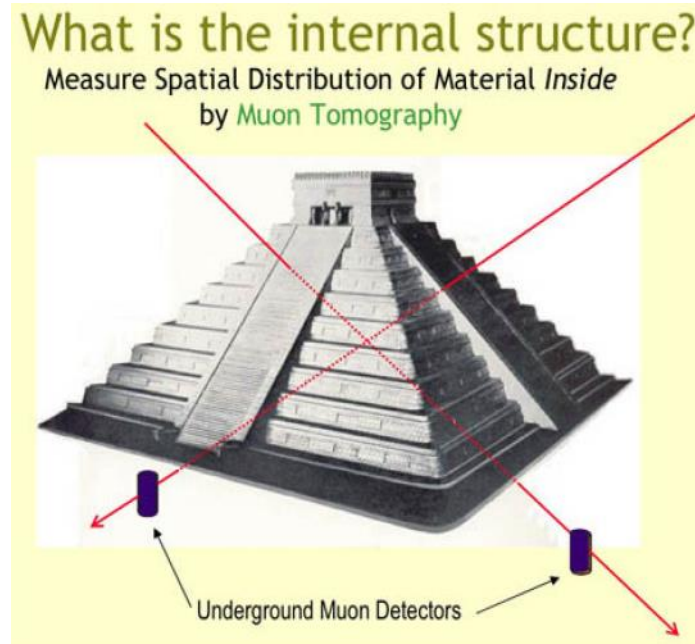


Figura 7 Pirámide de Giza. Fuente: CERN(2012).

1.2.2. Imágenes de residuos nucleares

Lo que han propuesto recientemente Guz Jonkmans y sus colaboradores [21], es utilizar los muones para analizar los residuos nucleares o intentar descubrir material nuclear escondido en grandes contenedores. Al atravesar materiales de alto número atómico (Z) como Plutonio y Uranio, la dispersión sufrida por los muones es mayor. La idea es detectar los muones antes de pasar por el contenedor y después, se puede así calcular el ángulo de dispersión. Con estas medidas se puede llegar a medir cual sería el contenido de estos contenedores, aunque puede tener problemas de resolución se consigue realizar imágenes del interior. En el caso de almacenes nucleares se pueden obtener imágenes detalladas de los residuos nucleares dentro del almacén. Lo bueno de estas aplicaciones es que son fáciles de realizar, para las radiografías se necesita el aparato que produce los rayos-X, en este caso los "rayos-X" nos los proporciona la naturaleza (y gratis) solo hay que detectarlos.

Científicos japoneses han desarrollado un método para usar los rayos cósmicos para ver a través de un reactor nuclear, aumentando las esperanzas para la localización y la contabilidad del combustible fundido en el interior de la destrozada planta nuclear de Fukushima (Figura 8).

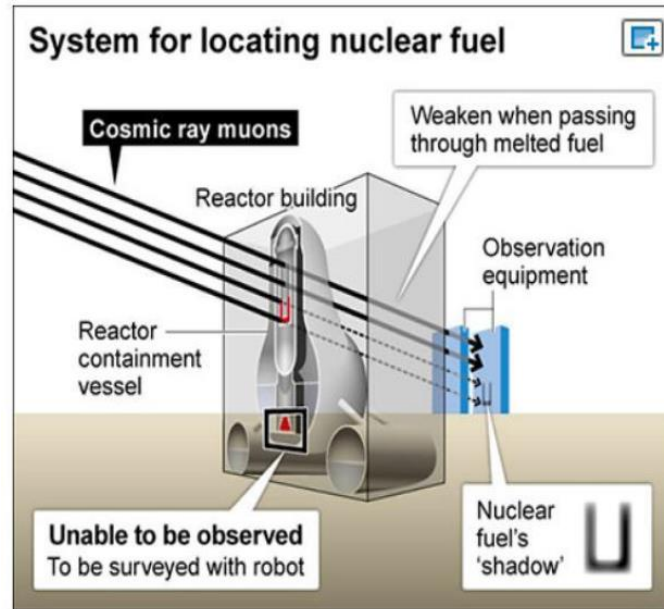


Figura 8 Imagen del interior de la planta nuclear de Fukushima. Fuente: Shimbun(2014).

1.2.3. Tomografía de volcanes

Las anteriores no son las únicas de las aplicaciones, desde entonces los muones se han utilizado para obtener imágenes de la estructura de interna de los volcanes e intentar predecir erupciones, Tanaka [6]. Realizaron una tomografía de la parte superior del volcán Asama en Hoshu Japón. La presencia de rocas de baja densidad puede ser usada en simuladores para predecir posibles erupciones e indicar regiones de mayor peligrosidad en el interior de un volcán.

Una de las últimas aplicaciones se relaciona con el estudio de los domos de lava que son una de las características topográficas visibles en los volcanes. La aplicación se realiza en el volcán Usu, Hokkaido (Japón), donde se formó un domo de lava en 1944 después de la erupción. A está cúpula de lava, se le aplicaron diversos métodos geofísicos para estudiar la estructura del subsuelo, pero dieron conclusiones ambiguas. En el trabajo que presentan los autores, utilizan la radiografía de muones para estudiar la cúpula de lava del volcán Usu.

La radiografía de muones se utiliza para medir la distribución de la densidad de los cuerpos volcánicos cuando se disponen de una buena distribución de detectores. El resultado obtenido es consistente con el modelo deducido a partir de tomografía sísmica. La medida muestra otro método útil para aclarar la estructura del subsuelo de volcanes y sus cambios temporales, y a su vez para discutir los procesos volcánicos. Es un punto de contacto entre la física de alta energía y física de los volcanes [22].

En el mismo marco de trabajo se utiliza la radiografía de muones para determinar la densidad media de los cuerpos geológicos mediante la medición de la atenuación producida por las rocas en el flujo de muones cósmicos. Las imágenes de densidad del domo de lava Guadalupe obtenidos para el volcán Soufriere (Parque Nacional de Guadalupe) para los planos norte-sur y Este-Oeste (Figura 9). Donde las radiografías revelan la estructura de

densidad muy heterogénea del volcán, con las regiones de baja densidad que corresponden a las zonas de alteración hidrotermal ya reconocidas. Estas estructuras observadas en las radiografías de densidad se correlacionaron con anomalías en la resistividad eléctrica y un modelo de densidad obtenidos a partir de datos de gravedad [20].

Esta metodología se utilizó para estudiar el domo del volcán inactivo Puy del Macizo Central (Francia), cuyos estudios permitieron la cartografía de distribuciones de densidad los cuales revelaron las variaciones espaciales y también temporales en estructuras geológicas. Se usaron detectores de trazas de alta resolución [23].

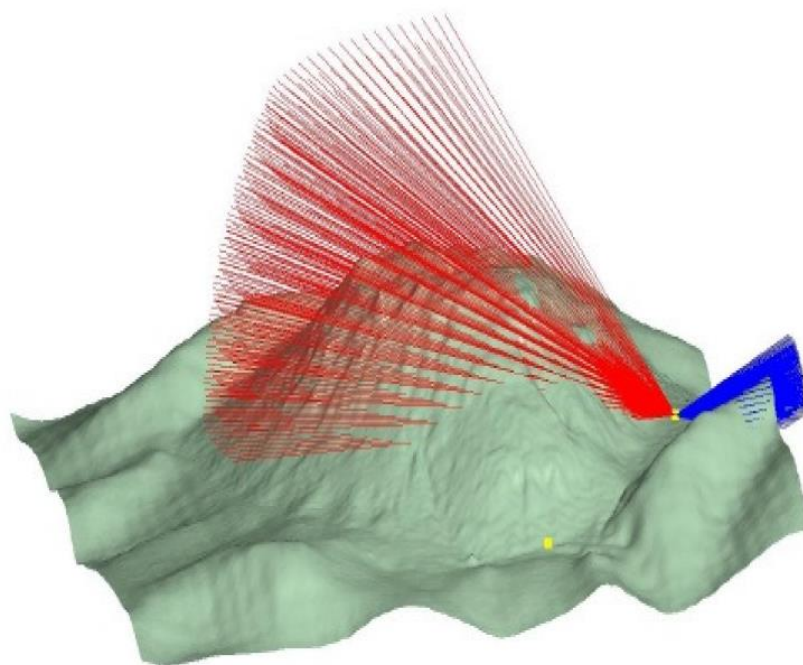


Figura 9 Distribución de rayos cósmicos para el Volcán Soufriere [5].

2. Metodología

Durante el desarrollo de la propuesta “**Caracterización Preliminar del Flujo de Muones en los alrededores del Volcán Galeras**”, el trabajo se han enfocado las siguientes etapas:

1. Compilación de información y estudio del método de Tomografía de muones aplicados hasta el momento a diferentes volcanes del mundo, especialmente en materia de detectores y otras aplicaciones (Volcán Asama, Piramide Maya, Monte Vesuvio, Monte Ssoma, montaña Pelée, volcán Soufrière, volcán Sufriére Hills etc.).
2. Estudio de sistemas de detección (tipos de detectores) y su aplicación para encontrar el método más óptimo para la implementación del mejor sistema de detección. Métodos de calibración para sistemas de detección que usan placas de centelleo.
3. Implementación de simulaciones numéricas (en Geant4 y Corsika) para la realización de un estudio previo basado en simulación.

3. Productos resultados de actividades de Investigación

Las anteriores actividades arrojaron los siguientes resultados:

3.1 Compilación de información

Para el desarrollo de una propuesta de investigación justificada, de características investigativas serias, que tenga un gran impacto social desde la Geofísica, su respectiva aplicación y la oportunidad de abordar un problema social desde un punto de vista multidisciplinario incluyendo disciplinas como la Física, Geología, Vulcanología, Electrónica, Mecánica e Instrumentación es necesaria la documentación adecuada bien fundamentada desde el punto de vista científico.

Por lo anterior se hace necesario recurrir a diferentes fuentes de información presentadas en:

1. Artículos publicados donde se aplica este método a diferentes volcanes del mundo y otras aplicaciones (tomografía de la Pirámide de Guiza, Pirámide Maya y estudios de residuos nucleares, sistemas de detección de partículas, detectores de muones y análisis y procesamiento de datos).
2. Textos de carácter divulgativo donde encontramos material relacionado con las temáticas a abordar (Modelos de rayos cósmicos, interacción radiación materia, interacción de muones con la materia, modelos de perfiles atmosféricos, tipos de volcanes, estructura del volcán Galeras, detectores, tipos de detectores, instrumentación para la detección y material de simulación etc.).
3. Interacción con Investigadores de experiencia quienes vienen desarrollando estos dispositivos y otras disciplinas necesarias que están relacionadas con el tema que estamos tratando, tales como:
 1. El grupo de investigación en detectores y director del proyecto Escaramujo, de la universidad de Buenos Aires, el Doctor Federico Hernán Izraelevich. Experto en detección de Muones (<http://es.escaramujoproject.org/>).
 2. Física de Rayos cósmicos (Dr. Alex Tapia, Instituto de Tecnologías en Detección y Astro partículas (CNEA, CONICET, UNSAM de Buenos Aires, Argentina (<http://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/9>)).
 3. Física de partículas experimentales (Dr. David Matinez, Illinois Institute of technology de Chicago-IL (<http://www.capp.iit.edu/~capp/hep/iithep.shtml>)).
 4. Grupo de física de partículas de la universidad de los Andes (Carlos Ávila Bernal), <https://fisica.uniandes.edu.co/investigacion/altas-energias>.
 5. El grupo METANOIA de Ingeniería Electrónica de la Corporación Autónoma de Nariño, con los ingenieros investigadores Oscar Rodriguez, Rafael Rellena Riascos, Jhon Estrada y Sandra Cordoba. Expertos en Instrumentación y Telemetría.
4. Material relacionado con software (artículos, textos, presentaciones y paquetes) necesario para la realizar las simulaciones que serán parte fundamental en la toma de decisiones en la implementación del sistema.
 1. En relación con los paquetes a usar en la simulación se han considerado paquetes como:

1. **Corsika: Cosmic Ray Simulations for Cascade (CORSIKA):** Es un paquete computacional que trabaja mediante el método Monte Carlo, el cual estudia la evolución de los EAS (Lluvias Atmosféricas extendidas) en la atmósfera iniciados por fotones, protones, núcleos y algunas otras partículas. Originalmente este paquete estaba enfocado en la simulación del experimento KAS-CADE en Karlsruhe. CORSIKA fue diseñado para simular EAS, con el archivo all - input que se ocupa para generar las simulaciones, algunas de las líneas del código son parámetros y otras son rutinas de algunas aproximaciones que se han obtenido mediante la observación. Este paquete de simulación de rayos cósmicos tiene en cuenta los diferentes modelos físicos de producción de rayos cósmicos y modelos atmosféricos que pueden aparecer en algunas partes del planeta con diferentes condiciones climáticas y se puede implementar un perfil atmosférico de la ciudad de Pasto para la realización de las simulaciones, figura 10.

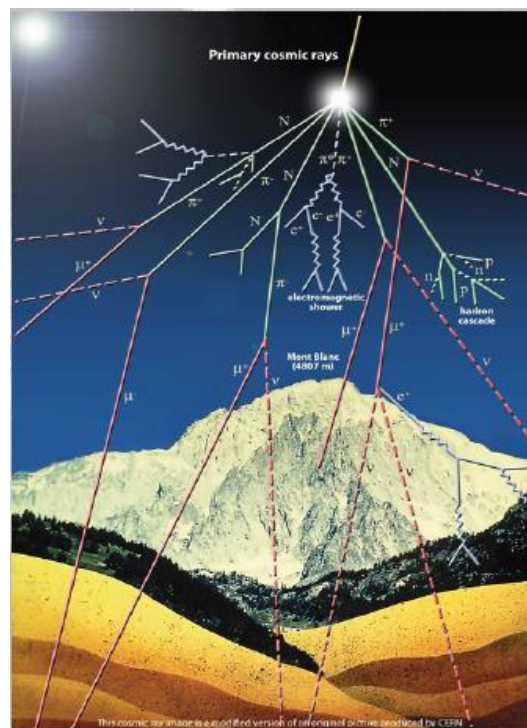


Figura 10: Lluvias de rayos Cósmicos

2. **Geometry and Tracking (Geant4):** Es una herramienta computacional que sirve para simular la interacción entre partículas fundamentales y la materia. El rango de energía con el que se puede simular con esta paquetería es de unos 250 eV a algunos cuantos TeV. Esta paquetería contiene áreas como física nuclear, física de partículas, diseño de aceleradores, ingeniería espacial y física médica. Todos los procesos que involucran colisiones o transporte de partículas tienen naturaleza estocástica (azar). No se puede asegurar respecto al tipo de interacciones que se van a producir en cada momento, solo se puede asignar una probabilidad a cada uno de los posibles sucesos, Geant4 trabaja mediante el método Monte Carlo. El código de GEANT4 [2][3] es un paquete de software de libre distribución capaz de simular los procesos dominantes que gobiernan las interacciones de las partículas e iones con la materia, su código Monte-Carlo está escrito en C++, utiliza avanzadas técnicas de software e ingeniería y tecnología orientada a objetos capaz de simular una configuración

experimental al completo con todos los detectores y seguir a las partículas en sus trayectorias dentro de ellos. En el interior de GEANT4 hay una abundante cantidad de modelos físicos para manejar las interacciones de las partículas con la materia para un amplio rango de energías. Datos y experiencias han sido recogidos desde muchos lugares de todo el mundo y en este sentido, GEANT4 actúa como un repositorio que incorpora una gran cantidad de información acerca de todo lo que se conoce en cuanto a interacciones entre partículas. Todos los aspectos de los procesos de simulación han sido incluidos en las herramientas, tales como:

1. Geometría del sistema Detector.
2. Materiales.
3. Partículas elementales de interés.
1. Generación de eventos primarios.
2. Seguimiento de la trayectoria de partículas a través de los materiales y de los campos electromagnéticos.
3. Procesos físicos que gobiernan las interacciones entre partículas.
4. Respuesta de los componentes sensibles del detector.
5. Generación de datos de los eventos.
6. Almacenamiento de eventos y trazas.
7. Visualización del detector y de la trayectoria de las partículas.
8. Captura y análisis de datos de simulación en diferentes niveles de detalle y refinamiento.
9. Interfaz con el usuario.
10. Rutinas de construcción.

La organización de los archivos de los códigos en Geant4 sigue básicamente la estructura de las clases que se muestra en la figura 11. El manual del usuario [24] también se ordena según los tipos de clase.



Figura 11: Estructura del Geant4.

- 3 **Paquetes que permitan el análisis y procesamiento de datos como el Root [26]:** El programa ROOT es un framework para el desarrollo de aplicaciones de análisis de datos científicos a gran escala desarrollado por el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear). Proporciona

todas las funcionalidades necesarias para hacer frente a grandes procesamientos de datos, análisis estadístico, visualización, almacenamiento, Investigación Nuclear, entre otros. ROOT se desarrolla desde el año 1994, por un equipo dirigido por Rene Brun y Fons Rademakers. Actualmente el programa supera las 1.500.000 de líneas de código e incluye características notables: el usuario puede definir clases interactivamente, el código interpretado puede invocar código compilado, y este nuevamente interpretado; además se espera que pronto pueda procesar entradas de más de 10 terabytes. Dirigido originalmente al análisis de datos en la física de partículas, si bien tiene muchas características específicas para este trabajo, puede ser igualmente útil para el análisis de datos en otros campos (Geofísica), un archivo tipo root tiene una estructura como se muestra en la figura 12.

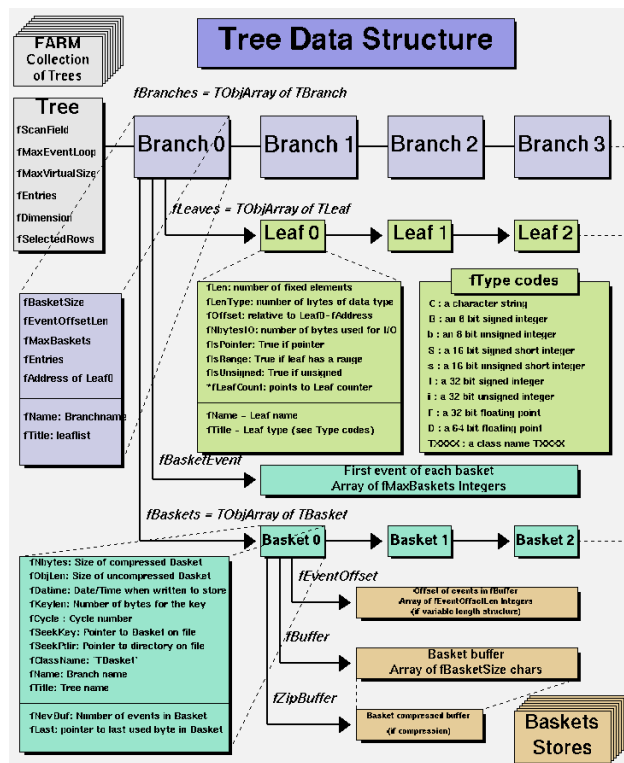


Figura 12: Estructura de un archivo tipo root [26].

3.2 Sistema de detección

En relación con el sistema de detección, por estudios previos se ha visto que existen dos tipos principales de detección de muones, como las siguientes:

1. **Cámaras RPC (Cámara de placas resistivas) [5]:** Debido a que los muones son partículas mínimo ionizantes, y son 200 veces más pesado que un electrón, su pérdida de energía por bremsstrahlung es muy pequeña. Las cámaras de placas resistivas (RPC's), figura 13, son detectores gaseosos de placas paralelas, que combinan una buena resolución espacial ($30\mu\text{m}$) y temporal comparable con los detectores de centelleo. Estas se han desarrollado para responder rápidamente al paso de una partícula, dar información de espacio-tiempo como es requerido por el muon. Una RPC consiste en dos placas paralelas, hechas de una resina fenolica (bakelita) la cual es altamente resistiva, separadas por un gap de gas de unos pocos milímetros. El gap se llena con una mezcla de gas, el 95% de Tetra-Fluoro-Etano ($\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$), el 5% de Iso-Butano ($\text{I-C}_4\text{H}_{10}$).

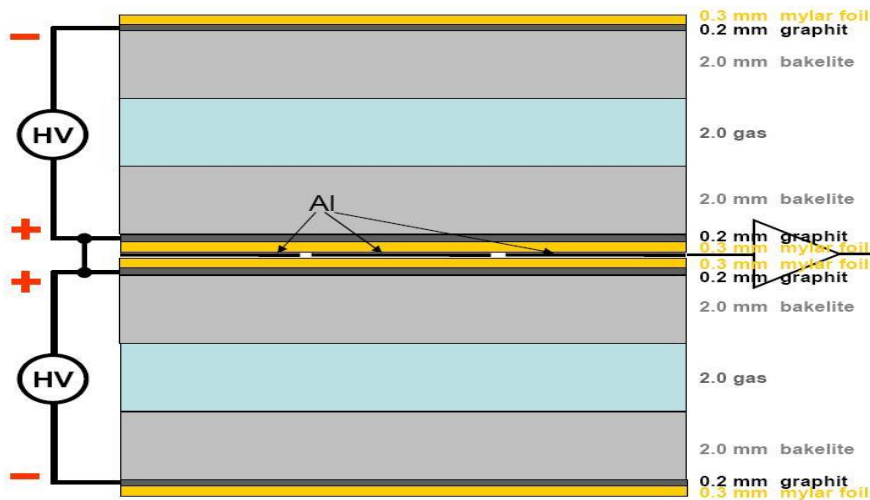


Figura 13: Cámara RPC [5]

2. **Detectores de Centelleo [26]:** Cuando son expuestos a radiación ionizante, emiten un centelleo. Este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de átomos y moléculas, las cuales al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible o en los alrededores. La mayoría de los materiales transparentes producen una pequeña cantidad de luz de centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante. Sin embargo, en algunos pocos la conversión de energía de excitación a luz es eficiente: a éstos los llamamos materiales centelladores. En ellos, podemos distinguir dos procesos de emisión de luz: fluorescencia y fosforescencia. Existen dos tipos de materiales centelladores materiales orgánicos e inorgánicos, ejemplo de un sistema de centelleo se observa en la figura 14. Para fijar ideas, podemos resumir el funcionamiento de un detector tipo centelleo sucintamente en los siguientes eventos:
 1. La radiación ionizante interactúa con el material centellador, transfiriendo parte de su energía (o toda) como ionización y excitación.

2. Parte de la energía absorbida es liberada en forma de luz visible, a través de los mecanismos de centelleo.
3. Mediante reflectores, guías de luz y/o fibras ópticas, la luz emitida se la encauza hacia el fotodetector.
4. El fotocátodo del fotomultiplicador absorbe los fotones y emite fotoelectrones.
5. El arreglo multiplicador de electrones magnifica los electrones incidentes en el orden de 10^6 .
6. La corriente eléctrica de salida del fotomultiplicador es procesada electrónicamente, primero en una etapa analógica, y luego en otra digital.

Los materiales centelladores se los puede dividir en dos categorías: materiales orgánicos e inorgánicos. La física del mecanismo de centelleo, la respuesta a la radiación ionizante y las aplicaciones varían en cada caso. Para nuestro caso el detector centellador es del tipo organico llamado EJ-200.

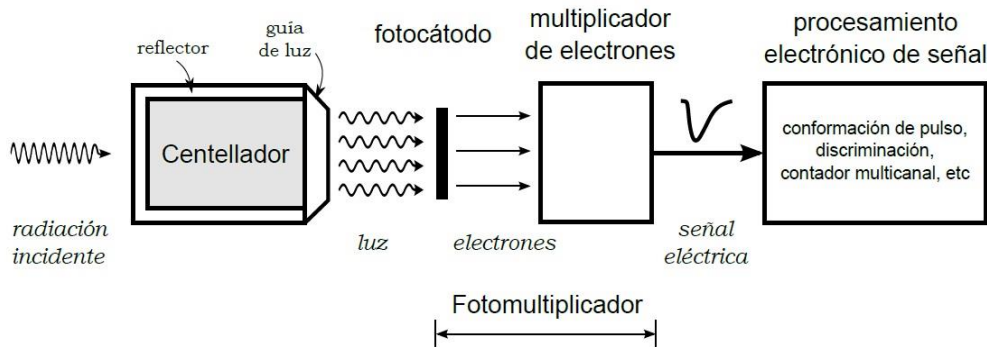


Figura 14: Sistema de centelleo acoplado a un tubo multiplicador [26].

3. **Detector prototipo opto-electrónico:** En nuestra propuesta disponemos de un dispositivo (detector prototipo opto-electrónico tipo centelleo). El dispositivo consta de las siguientes partes:
 1. **Material Centellador EJ-200 [27]:** Este material centellador combina dos propiedades importantes una gran longitud de atenuación óptica y la rápida respuesta en tiempo. Esta última propiedad es utilizada por el tiempo de emisión de luz para centelladores de un metro de longitud de largo, las características se indican en la figura 15.

Physical and Scintillation Constants:

Light Output, % Anthracene	64
Scintillation Efficiency, photons/1 MeV e ⁻	10,000
Wavelength of Max. Emission, nm	425
Rise Time, ns	0.9
Decay Time, ns	2.1
Pulse Width, FWHM, ns	~2.5
No. of H Atoms per cm ³ , x 10 ²²	5.17
No. of C Atoms per cm ³ , x 10 ²²	4.69
No. of Electrons per cm ³ , x 10 ²³	3.33
Density, g/cc:	1.023

Tabla 1: Características del material centellador [27]

El espectro de emisión de nuestro detector de centelleo, se indica en la figura 15.

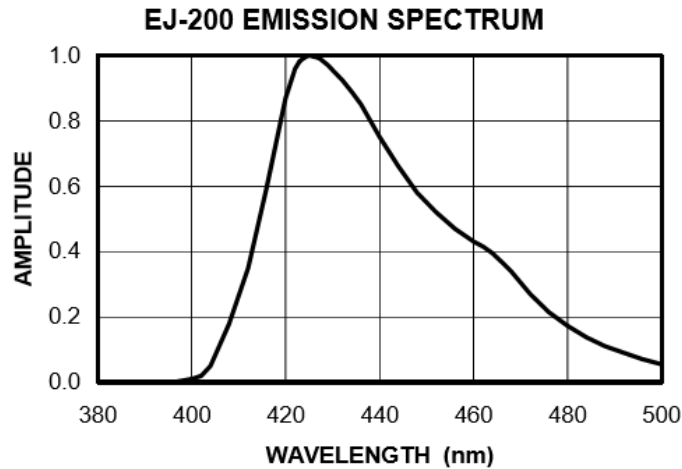


Figura 15: Espectro de emisión de las placas de centelleo EJ-200 [27].

2. **Fotomultiplicadores [26]:** Para que un centellador sea útil como detector de partículas es necesario acoplarle un foto detector que traduzca la luz liberada en una señal eléctrica. Los tubos fotodetectores (PMT) son los dispositivos adecuados para esto, aunque, sin embargo, los avances tecnológicos de las últimas décadas en tecnología de semiconductores ha permitido el desarrollo de los fotodiodos de avalancha operados en modo Geiger (APD, Avalanche Photo Diode). Un PMT cuenta con un fotocátodo, el cual libera electrones cuando sobre él inciden fotones visibles, llamados fotoelectrones; y con un arreglo de electrodos conectados a alta tensión creciente llamados dínodos, encargados de la multiplicación de los fotoelectrones. En la figura 7 se puede ver un esquema de un centellador acoplado a un tubo fotomultiplicador (PMT).

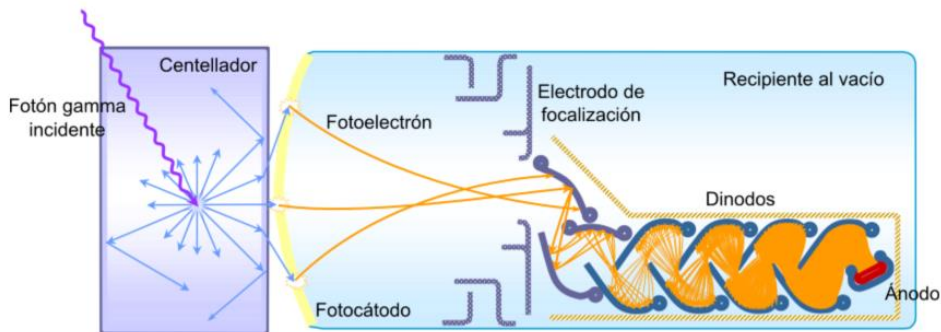


Figura 16: Tuvo fotomultiplicador acoplado a un centellador [26]

El fotocátodo es una fina capa de material fotosensible, de unos pocos nm, cuya función es liberar la mayor cantidad de electrones como sea posible, dada una cantidad de fotones incidentes. Cuando un fotón incide golpea a un electrón y transfiere su energía al electrón del material, alrededor de 3 eV para un centellador con emisión en la región azul/violeta. La trayectoria del electrón tiene una distribución angular muy extendida. El efecto fotoeléctrico, dominante a estas energías, eyecta electrones con poca predilección por la dirección inicial del fotón, dado que el núcleo del átomo de donde se arranca el electrón toma parte del momento del fotón. A temperatura ambiente, la energía media de los electrones es 0,025 eV, con lo cual, el electrón perderá energía por colisiones en su trayecto hacia la superficie del material.

Si, al llegar allí, aún posee suficiente energía como para superar la barrera energética inherente a la interfase material/vacío, el electrón podrá escapar del material. Esta barrera es frecuentemente llamada función trabajo, que para los metales supera los 4 eV, puede estar en el orden de 1,5 eV para semiconductores dopados ad hoc. Así, puede verse que tan solo una porción de los electrones liberados por los fotones incidentes serán capaces de escapar del fotocátodo. En la figura 17 se pueden ver los espectros de emisión de algunos centelladores inorgánicos y la respuesta espectral de dos tubos fotomultiplicadores.

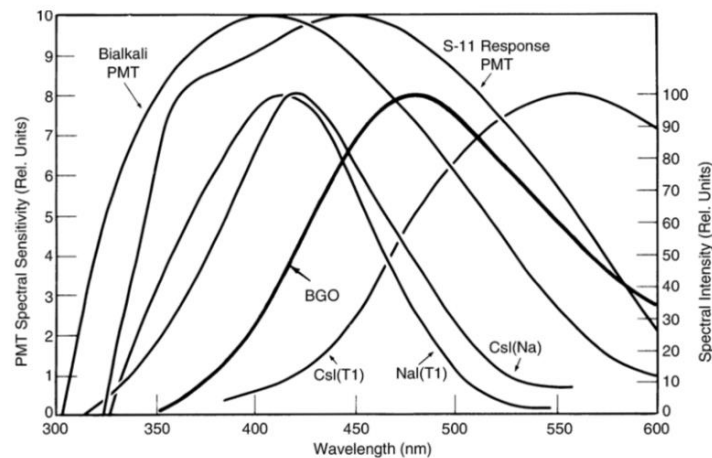


Figura 17: Espectros de emisión de algunos centelladores inorgánicos y respuesta espectral de dos tubos fotomultiplicadores. Extraído de Radiation Detection and Measurement, 4ta edición, de Glenn Knoll, pág 237.

En la figura 18 se puede ver el espectro de emisión de un centellador orgánico comercial. Como idea general, es deseable que los máximos del espectro de emisión del centellador y de la respuesta espectral del fotocátodo coincidan, para lo cual es frecuente el uso de wavelength shifters.

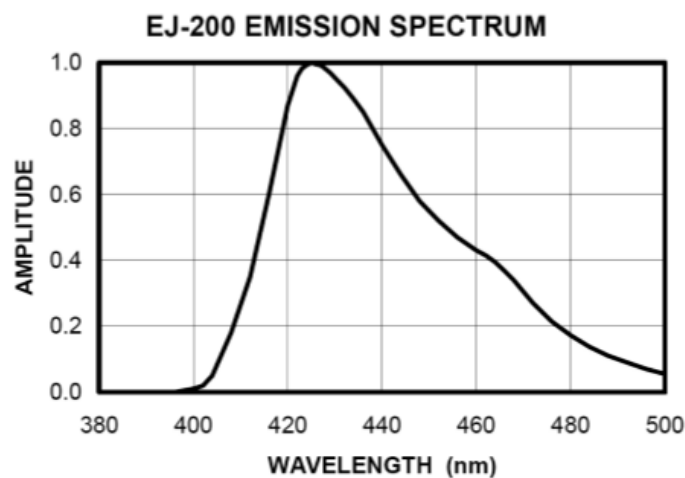


Figura 18: Espectro de emisión del centellador plástico EJ-200, de Eljen Technology. Extraído de la hoja de datos de su página web, eljentechnology.com

Cuando un fotón incide sobre un dínodo con la energía cinética suficiente, puede arrancar

electrones secundarios del material. De los electrones excitados por el electrón incidente, tan solo una pequeña fracción logrará escapar del dínodo para aportar a la multiplicación, por razones similares a las antes expuestas. El factor de multiplicación de un dínodo, δ , se define como la cantidad de electrones secundarios emitidos por electrón incidente. Los materiales frecuentemente utilizados en los dínodos tienen un factor de multiplicación $\delta \approx 5$, de modo que para obtener ganancias de 10^6 , típica de un PMT comercial, es necesario un arreglo del orden de 10 dínodos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Dínodos	
	1	5	25	125	625	3125	15625	78125	390625	1953125	9765625	Electrones

Figura 19: Ejemplo de multiplicación de electrones

Para que el electrón liberado en el fotocátodo sea atraído por el primer dínodo, éste debe estar a mayor potencial que el fotocátodo. Del mismo modo, el segundo dínodo debe estar a mayor potencial que el primer dínodo, y así, sucesivamente, en donde el ánodo debe poseer el mayor potencial de todos los electrodos. Las formas de lograr esto están representadas en la figura 20. En el circuito (a), el fotocátodo está conectado a tierra, mientras que el ánodo, a alta tensión positiva. En el circuito (b), el fotocátodo está conectado a alta tensión negativa, y el ánodo, a tierra.

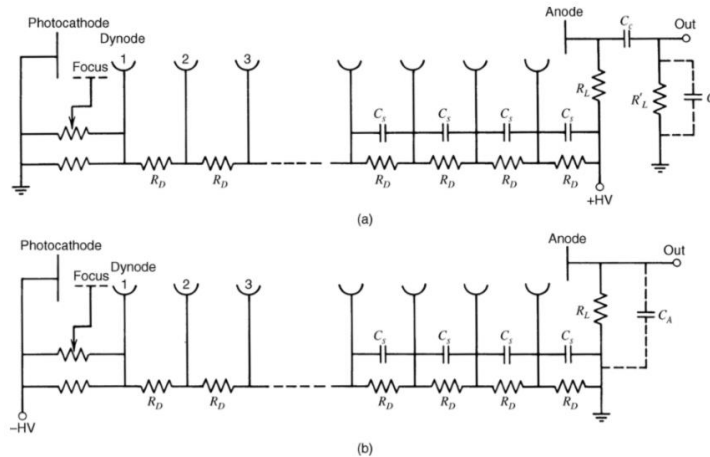


Figura 20: Circuitos de polarización de un PMT. Extraído de Radiation Detection and Measurement, 4ta edición, de Glenn Knoll, pág 295.

En principio, ambas configuraciones resultan equivalentes; sin embargo, la opción (a) es la más extendida. En general, es preferible colocar el blindaje eléctrico del sistema centellador-PMT a tierra, por razones de seguridad eléctrica. En la configuración (a), el blindaje, el fotocátodo y la tierra del detector, es decir, el retorno de la salida del PMT, están todos cortocircuitados. En la opción (b), se debe tener especial cuidado de que no hayan pérdidas de corriente entre el blindaje y el fotocátodo, lo que requiere un montaje adecuado. Sin embargo, hay dos aplicaciones en la cual la opción (b) es preferida. La primera de ellas se da cuando se desean mediciones precisas de tiempos. En este circuito se prescinde del capacitor C_c , de modo que se puede acoplar el ánodo directamente a la línea de transmisión de 50Ω . La segunda, si desea medir niveles de corriente continua a través del ánodo, en lugar de pulsos, por ejemplo, para detectar muy altas tasas de dosis, en las que no se pueden resolver los pulsos en forma individual. En ese caso, en lugar de conectar un discriminador a la salida del PMT, se debe conectar un electrómetro, dispositivo adecuado para medir bajas corrientes, por debajo del μA . Contamos con

un sistema fotomultiplicador (Low Noise, Fast, Blue-Sensitive Silicon Photomultipliers).

3. **Low Noise, Fast, Blue-Sensitive Silicon Photomultipliers [27]:** Los sensores SensL's C-Series low-light característicos de la industria de baja carga combinados con una alta PDE que recibe una señal más rápida en la parte azul (con alto volumen de recepción en el azul), procesador de silicio P-o-N. Para aplicaciones ultrarrápidas en tiempo, este dispositivo tiene una salida rápida. Estas señales rápidas pueden tener tiempos en pulsos eléctricos del orden de los 300ps hasta 600ps. La serie de dispositivos (C-Series) está disponible en sensores de tamaños diferentes (1mm, 3mm and 6mm) y paquetes que varían de formatos. El fotomultiplicador de silicio C-Series (SiPM) presenta un rango de alta ganancia, sensible a un fotón, sensible en señales visibles de UV. Ellos tienen características similares a los PMT convencionales, con ventajas prácticas de estado sólido, como: bajo voltaje de operación, excelente estabilidad en la temperatura, robusto, compacto, salida uniforme y bajo costo. Para más información dirigirse al sitio web, www.sensl.com.

Sensor Size	Microcell Size	Parameter ¹	Overvoltage	Min.	Typ.	Max.	Units
1mm	10μ, 20μ, 35μ, 50μ	Breakdown Voltage (Vbr) ³		24.2		24.7	V
3mm	20μ, 35μ, 50μ						
6mm	35μ						
1mm	10μ, 20μ, 35μ, 50μ	Recommended overvoltage Range (Voltage above Vbr) ²		1.0		5.0	V
3mm	20μ, 35μ, 50μ						
6mm	35μ						
1mm	10μ, 20μ, 35μ, 50μ	Spectral Range ⁴		300		800	nm
3mm	20μ, 35μ, 50μ						
6mm	35μ						
1mm	10μ, 20μ, 35μ, 50μ	Peak Wavelength (λ _p)			420		nm
3mm	20μ, 35μ, 50μ						
6mm	35μ						

¹ All measurements made at 2.5V overvoltage and 21°C unless otherwise stated.

² Please consult the maximum current levels on page 6 when selecting the overvoltage to apply.

³ The breakdown voltage (Vbr) is defined as the value of the voltage intercept of a parabolic line fit to the current vs. voltage characteristic curve.

⁴ SMT package spectral range is limited from 320nm to 800nm. X13 package extends UV response to 300nm.

Figura 21: Foto detector de estado sólido del que disponemos [27]

La respuesta de eficiencia está dada por:

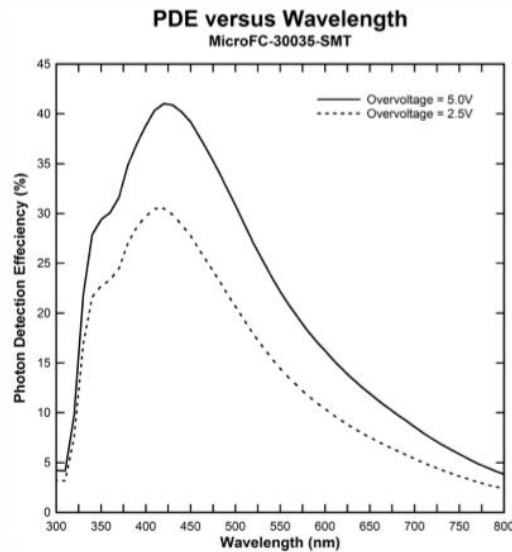


Figura 22: Respuesta del fotodetector (SIMP) [27]



Figura 23: Fotografía del foto detector

FOTO-DIODO Y ELECTRODO DE POLARIZACIÓN DE PLACA, PARA RECEPCIÓN DE LA SEÑAL ELECTRICA QUE DESCRIBE EL MUON AL INCIDIR EN LA PLACA

- Componentes Electrónicos [27]:** La tarjeta DAQ también puede determinar si las señales en canales separados coinciden en el tiempo. Por ejemplo, si el criterio de activación (trigger) se establece en 2 veces (canales), entonces, tan pronto como cualquier canal pasa por encima del umbral, se abre una ventana de tiempo (El ancho de la ventana de tiempo es ajustable.). Si cualquier otro canal pasa por encima del umbral durante esta ventana de tiempo, todos los datos de estos eventos se bloquean y se emiten para el intervalo de tiempo de superposición cuando ambos están activos. Observe que los datos de impulsos se informan para un intervalo de tiempo que no son de longitud fija, sino que sólo cubren el período de superposición cuando dos o más canales están activos. Tiempos de los bordes de ascenso y descenso son reportados para un canal activo (No sólo para los dos canales que lanzaron el disparador), Con entradas de datos vacías para canales que permanecieron inactivos durante la ventana de disparo. Para un trigger de evento simple, la tarjeta DAQ puede necesitar la salida de varias líneas de datos. La primera línea tiene un "indicador de evento" para la identificación. Las siguientes líneas sin este indicador son simplemente datos adicionales para el mismo evento. Para contar las coincidencias entre

pulsos procedentes de los dos detectores de centelleo se dispone de varios módulos electrónicos que siguen el estándar NIM (Nuclear Instrumentation Module), esto es, unas normas en cuanto a las características mecánicas (dimensiones) y eléctricas de los componentes y las señales. Los módulos de los que se dispone para la práctica son los siguientes:

Descripción Lógica: A continuación se describe brevemente el proceso seguido por los pulsos procedentes de los detectores hasta el recuento de las coincidencias.

En primer lugar debemos separar las señales accidentales de los fotomultiplicadores (producidas por ruido térmico en su interior o interacción de partículas de muy baja energía en los centelladores) de las producidas por partículas que depositan mayor cantidad de energía como es el caso de los muones cósmicos. Para ello se le exige a la señal proveniente de los fotomultiplicadores el que su amplitud sobrepase un cierto umbral (que fijamos en 40 mV en este experimento). El módulo que ejecuta esta tarea es el discriminador, cuya entrada es una señal analógica de amplitud y duración dependiente del proceso que haya tenido lugar en el detector. A la salida del discriminador tenemos una señal lógica de forma cuadrada con altura y duración estándar (20 ns) en el caso en que la señal de entrada haya sobrepasado este umbral.

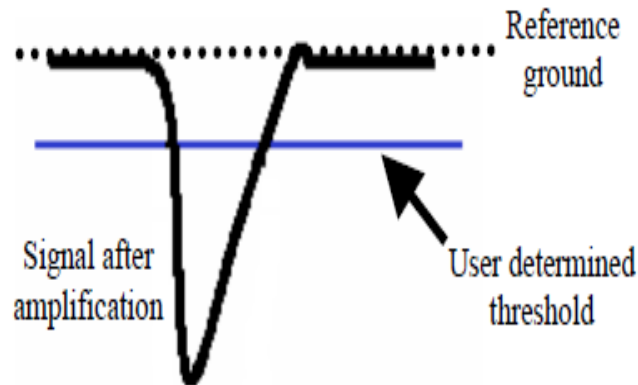


Figura 24: Pulso generado por un detector para ser discriminado [27]

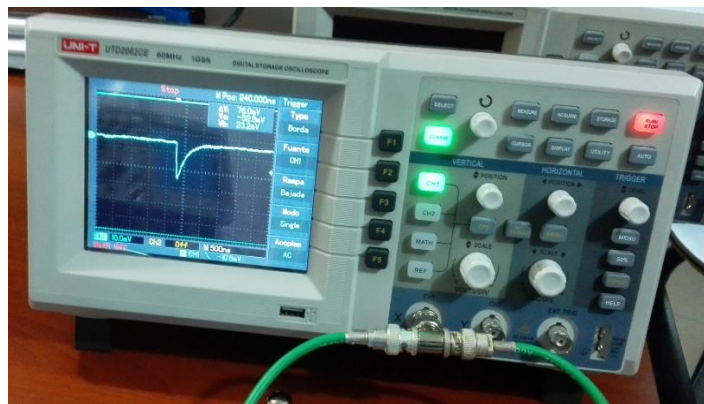


Figura 25: Señal registrada en el osciloscopio que emite el detector.

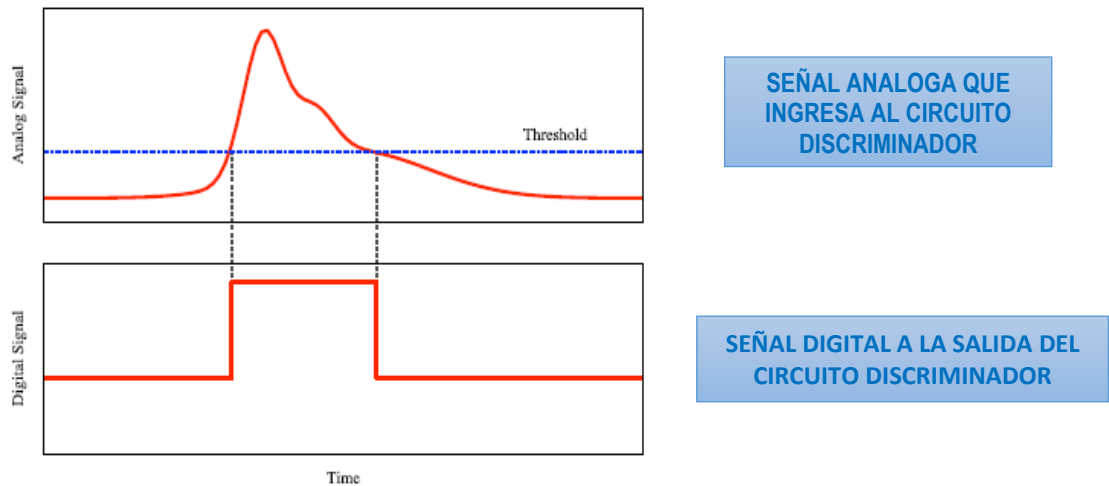


Figura 26: Proceso de discriminación de una señal [27].

Cada discriminador dispone de dos salidas. Una de ellas se empleará para alimentar un contador de manera que sepamos el número de pulsos procedentes de cada fotomultiplicador y la otra se dirigirá al módulo de coincidencias.

Las coincidencias entre ambos detectores se evalúan mediante una unidad NIM de coincidencias. Este módulo consta de varias entradas y una salida. Tendremos una señal de salida cuando los pulsos de entrada se solapen al menos parcialmente en el tiempo. Es obvio que la longitud de los cables que conectan los dos discriminadores y la unidad de coincidencias debe ser la misma. Llevando la salida a otro contador podemos acumular el número de coincidencias en un espacio de tiempo. El número de coincidencias registradas en un intervalo de tiempo fijo obedece a la **estadística de Poisson**, lo que deberá tenerse en cuenta a la hora de realizar los cálculos con las medidas obtenidas (concretamente a la hora de calcular la incertidumbre del estimador del número medio de coincidencias, n (número de coincidencias medido), que viene dada por tratarse de un fenómeno aleatorio que obedece a la estadística de Poisson por n).

Además de este montaje básico, existe uno adicional que llamaremos "temporizador" que nos ayudará a controlar el tiempo de medida, compuesto por un generador de pulsos, un contador con posibilidad de preselección de tiempo y un fanout (que es un módulo que reproduce señales eléctricas). Cuando el contador alimentado por el generador de pulsos alcanza la cantidad preseleccionada produce una señal de desbordamiento (overflow) que una vez triplicada en el módulo fanout alimenta las entradas de validación de los otros contadores, parándolos.

5. **La tarjeta QuarkNet DAQ** [27]: Esta diseñada con los siguientes elementos, tiene 4 canales para PMT con 0-20 dB de pre-amplificación. Discriminadores con voltaje umbral ajustable, Una tabla de selección de 1- a - 4 para seleccionar el mejor trigger lógico, Elementos de adelanto y retraso relativo a los tiempos de arribo medidos con una preselección de ~ 1 nanosegundo, Area estimada del pulso via tiempo sobre el threshold. Una tarjeta de scalers para coincidencias simples, dobles y triples, Coincidences

stamped with GPS time to ~20 ns., Simple digital interface to any PC via serial port. , Low cost (under US\$500 per board for parts)., Reliable and robust, Sufficiently user-friendly for use by high school students.

Tarjeta DAQ (QuarkNet Version 2.5 Data Acquisition board)

Las componentes de la tarjeta son:

1. Entrada de GPS
2. Salida de GPS (fanout) a otra tarjeta DAQ
3. Botón de reseteo de la tarjeta.
4. Display contador de coincidencias
5. Entradas para 4 contadores (0-3)
6. CPLD (Complex Programmable Logic Device), lógica rápida programable.
7. Conversor de tiempo digital, TMC (Time-to-digital converter).
8. Puerto USB, salida para el PC.
9. 5 voltios de corriente directa de entrada (VDC).
10. 5 voltios de corriente directa de salida (VDC)

Esta tarjeta es la conexión lógica entre los contadores de centelleo y el PC. La tarjeta contiene los discriminadores y la lógica de trigger para los 4 canales de los PMT. La tarjeta incluye 5 scalers, lo que permite el conteo simultáneo para conteos simples de cada canal, más el trigger impuesto por la lógica que puede ser de 2 a 4 coincidencias.

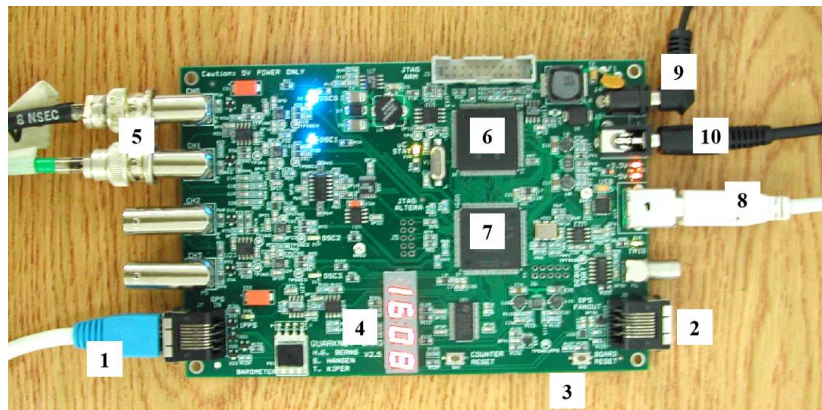


Figura 27: Vista cercana de la tarjeta de adquisición DAQ [27].

Una interface USB puede ser conectada a un PC (puede tener Windows, Lunix o Mac). La cadena de datos (Datastream) consisten de una línea simple de texto en ASCII que pueden ser leídos por alguna terminal. Además un GPS provee el tiempo exacto de cada evento sincronizado al tiempo Universal (UTC), este permite comparar datos de diferentes eventos tomados a distancias distantes. En modo de cadena de datos (datastream) las líneas de texto de la tarjeta DAQ reportan datos de eventos, con las siguientes características:

Tiempo de trigger en UTC (Con 10 ns de resolución y una exactitud absoluta de 100 ns)

Tiempo de ascenso y tiempo de caída para cada pulso de señal registrado dentro de la ventana de t

tiempo de coincidencia (con 1.25 ns de precisión).

Datos para GPS y reloj interno.

Los comandos de la tarjeta permiten leer la temperatura, presión barométrica y otros sensores.

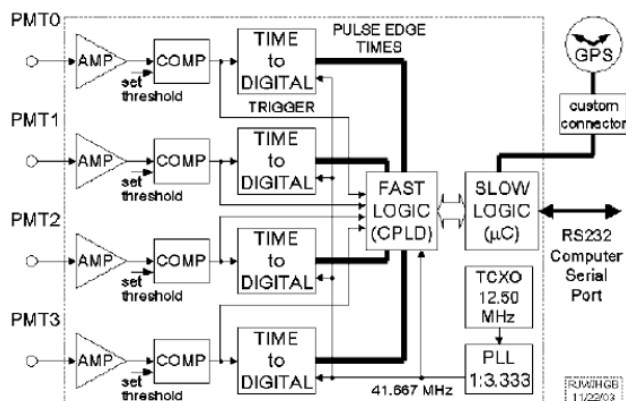


Figura 28: Diagrama de bloque de la tarjeta, QuarkNet DAQ v2.5.[27]

6. **Discriminadores [27]:** Las señales de los PMT son primero pre-amplificadas por un factor determinado por un conjunto de resistencias que cambian (el factor de amplificación usado en este caso para nuestra tarjeta es de 10). Los discriminadores se implementan usando un voltaje comparador con el voltaje umbral (threshold), este voltaje se puede cambiar en la terminal con el comando TL. Por defecto la tarjeta DAQ asigna un voltaje umbral de 300mV. Es importante recordar que los voltajes comparadores miran las salidas amplificadas (las señales de los PMT son multiplicadas por un factor antes de ser comparadas). Por ejemplo si usted usa 30mV de voltaje umbral con los discriminadores NIM y tiene un factor de amplificación de 10, su nivel de voltaje umbral en la tarjeta QuarkNet DAQ será de 300mV.
7. **Dispositivo Complejo Logico Programable (Complex Programmable Logic Device, CPLD [27]):** El trigger lógico es implementado usando un chip CPLD. El software de revisión para este chip debe ser preparado usando un software especial, pero puede ser descargado vía puerto serial. Esta flexibilidad permite a los ingenieros distribuir actualizaciones que alteran la lógica rápida, si es necesario. Cualquier nivel de lógica de activación desde una a 4 veces se puede establecer mediante comandos de teclado a la tarjeta. Se utiliza la lógica mayoritaria: cualquier combinación de tres canales activos provoca, por ejemplo, un disparo en el nivel de 3 veces.
8. **Convertidor de Tiempo a Digital (TDCs) [27]:** Los impulsos de salida del discriminador se introducen en los TDC que miden el tiempo de llegada de los bordes de impulsos delanteros y posteriores. Los TDC realizan un seguimiento de su estado (alto o bajo) a 1,25 ns, es decir buscan coincidencias. (pre-6000 DAQ: 0,75 ns). Si se satisface el criterio de activación, los datos de TDC se enganchan y se leen, dando los tiempos de los bordes delantero y trasero para cada canal en relación con el tiempo de disparo en unidades de 1,25 ns. Esto le permite calcular los anchos de pulso PMT (tiempo sobre el umbral, o ToT) como una estimación aproximada del área del pulso y, por tanto, de la energía.
9. **Microcontrolador (MCU) [27]:** La MCU es realmente una CPU de propósito especial que proporciona la lógica "lenta" integrada (con una escala de tiempo de microsegundos, no nanosegundos) para interconectar la placa a usted a través de una ventana de terminal o equivalente en su PC. En la actualidad, la MCU puede reprogramarse para redefinir la funcionalidad sólo mediante el uso de software especial y el hardware de grabación.

10. **Sensores Auxiliares [27]:** Hay un sensor de temperatura integrado en el chip del microcontrolador. Este sensor está presente para poder medir la temperatura de la CPU. Esta temperatura y la tensión de alimentación se informan cada vez que se pone en marcha la tarjeta. Mientras que los componentes de la placa están clasificados para temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. La temperatura del tablero no debe normalmente ir por encima de $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un segundo sensor de temperatura se encuentra en la placa de reforzador incorporada en el conector DB9 "extremo lejano" del cable GPS. Este sensor se puede utilizar para registrar la temperatura exterior en las posiciones del contador, y se lee con una orden de teclado. El módulo GPS puede resultar dañado si su temperatura es inferior a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ o superior a $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un sensor de presión barométrica está integrado en la placa también. También se puede calibrar y leer (en unidades de milibares) con un comando de teclado.
11. **Sistema de detección segmentada [1] :** Finalmente en cuanto al sistema de detección se está analizando que sistema es mejor en cuanto a su disposición, para esto se está utilizando como referencia al llamado sistema de detección segmentada, figura 29 que utilizaron en el monte Asama en Japón.

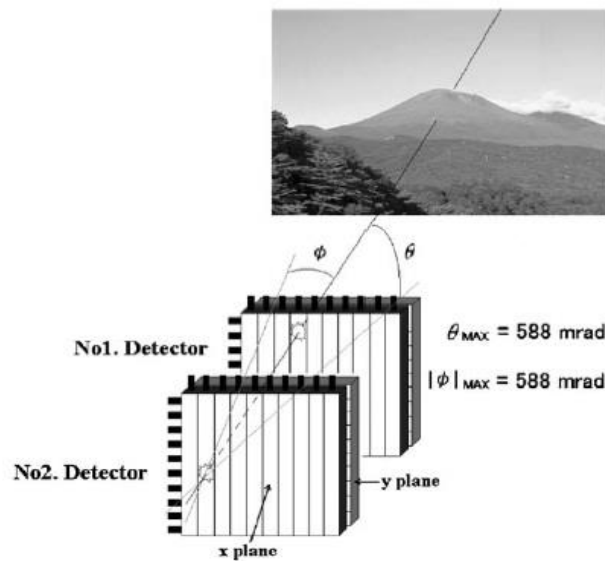


Figura. 29 Sistema de detección segmentada, en el fondo el volcán [1]

3.3. Simulación Numérica (Método de Montecarlo)

El siguiente paso corresponde a la implementación de simulaciones numéricas en relación con el tema a tratar que se han dividido en los siguientes aspectos:

1. **Estudio del Método de Monte Carlo:** El método de Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos con la generación de números pseudo - aleatorios y la automatización de los cálculos, está presente en todos aquellos modelos o experimentos en lo que el comportamiento aleatorio o estocástico desempeña un papel esencial. Es una herramienta que sirve para obtener una

solución de un sistema macroscópico con la simulación de sus interacciones microscópicas. Esta técnica cuantitativa hace uso de la estadística y de equipos de cómputo para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales. La obtención de largas secuencias de números aleatorios tal que la aparición de cada número en la secuencia sea impredecible es de vital importancia en el método Monte Carlo, también se necesita que la secuencia de números supere pruebas estadísticas para detectar desviaciones de la aleatoriedad. Regularmente las secuencias de números aleatorios se obtienen de algún algoritmo y se denominan números pseudo-aleatorios, esto son de carácter determinista.

2. **Implementación de simulación numérica:** mediante el uso del método de Monte Carlo de producción de rayos cósmicos y su respectiva generación de muones teniendo en cuenta los mejores modelos aplicables a la zona del volcán Galeras (dependiendo del perfil atmosférico, energía de la partícula madre etc.). Este trabajo se enfoca desde dos frentes, como se mencionan a continuación:

1. **Estructura de Volcán Galeras en Geant4:** Se implementó la simulación de la estructura del volcán Galeras con el paquete Geant4, siguiendo los siguientes pasos:

1. **Conformación de la estructura Geométrica:** Se hizo uso del paquete SOLIDWORKS [28] que es un programa dedicado al diseño de estructuras geométricas complejas en 2D y 3D en formato CAD, en este software se incluyeron datos de las coordenadas de las curvas de nivel suministradas por el Servicio Geológico Colombiano, para el fin se construyó el sólido del complejo volcánico de interés para finalmente exportarlo a un formato CAD. IMÁGENES.
2. **Transformación del sólido a un formato compatible con Geant4:** Se utiliza el paquete FASTRAD [28], que es un programa dedicado a la creación de estructuras geométricas en 3D y simulaciones, además transforma formatos CAD en GDML, el cual es el input que puede leer GEANT4, en este trabajo se usó FASTRAD para para importar el formato CAD de la geometría del volcán de SOLIDWORKS para finalmente transformarlo a GDML.
3. **Implementación de clases:** Una vez obtenida la geometría en formato GDML se implementan las clases G4GDMLParser y G4GDMLReadStructure para que esta sea incorporada dentro de GEANT4 (figura 30).

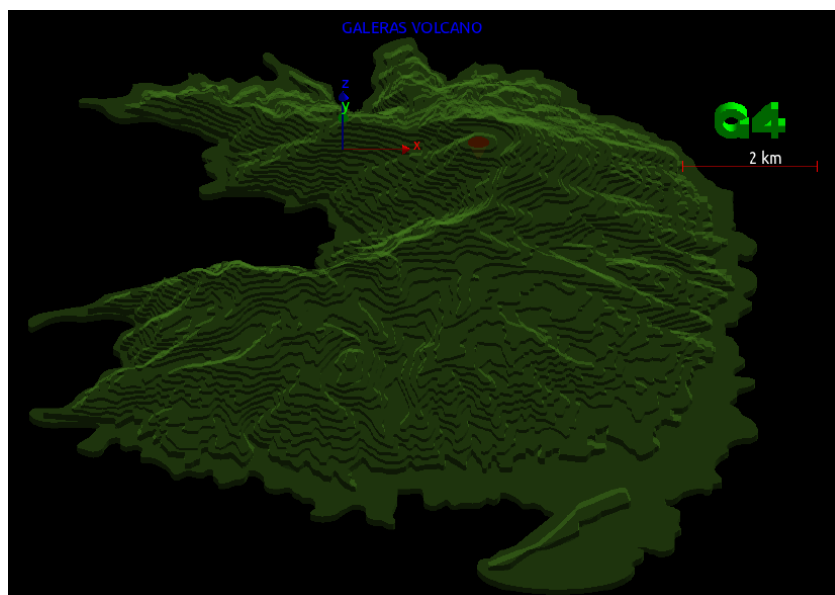


Figura 30: Simulación volcán Galeras en GEANT4. La geometría de color café es el cráter [29].

Características del volcan simulado	
Diametro del crater	320m
Altura (desde la cima)	1100m
Profundidad del crater	320m

Tabla 3: Características geométricas principales del volcán Galeras simulado en GEANT4[29].

4. **Dos tipos de cráter:** Además se implementaron dos tipos diferentes de volcán, uno compuesto por roca estándar en todas sus regiones (incluyendo el cráter) y otro de roca estándar y aire en su cráter, esto con el fin de hacer la comparación de cómo se comportan los muones cuando estos atraviesan las dos clases de volcán. La composición de la roca estándar se muestra en el cuadro 4:

Elemento quimico	Porcentaje en la tierra
O	46.60
Si	27.72
Al	8.13
Fe	5.00
Ca	3.63
Na	2.83
K	2.59
Mg	2.09

Tabla 4: Composición química de la roca estándar empleada en la simulación [29].

5. El siguiente paso consistió simular de la interacción de un muon de energía 1TeV con el volcán Galeras Figura 31.

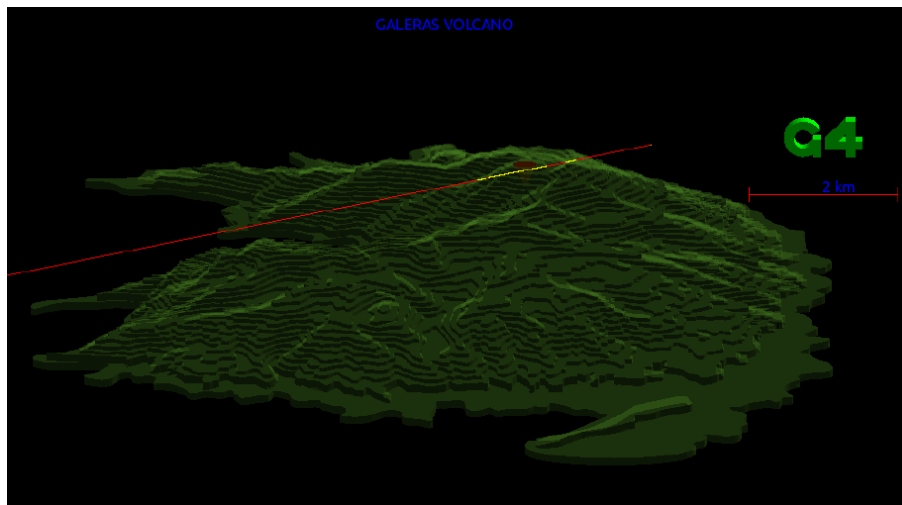


Figura 31: Interacción de un muon (línea roja) de 1TeV con el volcán Galeras. El cráter esta en color café [29].

6. **Interacción muones con cráter tipo roca:** Luego se realiza la simulación de muones con el cráter formado por roca. En la figura 32 Se puede observar los puntos de interacción generados por 20 eventos de muones atravesando la cima del volcán en conjunto con su cráter para la proyección XZ, en este caso ambos están formados por roca estándar. La energía de cada muon equivale a 1TeV y el número de entradas hace referencia a los puntos de step.

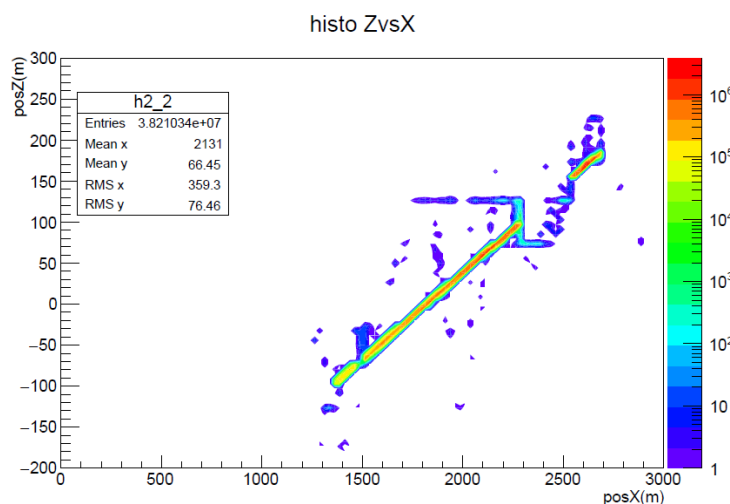


Figura 32: Proyección XZ de las interacciones generadas por muones [29].

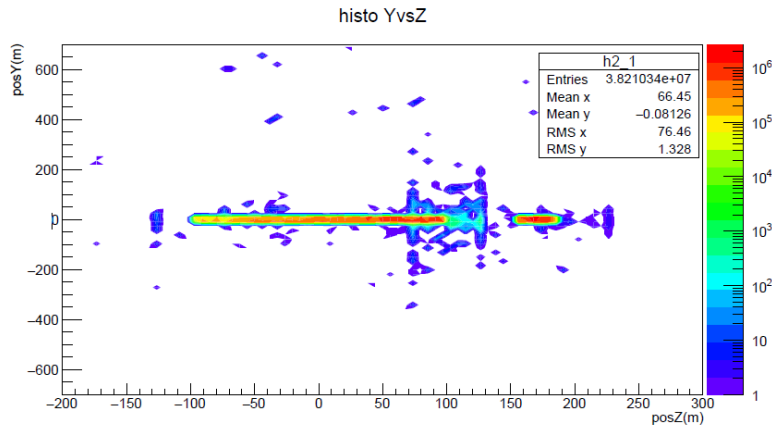


Figura 33: Proyección YZ de las interacciones generadas por muones [29].

7. **Grafica de simulación en tres dimensiones:** En la figura 34 Se puede observar los puntos de interacción generados por 20 eventos de muones atravesando la cima del volcán en conjunto con su cráter en tres dimensiones, en este caso ambos están formados por roca estándar. La energía de cada muon equivale a 1TeV y el número de entradas hace referencia a los puntos de step.

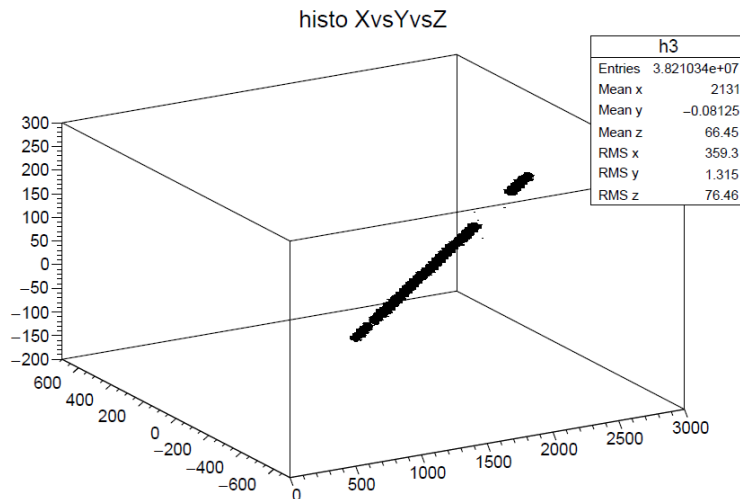


Figura 34: Proyección tridimensional de las interacciones generadas por muones [29].

8. **Procesos resultantes de la interacción de los muones con el cráter tipo roca:** En la figura 35 se puede apreciar todos los procesos físicos generados desde el momento en que los muones atraviesan la cima del volcán con su cráter incluyendo procesos generados por partículas secundarias generadas a lo largo del trayecto del muon. se deduce que el proceso con mayor aporte es la ionización generada por electrones, le sigue el efecto compton, Breemstralung por electrones y creación de pares.

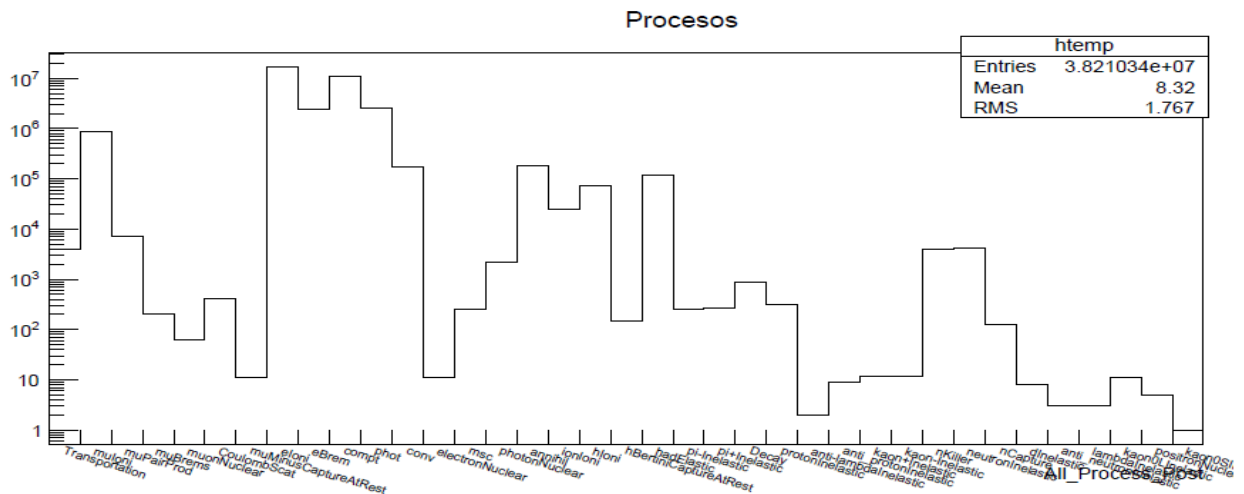


Figura 35: Procesos físicos generados por la interacción de los muones y las partículas secundarias en el volcán donde el cráter está formado por roca [29].

9. **Proyección XZ de las interacciones de los muones con el cráter de aire y roca:** En la figura 36 se puede observar los puntos de interacción generados por 20 eventos de muones atravesando la cima del volcán en conjunto con su cráter para la proyección XZ, en este caso la cima del volcán está formado por roca estándar y el cráter por aire. La energía de cada muon equivale a 1TeV. Podemos ver la notable diferencia cuando el cráter está formado por aire disminuyendo así el número de interacciones al igual que la pérdida de su energía.

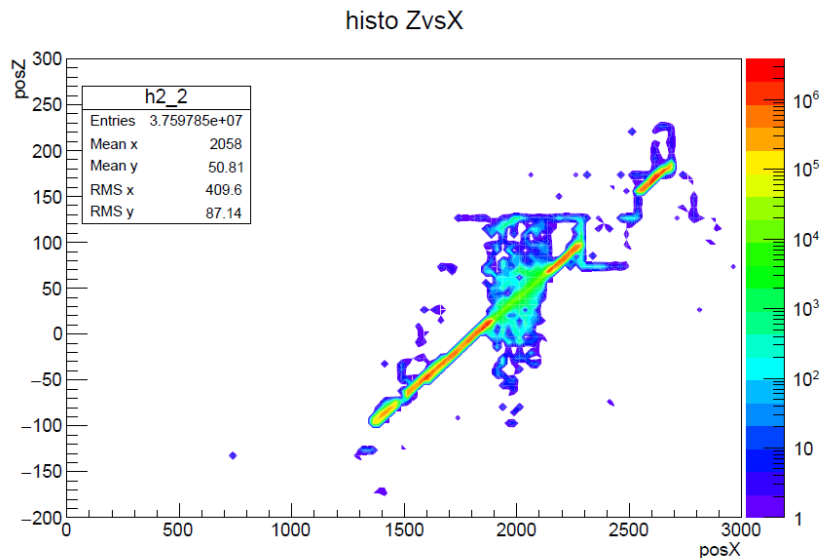


Figura 36: Proyección XZ de las interacciones de los muones con el cráter de aire [29].

10. **Proyección YZ de las interacciones de los muones con el cráter de roca y aire:** En la figura 37 Se puede observar los puntos de interacción generados por 20 eventos de muones atravesando la cima del volcán en conjunto con su cráter para la proyección YZ, en este caso la cima del volcán está formado por roca estándar y el cráter por aire. La energía de cada muon equivale a 1TeV. Podemos ver la notable diferencia cuando el cráter está formado por aire disminuyendo así el número de interacciones al igual que la pérdida de su energía.

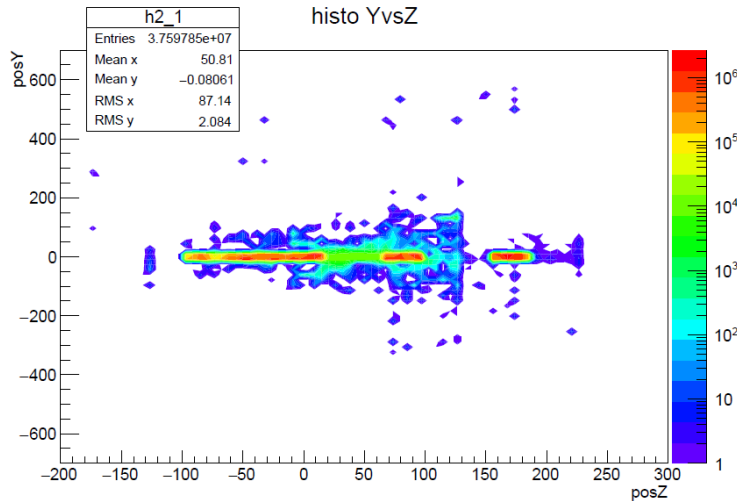


Figura 37: Proyección YZ de las interacciones de los muones [29].

2. **Simulación de Lluvias Atmosféricas:** Se implementó una simulación de Lluvias Atmosféricas para la estimación del background (ruido información no deseada) en la tomografía muonica del Volcán Galeras bajo el Framework de Corsika. En particular se implementaron lluvias para diferentes ángulos cenitales (figura 39) de 0, 30 y 60 grados. Para obtener un número máximo de muones que arriban a la superficie. El trabajo presenta resultados usando diferentes energías para la partículas primarias como protones y núcleos de hierro de 1, 10, 100 TeV, dado que para estas energías, se cuenta un mayor flujo de partículas (según el Espectro de Rayos Cósmicos en función de la energía ver figura 23[8], resultado de estudios de varios experimentos, a estas energías es el flujo aproximado es de 1 muon/metro-cuadrado-seg). Para la simulación de las EAS, se hizo uso de un modelo de perfil atmosférico tropical y el paquete de interacción hadrónica de altas energías QGSJET-04[2], que está implementado en Corsika y para bajas energías GHEISHA2002d[3], Para la simulación se siguieron los siguientes pasos.

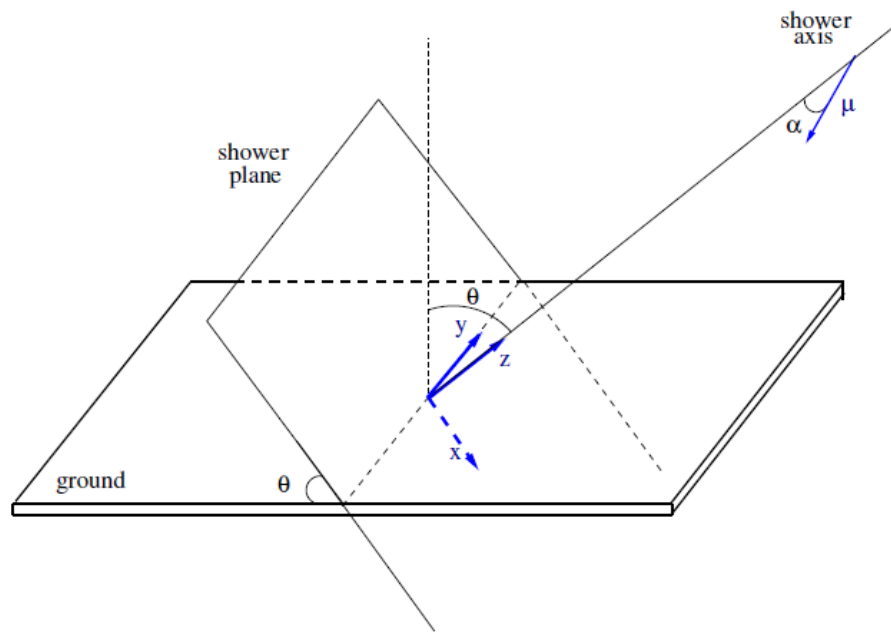


Figura. 39. Esquema que muestra el plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), la superficie terrestre y el sistema de coordenadas [29].

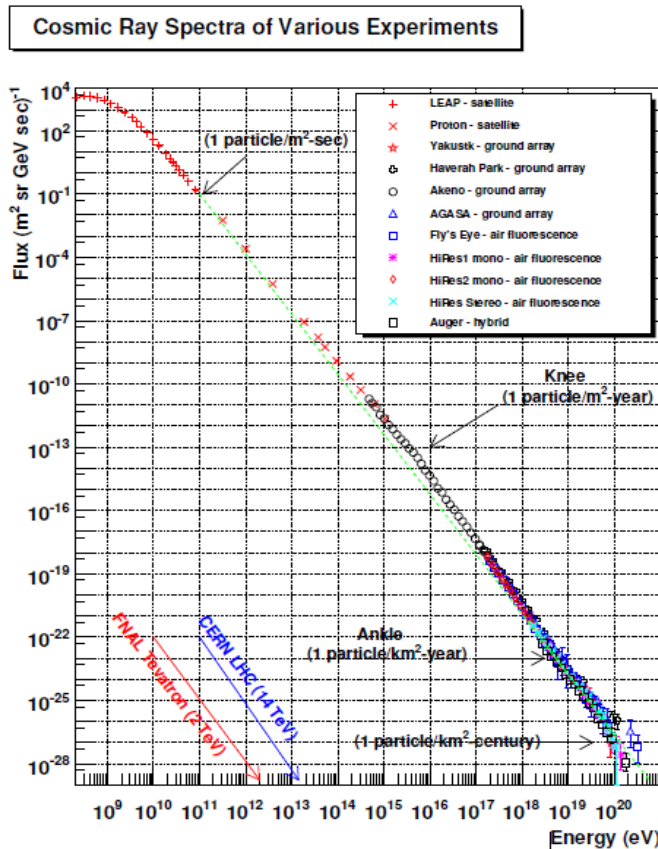


Fig.40. Flujo de partículas en función de la energía (espectro de rayos cósmicos) [29]

1. **Simulación de Lluvias Atmosféricas (EAS) con Geant4:** Para la estimación del background en la tomografía muonica del Volcán Galeras bajo el Framework de Geant4. Este trabajo se realizó con la colaboración de una estudiante del departamento de física (David Dueñas) quien realizo en primera instancia la simulación de las EAS usando el software CORSIKA que permite obtener la distribución lateral de muones (MLD) y el espectro de energía para los muones que arriban a la altura de la ciudad de Pasto. la simulación completa de la estructura del volcán Galeras.

Lateral distribution of μ^+/μ^- : Average distribution and fit

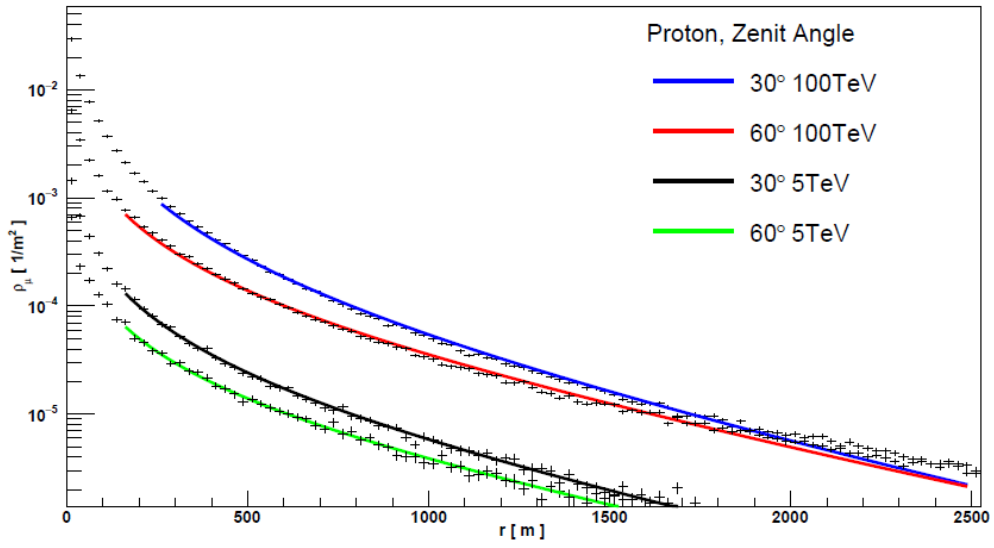


Figura 40: Grafica de MLD generada por protones de 5 y 100 TeV para los angulos 30 y 60 Grados [29].

Proton									
		N_μ	β		N_μ	β		N_μ	β
5TeV	0°	0.00014	1.5	10TeV	0.00025	1.5	100TeV	0.0029	2.0
	30°	0.00014	1.4		0.00021	1.4		0.0023	1.9
	45°	0.000097	1.3		0.00015	1.3		0.0015	1.6
	60°	0.000063	1.2		0.00010	1.1		0.00074	1.3

Tabla 1: Parámetros obtenidos del ajuste del número de muones por metro cuadrado en función de la distancia del núcleo de la ecuación: LDF. Con Protones como partículas primarias [29].

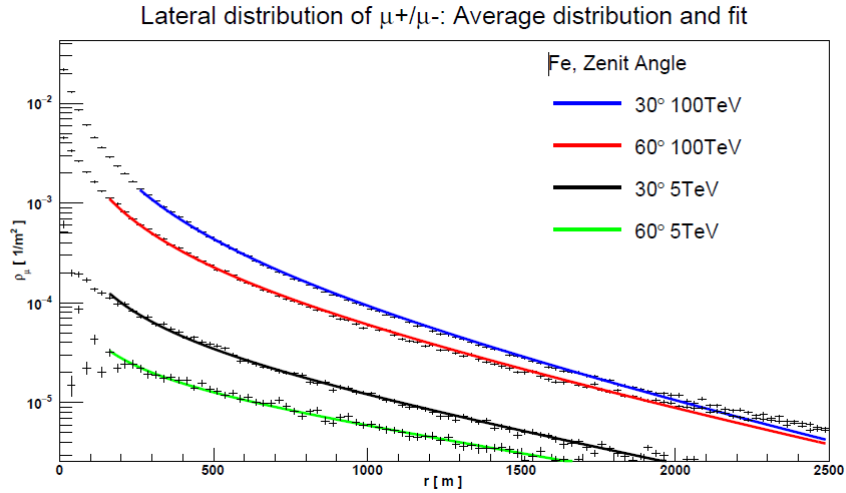


Figura 41: Grafica de MLD generada por núcleos de hierro de 5 y 100 TeV para los ángulos 30 y 60 grados [29].

Fe									
		N_μ	β		N_μ	β		N_μ	β
5TeV	0°	0.00016	0.92	10TeV	0.00041	1.3	100TeV	0.0043	1.8
	30°	0.00010	0.71		0.00027	1.0		0.0033	1.7
	45°	0.000060	0.50		0.00015	0.79		0.0022	1.5
	60°	0.000022	0.12		0.000060	0.38		0.0011	1.2

Tabla 2: Parámetros obtenidos del ajuste del número de muones por metro cuadrado en función de la distancia del núcleo de la ecuación: LDF. Con núcleos de hierro (Fe) como partículas primarias [29].

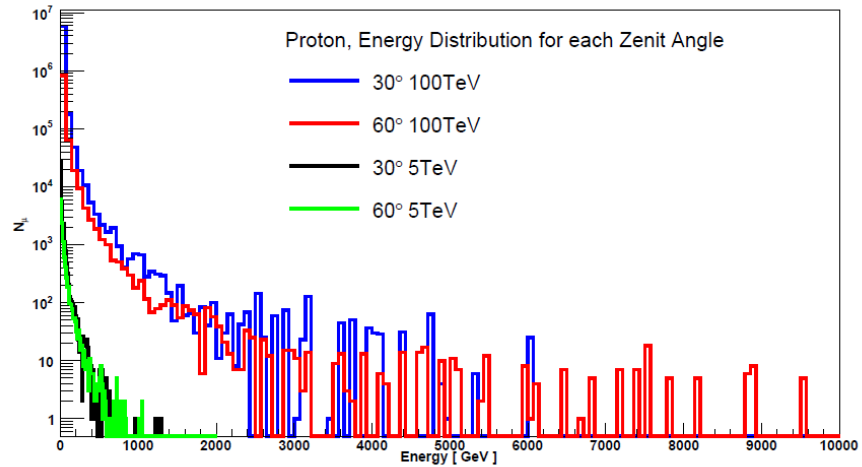


Figura 42: Espectro de energía de los muones generada por protones de 5 y 100 [29] TeV para los ángulos 30 y 60 grados

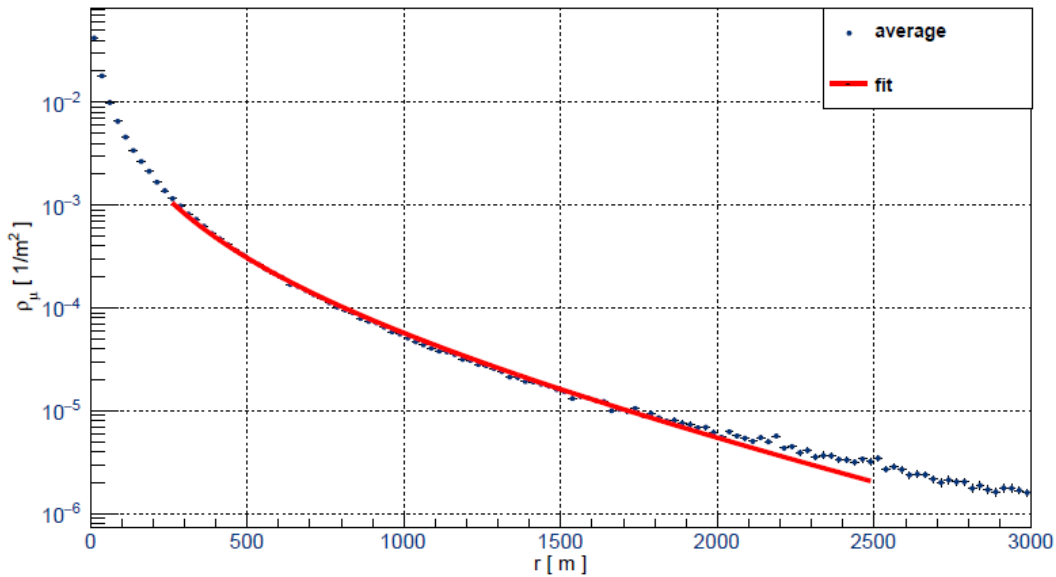


Fig. 43. Número de Muones por Metro Cuadrado en la Superficie Provenientes de un Protón a 100V [29].

2. Simulación numérica para determinar el corte de perfil atmosférico en la zona del volcán Galeras. Se utilizó el modelo atmosférico tropical de CORSIKA y los valores de las componentes B_x y B_z del campo magnético generados en la calculadora geomag[9] para la ciudad de Pasto, figura 34.

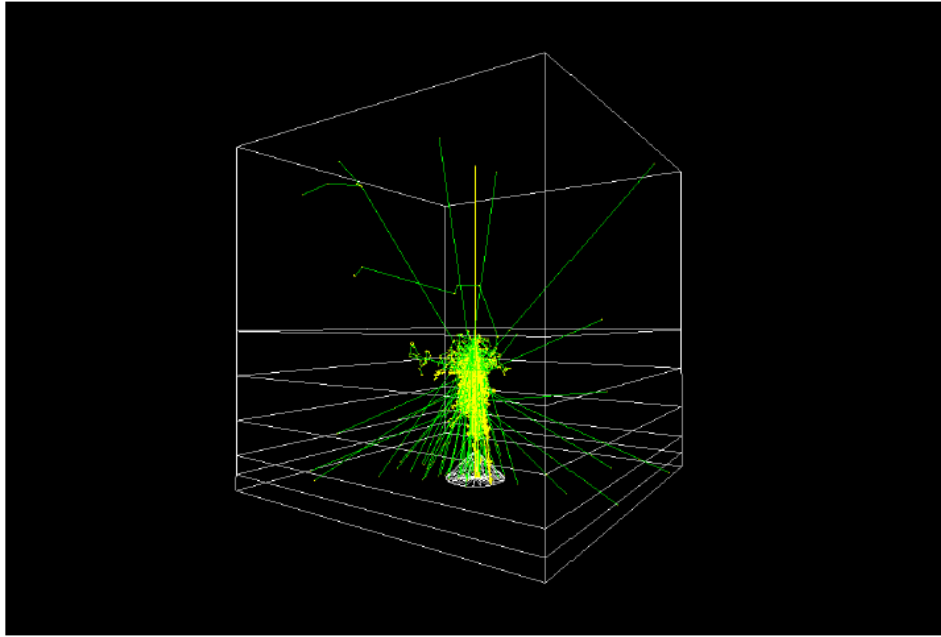


Fig. 44. Visualización del desarrollo de una EAS(Observamos la atmósfera modelada por 5 capas y el volcán como un cono, el tamaño de esta simulación es de 27 km) [29]

3. Simulación numérica modelando el volcán Galeras como un cono con condiciones físicas internas y externas similares a las del volcán Galeras, figura 45.

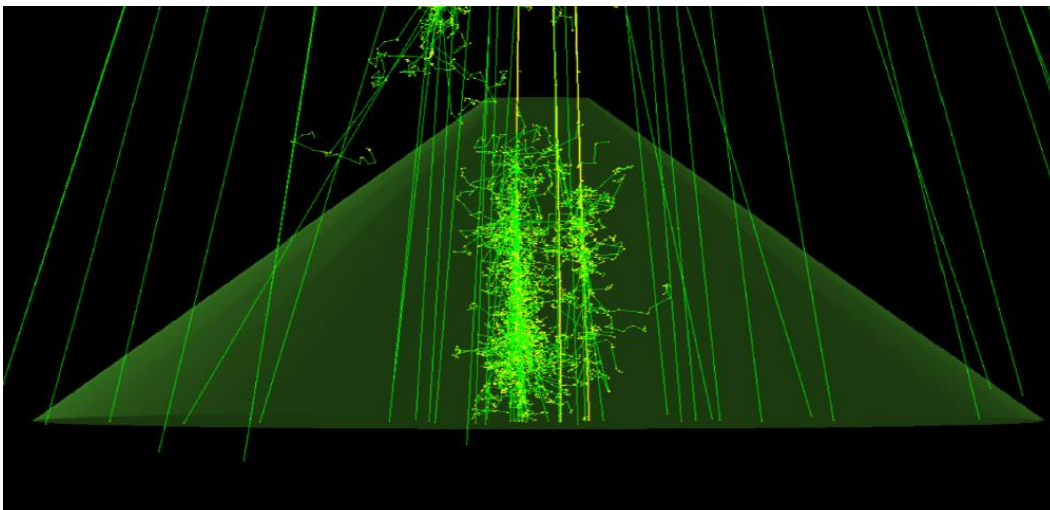


Fig. 45 Modelo simplificado del volcán (Esta simulación es una aproximación ya que se necesita herramientas computacionales muy robustas) [27].

3. **Simulación de un detector tipo centelleo:** Se implementó la simulación de un detector de muones atmosféricos para tomografía del Volcán Galeras con el uso de Geant4 para detectores de centelleo. En principio se simula el detector y luego se analizan los procesos físicos involucrados como deposición de energía, camino libre medio recorrido, trazas producidas por los muones al atravesar el detector, partículas secundarias producidas en la interacción de los muones con el material detector. La configuración del detector se puede resumir en las siguientes partes:
1. **Barras de centelleo plástico (poliviniltolueno)** [30], la forma de las barras están pensadas según el experimento MINERVA. Las dimensiones de bases 1.9 cm, longitud 40.85 cm y grosor cm 1.645 cm, los cuales serán colocados dentro de la placa trapezoidal anterior.

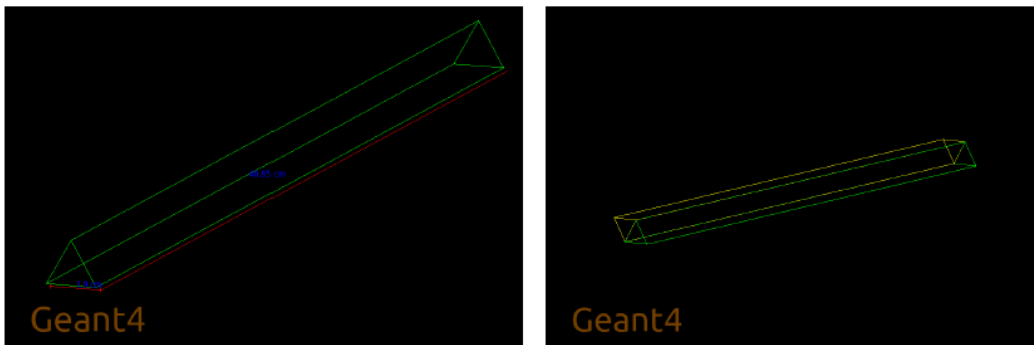


Figura 46: Barras centelladoras (Según experimento MINERVA) [30]

2. **Planos de barras de centelleo:** Luego se construye un plano (placas) constituido por diez barras de centelleo en dirección vertical y utilizamos el mismo procedimiento para construir otro plano con barras en dirección horizontal. Para finalizar se hacen 10 copia y las superponen. Al superponer segmentamos o pixelamos el detector. Cada pixel tiene una superficie de 9.5mm X 9.5mm se compone por la superposición de cuatro barras del centellador plástico.

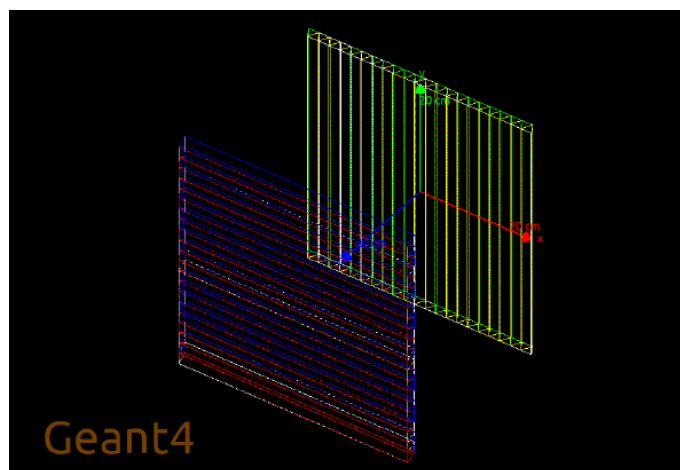


Figura 47: Planos horizontal y vertical del detector. [30]

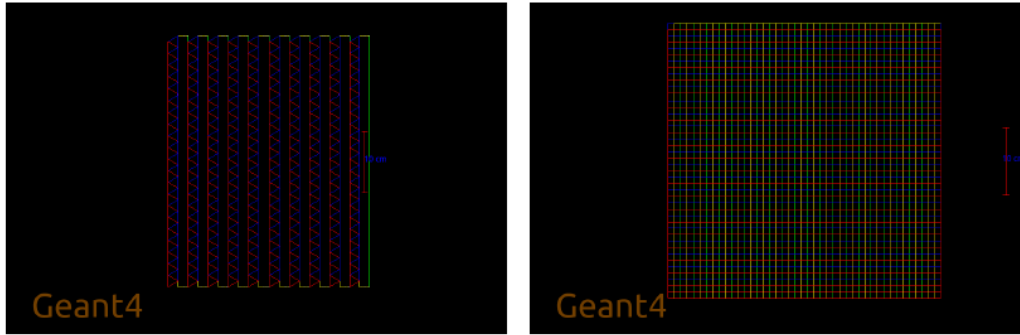


Figura 48: Configuración general del detector simulado [30]

3. **Simulación completa del detector en interacción con muones de energía de 31 GeV:** Una vez simulado el detector se envió un flujo de 10000 muones con energía de 31 GeV. La forma del flujo es la de un rectángulo de 20 cm por 20 cm. Luego se hace interactuar con el detector (figura 49).

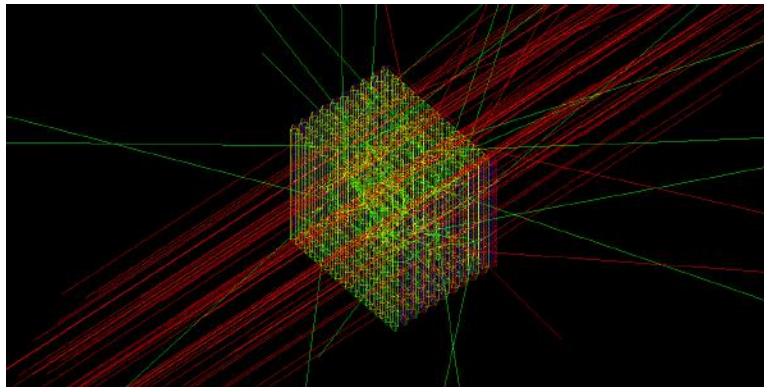
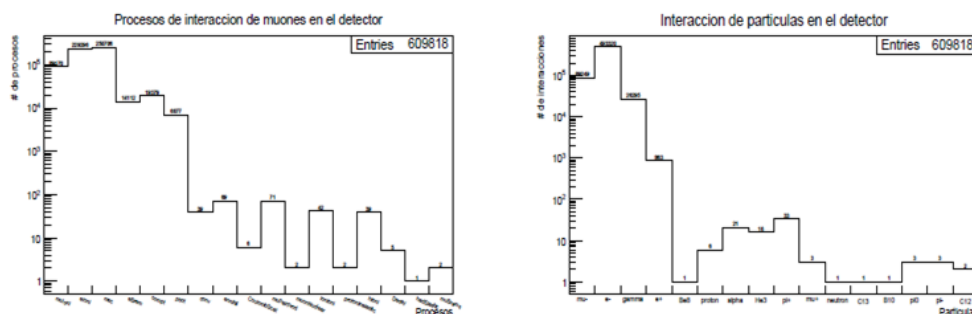


Figura 49: Interacción del flujo de muones con el material centellador [30].

4. **Proceso físico generado en el detector:** Finalmente se analizan los procesos físicos producidos en el detector como se muestran en los siguientes histogramas (figura 50).

Figura 50: Histogramas de procesos físicos ocurridos en el detector y sus partículas [30]



5. **Energía depositada por los muones en el detector:** Se analiza la energía depositada por todos

los muones en el detector (figura 51).

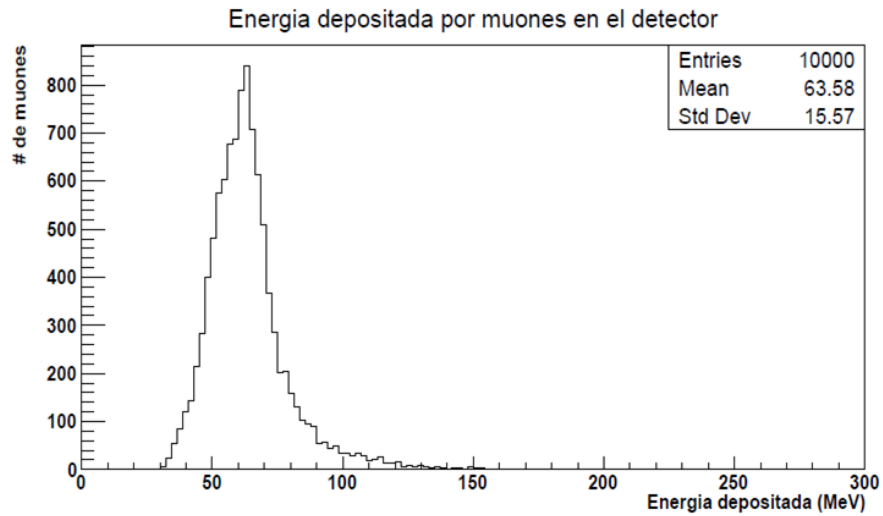


Figura 51: Energía depositada por los muones en el detector [30].

6. **Longitud recorrida por los muones en el material detector:** Se analiza también la longitud recorrida por diferentes muones (figura 52).

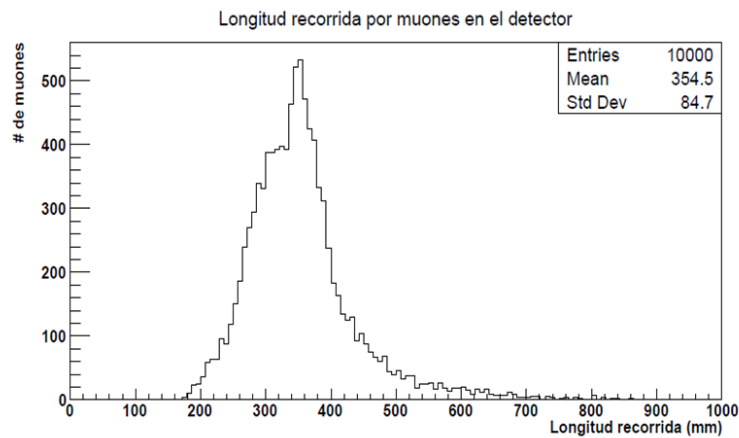


Figura 52: Longitud recorrida por los muones en el detector [30].

7. **Rastreo de muones en el interior detector:** Los muones al interactuar con el material detector dejan una traza como se manifiesta en la figura 53.

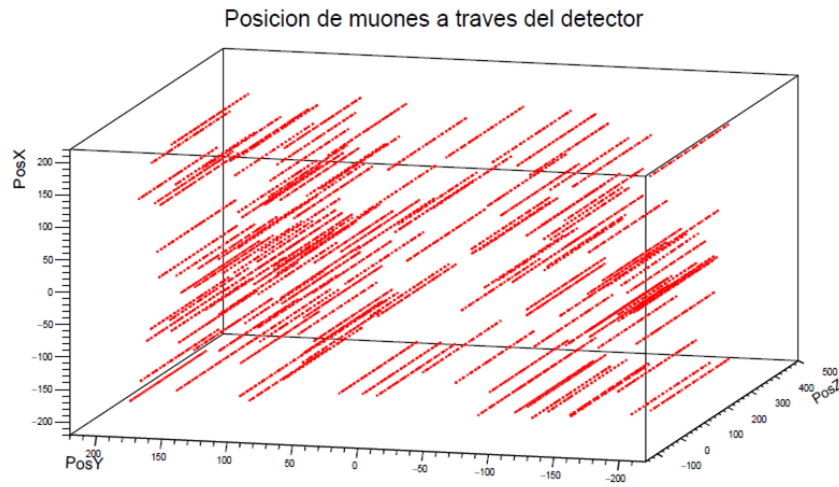


Figura 53: Traza de los muones en el detector [30].

8. Así como los muones dejan traza los electrones producto de las interacciones dejan una traza como se muestra en la figura 54.

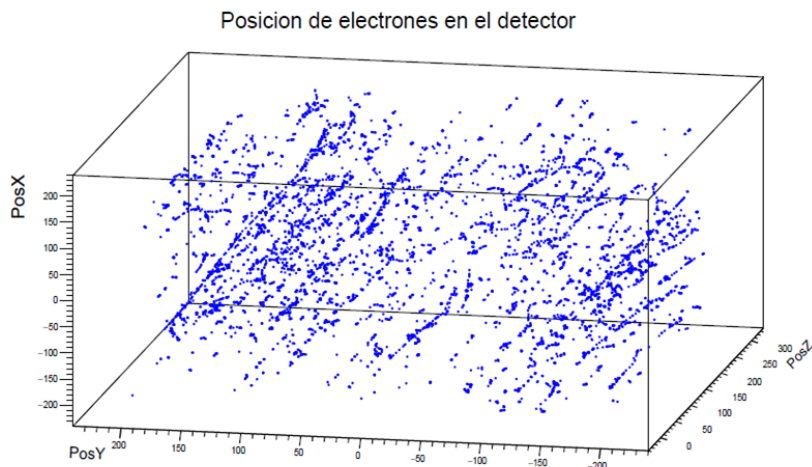


Figura 54: Traza de los electrones en el detector [54].

9. Finalmente otro tipo de radiación que se genera al paso de los muones con el material detector son los gamma como se indica en la figura 55.

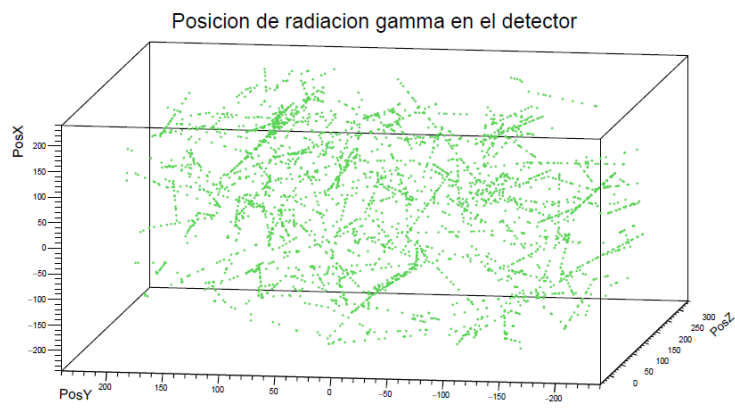


Figura 55: Traza de la radiación gamma en el detector [30].

4. Productos de Generación de Nuevo Conocimiento

Se participó en la 38th Meeting on High Energy Physics (ICHEP), organizado en Chicago el 28 jun al 02 de Julio de 2016, la información la pueden encontrar en:

38th ICHEP poster contribution, indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/attachments/1333362/inal.pdf

Artículo: **First Monte Carlo simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography.**

Anexo 8: Publication: 38th International Conference on High Energy Physics, 3-10 August 2016 Chicago, USA.

5. Productos de Formación de Recursos Humanos

Trabajos de grado: Durante el desarrollo de este proyecto se fortaleció la formación de recurso humano perteneciente al departamento de física de la Universidad de Nariño como de otras instituciones de educación superior, de la siguiente manera:

1. Se menciona que en la fecha de 24 de noviembre del 2016 se realizaron las sustentaciones de dos trabajos de grado que aportan de manera significativa al estudio que se realizando (Caracterización preliminar del flujo de muones), principalmente en el área de simulación. El presente proyecto se propone como insumo dentro de una propuesta mayor cual es la realización de la Tomografía del volcán Galeras usando muones atmosféricos. Dichos trabajos fueron los siguientes:
 - a. Simulación de la Interacción de un flujo de Muones Atmosféricos con un cono volcánico ideal, realizado por el estudiante David Francisco Dueñas.
 - b. Simulación de un detector de partículas segmentado para muones atmosféricos, realizado por el estudiante Jairo Hernán Rodríguez Rondón.
 - c. Simulación Preliminar de la Posición Optima de Instalación de un Detector de Muones Atmosféricos sobre el volcán Galeras, sustentado el 8 de agosto del 2017, por el estudiante de física Danilo Alejandro Arturo Rodríguez.

2. En el departamento de física de la Universidad de Nariño está en desarrollo una propuesta de trabajo de grado que pueden aportar al estudio que se viene realizando, la propuesta es:
 - a. Parámetros Elásticos del Edificio Volcánico Galeras como Insumo para Tomografía por Muones, por la estudiante de física Denis Torres Muñoz.
 - b. *Cálculo del Perfil Atmosférico de la Ciudad de Pasto e Implementación del Modelo, en el Paquete de Simulación CORSIKA, para la Producción de Lluvias Atmosféricas Extendidas (EAS).* Estudiante: José Luis Arévalo Guancha, Universidad de Nariño, en curso.

3. Se incluye a estudiantes de ingeniería electrónica de otras instituciones (AUNAR) de la ciudad de Pasto que están desarrollando sus trabajos de grado que van a robustecer el detector prototipo:
 - a. Diseño e implementación un de sistema de control para la orientación y posición de los detectores de muones como contribución al prototipo de tomografía del volcán Galeras en San Juan de Pasto 2017-2018.
 - b. Diseño e implementación de un sistema de telemetría y control remoto de posicionamiento orientado a los procesos de la detección optoelectrónica del flujo de muones en los alrededores del volcán Galeras, Pasto 2017-2018.

4. Anexo 11: Estudiante (David Francisco Dueñas) que trabajo en nuestro grupo fue aceptado como estudiantes de Doctorado en Física en la Universidad de Cincinnati, U.S.A., Agosto del 2017.

5. Estudiante (Danilo Arturo Rodríguez) que trabajo en nuestro grupo fue aceptado como estudiantes de Maestría en Física en la Universidad de Mayagüez, Puerto Rico, Agosto del 2017.

Cabe mencionar que semanalmente se desarrollan reuniones de carácter informativo, comunicativo e implementación de estrategias con los diferentes grupos de investigación, descrito en la siguiente forma:

1. Días lunes: Reunión con Alex Tapia y David Martínez, para tratar temáticas relacionadas con los

fenómenos de Monte-Carlo, rayos C6smicos, producci3n de muones y detectores.

2. Días jueves: Reuni3n con ingenieros electr3nicos para tratar los temas relacionados con la instrumentaci3n.
3. Días viernes: Reuni3n con estudiantes para tratar temáticas relacionadas con software.

Finalmente en todas las actividades, que resultaron fruto del proyecto las personas que participaron de todas ellas fueron quienes vienen colaborando en el desarrollo del proyecto dentro de los cuales se encuentran:

- Estudiantes de la carrera de física.
- Docentes de la carrera de física.
- Estudiantes de electr3nica.
- Ingenieros Docentes electr3nicos.

6. Productos de Apropiación Social del Conocimiento

Presentaciones en eventos

Con los estudiantes de la carrera de física David Dueñas y Jairo Rosero participamos como ponentes de avances realizados en el momento con la propuesta:

Anexo 1: “Simulación de Lluvias Atmosféricas para Tomografía Muónica del Volcán Galeras de la Ciudad de Pasto” en la 4° Escuela de Física de Partículas realizada durante los días 17 al 20 de noviembre del 2015 en las instalaciones de la Universidad de los Andes (Anexo certificados). El departamento de física de la Universidad de los Andes financio completamente la estadía y transporte de los estudiantes. Esta propuesta tuvo una gran acogida dentro de los participantes especialmente con investigadores del laboratorio FERMILAB con quienes tenemos algunos acercamientos. (Anexo 1).

Anexo 2: “First Monte Carlo simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography”, International Conference on High Energy Physics at Chicago, Illinois, August, 3 to 10 2016 (Ponentes: David Dueñas y Jairo Rodríguez).

Anexo 3: “Descripción preliminar de la tomografía con muones del Volcán Galeras”, III Uniandes Particle Detector School, del 26-30 de septiembre del 2016.
(Ponente: Tatiana Cusís)

Anexo 4: “Preliminary Results of the Tomography of the Galeras Volcano with the use of Atmospheric Muons”, V Uniandes Particle School, del 22-26 de mayo del 2017
(Ponente: Jaime Betancourt)

Anexo 5: “Preliminary simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography”, V Uniandes Particle School, del 22-26 de mayo del 2017
(Ponente: Danilo Arturo, poster premiado tercer lugar).

Anexo 6: “Preliminary simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography”, DPF 2017 Meeting of the American Physical Society Division of Particles and Fields, from July 31-August 4, 2017(FERMILAB)
(Ponentes: David Martínez y Alex Tapia)

Anexo 7: “Preliminary simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography”, VII Escuela de Rayos Cósmicos y Astro partículas, del 21 de Agosto al 1 de Septiembre de 2017 (EPN Quito, Ecuador)
(Ponente: Jaime A. Betancourt)

Anexo 9: “Una Aproximación a la Caracterización Preliminar del Flujo de Muones en los Alrededores del Volcán Galeras”, VIII Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía. (Ponencia oral: Jaime A. Betancourt), 8-11 de Noviembre de 2016, Pasto, Nariño, Colombia.

Anexo 10: “Introducción al ROOT y Geant4: Software para Análisis de Datos y Simulación”, VIII Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas, Realizado en la Universidad de Medellín los días 4, 5, y 6 de mayo del 2016 (Ponencia oral), David Francisco Dueñas y Jairo Rodríguez.

7. Conclusiones y Recomendaciones

Mediante la simulación de la EAS en CORSIKA [1], podemos observar de una forma muy próxima a la realidad, como se produce el desarrollo lateral de los muones producidos en la atmósfera originados por rayos cósmicos, también nos permite estimar cual será la energía de los muones que logran alcanzar la superficie de observación, en este caso la ciudad de Pasto. Además mediante la simulación del detector de partículas en GEANT4 [2][3], podemos estimar que tipos de procesos físicos son los que se producen en la interacción de los muones con el detector, la energía que estas partículas depositan en éste producto de los procesos físicos y como las trayectorias de éstas se ven afectadas al atravesar el detector.

Este trabajo se quiere destacar la importancia de las herramientas computacionales a la hora de evaluar la factibilidad de realizar proyectos de pequeña o gran escala sin recurrir a equipo de difícil acceso y costes económicos, teniendo resultados validos en los cuales basarnos para escoger las mejores opciones a la hora de la implementación de uno real, cuales son las ventajas y desventajas de usar ciertos materiales de detección, cuales son los más conveniente según sea la aplicación del mismo, que tan eficientes serian a la hora de detectar las partículas que deseamos, entre otros.

Se recomienda realizar la caracterización de la atmósfera de la ciudad de Pasto para que las simulaciones de EAS implementadas en CORSIKA [1] sean mucho más cercanas a la realidad, ya que si bien el modelo de atmósfera tropical implementado en este caso es un buena aproximación dada la zona en la que la ciudad se ubica, medir adecuadamente las variables atmosféricas locales nos daría una mejor idea de cómo las EAS se desarrollan localmente.

Se recomienda implementar componentes óptico al presente modelo de detector de centelleo, implementar en esta simulación una envoltura a cada una de las barras de centelleo con un material reflectante para que los fotones producidos por el centelleo del material no escapen de una a otra barra y afecten las medidas deseadas, además de la construcción de fotomultiplicadores para que capten las señales de los fotones producidos en cada barra de centelleo y ubicarlos al extremo de cada barra para que la reconstrucción tanto de posición como energía de los muones sea más acorde con la realidad, ya que en este prototipo la reconstrucción de energía y posición que se hizo, es debida a las posiciones "reales" y energía depositada por todos los procesos producto de la información almacenada en los datos de la simulación.

Para el flujo de muones incidentes, se recomienda implementarlo según la información extraída de las simulaciones de CORSIKA[1] lo cual permitirá realizar medidas más reales en cuanto a deposición de energía y trayectoria de los muones.

Se realizó la estimación del MLD a la altura de la ciudad de Pasto con diferentes ángulos cenitales de 0, 30, 45, 60 grados con energías de las partículas primarias con los valores de 5, 10, 10 TeV. Esto nos da una vasta idea de cómo es el comportamiento de los muones que pueden llegar a ser detectados en la superficie terrestre.

Se desarrolló la primera simulación completa de la geometría del volcán Galeras utilizando archivos GDML como entrada en GEANT4

Los resultados obtenidos a través de las simulaciones nos indica cómo se comportan los muones (20 eventos) cuando estos interactúan con un edificio volcánico en presencia de un cráter formado por roca y por aire, por otro lado estas simulaciones nos permitieron determinar una energía estimada necesaria para que los muones penetren todo el edificio volcánico siendo esta la apta para la tomografía muonica.

El siguiente paso será mejorar La simulación de la geometría y composición química del volcán Galeras, con esto también se aumentara el número de eventos para los muones interaccionando con el volcán utilizando GEANT4 usando sistemas computacionales más poderosos como clusters, ya que esta simulación exige mucho poder de cómputo.

Finalmente como resultado del proyecto se han realizado las siguientes actividades y resultados:

- Tres estudiantes graduados en física (con evaluaciones meritorias).
- Una publicación de tipo internacional.
- Ocho presentaciones orales y en formato posters de las cuales tres son internacionales y las demás nacionales.
- Dos estudiantes aceptados como estudiantes de doctorado y maestría en universidades extranjeras.
- Propuestas de investigación en desarrollo.
- Trabajos de grado en desarrollo.

8. Referencias bibliográficas

- [1] Nolwenn, L., Dominique G. & Jacques M. (2012), Density Muon Radiography of La Soufrière of Guadeloupe Volcano: Comparison with Geological, Electrical Resistivity and Gravity data. *Geophysics. J. Int.*, 185, pp 1-14.
- [2] Abraham et. al., J. (2004), (Pierre Auger Collaboration), Properties and performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory, *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 523, pp 50-95.
- [3] Moreno, J. C. (2012). Estudio de rayos cósmicos ultra energéticos en el Observatorio Pierre Auger: Nuevo modelo de profundidad atmosférica y su influencia en observables, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la PLata, 224 p.
- [4] F. Beauducel et. al. (2008), Muon radiography of volcanoes and the challenge at Mt. Vesuvius, *Cosmic radiation and Geoparticle Physics*, 10, pp 1-19.
- [5] Bene et. al., S. P. (2013), Air shower simulation for background estimation in muon tomography of volcanoes, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, pp 11-15.
- [6] Tanaka et al, H. (2008), Muon radiography and deformation analysis of the lava dome formed by the 1944 eruption of Usu, Hokkaido Contact between high-energy physics and volcano physics, *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 84, pp 107-116.
- [7] Abraham et. al., J. (2004), (Pierre Auger Collaboration), Properties and performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory, *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 523, pp 50-95.
- [8] Tanaka et al, H (2003). Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano, *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 507: pp. 657-669.
- [9] Antony et al., T. (1970), (Kascade Collaboration), The Cosmic Ray Experiment KASCADE., *Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A.*, 513, pp 490-510.
- [10] L. C AZON ET AL . A model for the transport of muons in extensive air showers. *Astropart.Phys.* 36 (2012) 211-223.
- [11] K. O LIVE ET AL . Particle Data Group. *Chin.Phys.* C38, (2014) 090001.
- [12] D. H ECK ET AL . CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. *CORSIKA*. CORSIKA 7.4004
- [13] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION Magnetic Field Calculators. <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>

- [14] S ERVICIO G EOLÓGICO COLOMBIANO . Observatorio Vulcanológico y Sismológico Pasto. <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Generalidades.aspx>
- [15] K. G REISEN - Ann. Rev. Nucl. Sci. 10 (1960) 63.
- [16] K. KAMATA , J. N ISHIMURA . Prog. Theoret. Phys. Suppl. 6 (1958) 93.
- [17] KASCADE-G RANDE COLLAB . Proc 29 ICRC, Pune, India, 6. (2005) 301
- [18] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. Global Data Assimilation System (GDAS). <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas/>
- [19] Alvarez et al., L. W. (1970), Search for the Hidden Chambers in the Pyramids. Science, 167, pp 832-839.
- [20] Tanizaki1, K. (2003), Geomagnetic Cutoff Effect on Atmospheric Muon Spectra at Ground Level, Universal Academy Press, Inc. 28th International Cosmic Ray Conference, pp 1663-1666.
- [21] Jonkmansa et. al., G. (2012), Nuclear Waste Imaging and Spent Fuel Verification by Muon Tomography, Annals of Nuclear Energy, 11, pp 1-11.
- [22] Felix, F. (2012), for the TOMUVOL Collaboration, Density imaging of volcanos with atmospheric muons, in2p3-00663446, version pp 1 - 27.
- [23] Gibert1, D. et. al., (2010), Muon tomography: Plans for observations in the Lesser Antilles, Earth Planets Space, 62, pp 153-165.
- [24] S. AGOSTINELLI ET AL, Geant4 - A Simulation Toolkit, Nuclear Instruments and Methods A 506, (2003) 250-303.
- [25] URL: <http://root.cern.ch/drupal/>; y <http://root.cern.ch/root/html/TMinuit.html>.
- [26] Izraelevitch, F. (2013). [en línea] Universiade de Buenos Aires. Disponible en: <http://materias.df.uba.ar/labo5a2013v/files/2013/02/Centelladores.pdf> [2016, 02 de septiembre].
- [27] QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User's Manual, Series "6000" DAQ, Jeff Rylander, Glenbrook, South High School, Tom Jordan, Fermilab, Jeremy Paschke, York High School, Hans-Gerd Berns, U., Washington.
- [28] userscontent2.emaze.com/images/a9b890a9-e2c8-4768-ad87-ced88498a93d/272a9a10-de96-4fd1-b461-eeb8d51814a3image9.jpeg.
- [29] Simulación de la interacción de un flujo de muones atmosféricos con un cono volcánico ideal, TRABAJO DE GRADO, Para optar el título profesional de: Físico. DAVID FRANCISCO DUEÑAS TONGUINO
- [30] Simulación de un detector de partículas segmentado para muones atmosféricos, TRABAJO DE GRADO Para optar al título profesional de: Físico, Jairo Hernán Rodríguez Rondón, San Juan de Pasto, Colombia, Noviembre 2016.

Anexo 1: IV Uniandes Particle Physics School, del 17-20 de noviembre del 2015 (Ponentes: David Dueñas y Jairo Rodríguez)



Simulación de Lluvias Atmosféricas para Tomografía Muónica del Volcán Galeras de la Ciudad de Pasto

David Dueñas¹, Jairo Rodríguez¹, Jaime Betancourt¹, Alex Tapia², David Martínez³

¹Universidad de Nariño, Pasto, Colombia

²Instituto de Tecnologías en Detección y Astroparticulas (CNEA, CONICET, UNSAM), Buenos Aires, Argentina

³Illinois Institute of Technology, Chicago-IL.

dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com

1. Introducción

El volcán Galeras con una altura de 4276 msnm, localizado en la Ciudad de San Juan de Pasto con una edad estimada en cerca de 4.500 años, es uno de los de mayor actividad en Colombia con reportes de erupciones importantes. El asentamiento y crecimiento de poblaciones en zonas de alto riesgo, ha conllevado a tener una especial vigilancia del cono volcánico, especialmente por los antecedentes del Galeras en la generación de flujos piroplásticos.

La tomografía con muones ayuda a comprender la estructura volcánica interna y la dinámica presente durante un proceso eruptivo[4]. Los muones generados por decaimientos en las EAS interactúan débilmente con la atmósfera perdiendo una mínima energía, lo cual permite obtener un flujo considerable de muones que arriban a la superficie terrestre. La tomografía posibilitará el desarrollo de un método para la detección temprana de una posible erupción del Galeras.

En primera instancia se implementa la simulación de las EAS usando el software CORSIKA que permite obtener la distribución lateral de muones (MLD) y el espectro de energía para los muones que arriban a la ciudad de Pasto. Además, se implementó una simulación preliminar de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera y el volcán Galeras usando el software GEANT4. Para fines prácticos, la forma geométrica del Galeras fue idealizada usando un cono. Entender estos aspectos es una pieza clave para la futura tomografía volcánica en el Galeras.

La MLD consiste en obtener el número de muones por metro cuadrado en función de la distancia desde el punto de impacto con respecto al plano de la lluvia, ver Fig.1[7]. Mediante el estudio de la MLD obtendremos el número estimado de muones que llegan a la superficie en la altura de la ciudad de Pasto.

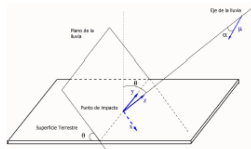


Figura 1: Esquema que muestra el plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), la superficie terrestre y el sistema de coordenadas.

2. Metodología

Se simularon lluvias verticales, es decir con un ángulo cenital $\theta = 0^\circ$ para obtener un número máximo de muones que arriban a la superficie. Nuestro trabajo presenta resultados usando energías para la partícula primaria (proton) de 1, 10, 100 TeV, dado que para estas energías, el flujo de partículas es mayor, ver Fig.2[8].

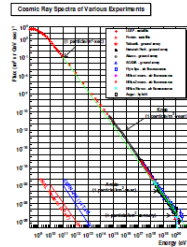


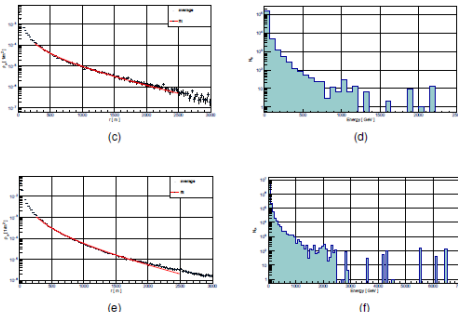
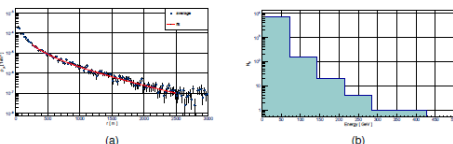
Figura 2: Flujo de partículas en función de la energía

Para la simulación de las EAS, se uso el paquete de interacción hadrónica de altas energías QGSJET-II-04[2] y para bajas energías GHEISHA2002d[3]. Utilizamos el modelo atmosférico tropical de CORSIKA y los valores de las componentes B_x y B_z del campo magnético generados en la calculadora geomag[10] para la ciudad de Pasto.

Además se implementó el software de interacción radiación-materia GEANT4 para obtener la visualización de una EAS generada por un protón enviado desde una altura de 50km, con una energía de 100 GeV y con un ángulo cenital $\theta = 0^\circ$ que impacta en la atmósfera. Para la altura se toma como punto de referencia la base de un cono volcánico ideal con dimensiones de 8,18 km de diámetro en la base y una altura de 1,75 km, estas medidas son las aproximadas a las del volcán Galeras vistas desde Pasto que esta a una altura media de 2527 msnm[9]. El cono se ubicó en un mundo cúbico de 50 km de lado y posteriormente se dividió el mundo para crear 6 capas atmosféricas las cuales siguen el modelo que se encuentra en la página NASA Glenn Research Center[11].

3. Resultados

En CORSIKA se simularon 200 lluvias para cada energía del protón primario, de las cuales se extrajo información referentes a la energía y el número de muones que arriban a la superficie. Con esta información se obtuvieron los gráficos de número de muones detectados en función de sus energías (Fig.6) (b), (d), (f) y el de MLD (Fig.6) (a), (c), (e).



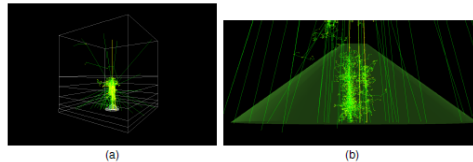
Número de Muones por Metro Cuadrado Provenientes de un Protón a (a) 1 TeV, (c) 10 TeV y (e) 100 TeV. Espectro de Energía de Muones Detectados en la Superficie Provenientes de un Protón a (b) 1 TeV, (d) 10 TeV y (f) 100 TeV.

Las MLD obtenidas a partir de la información extraída de las simulaciones, se comportan según la ecuación de Nishimura-Kamata-Greisen[12] para el arreglo de detectores KASCADE-Grande[14]:

$$\rho_\mu = N_\mu \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{r}{10r_0}\right)^2\right)^{-\gamma} \quad (1)$$

Donde N_μ , r_0 , α , β , y γ son los parámetros de ajuste. Los Valores de r_0 , α , y γ fueron fijados en 320m, 0,75 y 3 respectivamente, y N_μ y β son libres[15].

3.1 Resultados Preliminares de Simulación en GEANT4



Visualización del desarrollo de una EAS Partículas interactuando con el cono volcánico ideal

4. Conclusiones

En este trabajo se realizaron simulaciones de EAS generadas por un protón con el fin de encontrar las MLD y sus respectivos espectros de energía, estos resultados son importantes para la tomografía volcánica ya que nos brindan información estimada del número máximo de muones que arriban a la superficie de la ciudad de Pasto. Debido a que el número de muones que arriban dependen del ángulo de incidencia del primario, se realizaron simulaciones teniendo en cuenta este parámetro.

GEANT4 nos permitirá a futuro desarrollar simulaciones especializadas como un método eficaz para el análisis de la estructura interna del volcán Galeras, dado que se implementará mejoras en cuanto a la construcción de la atmósfera de Pasto, la estructura volcánica y los detectores. Además con la información recolectada en las simulaciones tanto de MLD como de GEANT4 se realizarán las primeras pruebas de reconstrucción de imágenes tomográficas.

En cuanto al mejoramiento en la atmósfera tanto en GEANT4 como en CORSIKA, se pretende realizar un cálculo del perfil atmosférico para la ciudad de Pasto usando los datos presentes en la plataforma GDAS. Esto ayudará a que las simulaciones los eventos simulados se ajusten mejor a la realidad.

Referencias

- [1] D. HECK ET AL. CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers. CORSIKA 7.4004
- [2] S. OSTAPCHENKO. QGSJET-II. *PRD* 83 (2011) 014018.
- [3] H.C. FESEFELDT. GHEISHA program. Technical Report PITHA 85-02 (1985).
- [4] TANAKA, H. K. M. ET AL. Radiographic Visualization of Magma Dynamics in an Erupting Volcano. *Nat. Commun.* 5:3387 doi: 10.1038/ncomms4381 (2014).
- [5] Geant4 Developments and Applications. J. ALLISON ET AL. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53 No. 1, (2006) 270-278.
- [6] Geant4 - A Simulation Toolkit. S. AGOSTINELLI ET AL. *Nuclear Instruments and Methods A* 506, (2003) 250-305.
- [7] LAZON ET AL. A model for the transport of muons in extensive air showers. *Astropart.Phys.* 36 (2012) 211-223.
- [8] K. OLIVE ET AL. Particle Data Group. *Chin.Phys.* C38, (2014) 090001.
- [9] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Observatorio Volcánico y Sísmológico Pasto. <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Generalidades.aspx>
- [10] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION Magnetic Field Calculators. <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>
- [11] NASA GLENN RESEARCH CENTER Earth Atmosphere Model. <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html>
- [12] K. GREISEN- *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 10 (1960) 63.
- [13] K. KAMATA, J. NISHIMURA. *Prog. Theoret. Phys. Suppl.* 6 (1958) 93.
- [14] KASCADE-GRANDE COLLAB. *Proc. 29 ICRC, Pune, India.* 6 (2005) 301
- [15] A TAPIA ET AL. Study of the chemical composition of high energy cosmic rays using the muon LDF of EAS between $10^{17.25}$ eV and $10^{17.75}$ eV. *arXiv:1501.02217*

Anexo 2: International Conference on High Energy Physics at Chicago, Illinois, August, 3 to 10 2016

(Ponentes: David Dueñas y Jairo Rodríguez)



First Monte Carlo simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography

Alex Tapia¹, David Dueñas², Jairo Rodríguez², Jaime Betancourt², David Martínez³

¹Departamento de Ciencias Básicas, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
²Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
³ IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).
 dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com



Abstract

Muon radiography is based on the observation of the absorption of muons in matter, as the ordinary radiography does by using X-rays. The interaction of cosmic rays with the atmosphere produce Extensive Air Showers (EAS), which provide abundant source of muons. These particles can be used for various applications of muon radiography, in particular to study the internal structure of different volcanoes edifices. We will discuss the study the different volcanoes in Colombia focusing on Galeras located 9 km near to the Pasto City. In this work we present the first study of the muon lateral distribution to the Pasto height (4276 m a.s.l.) and a first order simulation the volcanic cone using GEANT4 [1][2]. For the interaction of the cosmic rays with the atmosphere we have used the CORSIKA 7404[3] software with an atmosphere tropical model and QGSJETII-04[4] as hadronic model for the high energies and GHEISHA2002[5] for low energies. The analysis considers two different primary particle (proton and iron), four zenith angles (0°, 30°, 45° and 60°) with energies in the range of 5, 10 and 100 TeV.

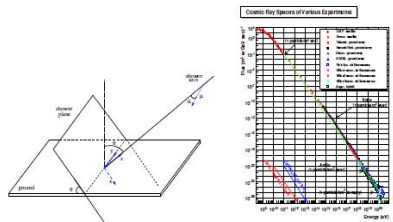
1. Introduction

The Galeras Volcano with a height of 4276 m a.s.l., located in San Juan de Pasto city with an estimated age of 4.500 years, is one with the highest activity in Colombia with important records of eruptions in the past. The increasing of population in higher risk areas around the volcano has motivated to develop special techniques of monitoring the volcano activity, especially for its records respecting to pyroclastic flux generated.

The tomography with muons help us to understand the internal volcano structure and its dynamics present during a eruptive process[6].

A simulation using Corsika EAS software has been implemented to obtain lateral distribution of muons (MLD) and their energy spectrum once they arrive at the altitude of San Juan de Pasto city. Furthermore, a preliminary simulation of the interaction of the atmospheric muons with Galeras volcano was made using GEANT4[1][2]. The geometric shape of Galeras volcano was made by SOLIDWORKS and implemented for GDML in FASTRAD.

The MLD consists in obtain the number of muons per square meter in function of the distance from the shower core (see Fig.1(a)[7]).



2. Methodology

We simulated EAS with different zenith angles $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 60° . We have used energies for primary particles (protons and Fe) of 5, 10, 100 TeV (see Fig.1(b)[8]).

For simulation of EAS, we used the hadronic interaction package for high energies QGSJETII-04[4] and for low energies GHEISHA2002[5]. We used the CORSIKA's tropical atmospheric model and magnetic field components Bx and Bz generated in geomag calculator[9] for Pasto city.

Using GEANT4 we simulate muons interacting within volcano and its crater. The geometry has been constructed using Solidworks (SW) and converted to GDML files. As input in SW contours provided by the volcano observatory "Servicio Geológico Colombiano (SGC)" were used. Materials for volcano structure, crater and their characteristics are shown in tables below:

Composition	Percent Weight in Earth's Crust
O	46,6
Si	27,7
Al	8,3
Fe, Ca, Na, K, Mg	17,4

Characteristic of simulated volcano	
Crater Diameter	320 m
Height	1100 m
Crater Depth	250 m

Muons of 2 TeV and $\theta = 80^\circ$ interacting with volcano structure and the crater are show in Fig. 3(a), 3(b).

3. Results

Using CORSIKA were simulated 200 EAS for the angles and energies previously described. In figure 2(a), 2(c) and 2(b), 2(d) are shown the MLD and the number of muons arriving to the altitude of Pasto city (~2600) in function of energy.

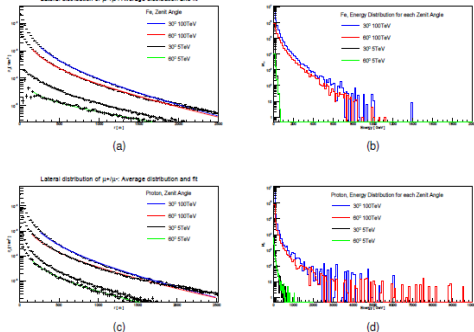


Figure 2

The MLD obtained from simulation behaves according Nishimura-Kamata-Greisen equation[12][13] for the KASCADE-Grande[14] detectors array: $\rho_\mu = N_\mu \left(\frac{r}{\lambda}\right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{r}{\lambda}\right)^\alpha\right)^{-\gamma}$. Where N_μ , r_0 , α , β , and γ are fit parameters. These parameters r_0 , α , and γ were fixed in 320m, 0.75 and 3 respectively[15], and N_μ and β are obtained from the fit. We obtain:

		Fe		proton	
		N_μ	β	N_μ	β
5TeV	0°	0.00018	0.92	0.00041	1.3
	30°	0.00010	0.71	0.00027	1.0
	45°	0.000060	0.50	0.00015	0.79
	60°	0.000022	0.12	0.000060	0.38
10TeV	0°	0.00014	1.5	0.00025	1.5
	30°	0.00014	1.4	0.00021	1.4
	45°	0.000097	1.3	0.00015	1.3
	60°	0.000063	1.2	0.00010	1.1

3.1 Preliminar results of volcano simulation in GEANT4

In GEANT4 besides the volcano geometry simulation implementation as shown in figure 3 (b), we have simulated 1000 muons of energy of 1TeV passing through the volcano crater. We made a study giving to the crater two types of composition:

- standard rock
- air

Results from this study are shown in figure 3 (c) and (d).



Figure 3

As a first approach we send the particles through the volcano geometry in a scaled 1:1000. This scaling was done due a simulation at real scale will need an increasing computational power. We are in the process to obtain access to a cluster and scale the simulation to the real dimensions of the volcano.

4. Conclusions

- We have estimates for the first time the MLD at the Pasto city altitude with different zenith angles and energy of the primary particles of the EAS.
- We have developed the first steps through a complete simulation of the Galeras volcano geometry, and volcano composition using GDML files as input into GEANT4.
- Next step we will calculate the atmospheric profile for Pasto city using stored data in the Global Data Assimilation System (GDAS) platform[16]. Furthermore we are planning to improve the simulation of Galeras volcano composition and increase the number of muons interaction in the volcano using GEANT4. Finally we are in our first steps making simulations of the particle detectors using plastic scintillator bars and SiPM as a future candidate for readout.

References

- [1] Geant4 Developments and Applications, J. ALLISON ET AL., IEEE Transactions on Nuclear Science 53 No. 1, (2006) 270-278.
- [2] Geant4 - A Simulation Toolkit, S. AGOSTINELLI ET AL., Nuclear Instruments and Methods A 506, (2003) 250-303.
- [3] D. HECK ET AL., CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers, CORSIKA 7.4.004 .
- [4] S. OSWALDCHENKO, QGSJET-II, PRD 83 (2011) 014018.
- [5] H. C. FISEFELDT, GHEISHA program, Technical Report PITHA 85-02 (1985).
- [6] TANAKA, H. K. M. ET AL., Radiographic Visualization of Magma Dynamics in an Erupting Volcano, Nat. Commun. 5:3389 doi: 10.1038/ncomms3391 (2014).
- [7] L. CAZON ET AL., A model for the transport of muons in extensive air showers, Astropart.Phys. 36 (2012) 211-223.
- [8] K. OLIVE ET AL., Particle Data Group, Chin.Phys. C38, (2014) 090001.
- [9] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, Magnefo Field Calculators, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>.
- [10] SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, Observatorio Vulcanológico y Sismológico Pasto, <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Generales.aspx>.
- [11] NASA GLEN RESEARCH CENTER, Earth Atmosphere Model, <http://www2.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html>
- [12] K. GREISEN, Ann. Rev. Nucl. Sci. 10 (1960) 63.
- [13] K. KAMATA, J. NISHIMURA, Prog. Theoret. Phys. Suppl. 6 (1956) 93.
- [14] KASCADE-GRANDE COLLAB. Superstity PhD Thesis, Detectores de Superficie y la Composición Química de los Rayos Cósmicos (2007).
- [15] A. TAPIA ET AL., Study of the chemical composition of high energy cosmic rays using the muon LDF of EAS between 10^{12} eV and 10^{13} eV, arXiv:1501.02217.
- [16] NOAA NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION, Global Data Assimilation System (GDAS), <http://www.emc.noaa.gov/glob/gdas/>

Anexo 3: III Uniandes Particle Detector School, del 26-30 de septiembre del 2016 (Ponente: Tatiana Cusís)



Descripción Tomografía con Muones del Volcán Galeras

Tatiana Cusís¹, David Dueñas¹, Jairo Rodríguez¹, Jaime Betancourt¹, Alex Tapia², David Martínez³,

¹Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
²Departamento de Ciencias Básicas, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
³IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).



Resumen

Mediante esta descripción del proyecto se menciona algunos métodos relevantes para estudiar la estructura interna del Volcán Galeras (VG) a través del uso de muones de alta energía provenientes de los rayos cósmicos los cuales tienen la capacidad de penetrar el volcán. Se muestra en el presente poster una recopilación de los diferentes estudios realizados hasta el momento dentro del grupo de altas energías de la Universidad de Nariño asociados a un sistema de detección de muones cósmicos en un perfil previamente evaluado en la zona del VG y poner en marcha un método análisis de datos que permita obtener imágenes en 3D del interior del volcán. Como resultado de la investigación a un futuro cercano se pondrá en funcionamiento un método de análisis de datos de manera continua tal que permita el monitoreo constante del volcán.

Introducción

El volcán Galeras con una altura de 4276 msnm, localizado en la Ciudad de San Juan de Pasto con una edad estimada en cerca de 4.500 años, es uno de los de mayor actividad en Colombia con reportes de erupciones importantes. El asentamiento y crecimiento de poblaciones en zonas de alto riesgo, ha conllevado a tener una especial vigilancia del cono volcánico, especialmente por los antecedentes del Galeras en la generación de flujos piroplásticos. La tomografía con muones ayuda a comprender la estructura volcánica interna y la dinámica presente durante un proceso eruptivo [1]. Los muones generados por decaimientos en las EAS interactúan débilmente con la atmósfera perdiendo una mínima energía, lo cual permite obtener un flujo considerable de muones que arriban a la superficie terrestre. La tomografía posibilitará el desarrollo de un método para la detección temprana de una posible erupción del Galeras.

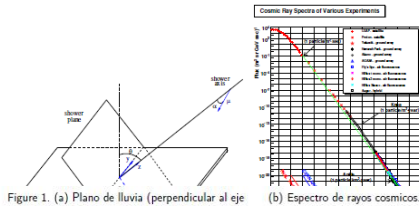


Figure 1. (a) Plano de lluvia (perpendicular al eje Superficie terrestre y sistema de coordenadas [2]. (b) Espectro de rayos cósmicos.

Tomografía de Muones

La tomografía es una técnica empleada para explorar estructuras complejas y heterogéneas debajo de la superficie terrestre mediante la construcción de imágenes. Los modelos tridimensionales (3D) de la estructura terrestre, permiten dar respuesta a algunos cuestionamientos básicos de su geodinámica. La radiografía Muon se basa en la observación de la absorción de muones en la materia, como la radiografía ordinaria hace mediante el uso de rayos-X[3].

Rayos Cósmicos

Se denominan rayos cósmicos a partículas subatómicas procedentes del espacio exterior (fig.1) cuya energía, debido a su gran velocidad, es muy elevada. La interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera produce grandes lluvias de aire, que proporcionan abundante fuente de muones. Estas partículas se pueden utilizar para diversas aplicaciones de radiografía muon, en particular para estudiar la estructura interna de diferentes volcanes [4]



Figure 1: Lluvia de Rayos Cósmicos provenientes del exterior [5].

Evolución de las cascadas y Producción de Muones

1. Su baja densidad atómica permite una extensa dispersión de las partículas secundarias (como muones).
2. El espesor vertical es suficiente para que las cascadas alcancen el desarrollo máximo de partículas, permitiendo relacionar proporcionalmente el número total de partículas con la energía total.
3. La inhomogeneidad del perfil de densidad permite establecer para su estudio las diferentes zonas de desarrollo de las cascadas donde se producen los procesos de multiplicación (ej.como producción de muones) y absorción de partículas[6].

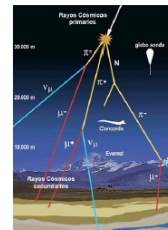


Figure 2: Diagrama esquemático mostrando los procesos principales en las cascadas[7].

Metodología Usada En Previos Estudios

En un trabajo realizado recientemente usamos GEANT4 [8][9] con el cual simulamos muones que interactúan con el volcán y su cráter. La geometría fue construida utilizando el programa SolidWorks (SW) y posteriormente por medio de otro software llamado FASTRAD se convirtió a una extensión en un archivo GDML que es leído por GEANT4. Para la construcción Se utilizaron las curvas de nivel proporcionadas por el "Servicio Geológico se realizó una simulación en GEANT4 además de la aplicación de simulación de la geometría volcán como se muestra en la figura 3 (b), se simuló 1000 muones de energías de 1 TeV atravesando el volcán A través del cráter. Se realizó un estudio con dos tipos diferentes de cráter:

- roca estándar figura (d)
- aire figura (c)



figura (a)

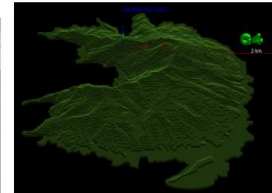


figura (b)

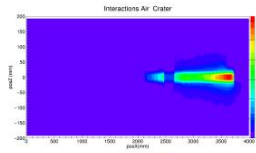


figura (c)

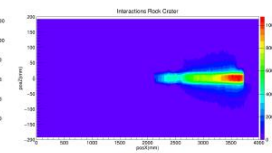


figura (d)

Figure 3

Como una primera aproximación se envió partículas a través de la geometría del volcán en un escalado 1: 1000. Este escala fue hecho por una simulación a escala real la cual tendrá una potencia de cálculo cada vez mayor. Además Se desea en un futuro desarrollar un proceso para poder tener acceso a la escala de la simulación a las dimensiones reales del volcán Galeras[10].

Conclusiones

- En un futuro cercano el grupo de investigación de la Universidad de Nariño desarrollará una simulación completa de la geometría del volcán Galeras, y su composición usando GEANT4.
- Un siguiente paso posible a futuro será calcular el perfil atmosférico de la ciudad de Pasto a partir de datos almacenados en la asimilación de datos global.

Referencias

[1] TANAKA, H. K. M. ET AL, Radiographic Visualization of Magma Dynamics in an Erupting Volcano, Nat. Commun. 5:3381 doi: 10.1038/ncomms4381 (2014).
 [2] L. CAZON ET AL, A model for the transport of muons in extensive air showers, Astropart. Phys. 36 (2012) 211-223.
 [3] F. Beauducell et. al. (2008), Muon radiography of volcanoes and the challenge at Mt. Vesuvius, Cosmic radiation and Geoparticle Physics, 10, pp 1-19.
 [4] Abraham et. al., J. (2004), (Pierre Auger Collaboration), Properties and performance of the Prototype Instrument for the Pierre Auger Observatory, Nuc. Instr. Meth Physic. Res. A., 523, pp 50-95.
 [5] <http://astrofi.org/publication/images/8420/los-rayos-cosmicos-a-efectan-a-la-habitabilidad-en-exoplanetas-primary.jpg>
 [6] Moreno, J. C. (2012). Estudio de rayos c ósmicos ultraenergéticos en el Observatorio Pierre Auger. Nuevo modelo de profundidad atmosférica y su influencia en observables, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la PLata, 224 p.
 [7] userscontent2.emaze.com/images/a98890a9-e2c8-4768-a887-ced8498493d/2729a10-de96-46d1-b461-ebb8d51814a3image9.jpeg.
 [8] Geant4 Developments and Applications, J. ALLISON ET AL, IEEE Transactions on Nuclear Science 53 No. 1, (2006) 270-278.
 [9] Geant4 - A Simulation Toolkit, S. AGOSTINELLI ET AL, Nuclear Instruments and Methods A 506, (2003) 250-303
 [10] indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/attachments/1333362/2004792/poster_tomografia_final.pdf

Anexo 4: V Uniandes Particle School, del 22-26 de mayo del 2017 (Ponente: Jaime Betancourt)



Preliminary Results of the Tomography of the Galeras Volcano with the use of Atmospheric Muons

Jaime Betancourt¹,
Alex Tapia², David Martinez³, David Dueñas¹, Jairo Rodriguez¹, Jhon Estrada⁴

¹University of Nariño, Pasto, Colombia.
²Department of Basic Sciences, University of Medellín, Medellín, Colombia.
³IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).
⁴Autonoma Corporation of Nariño, Colombia.
jabetanudenar@gmail.com, tctatiestrella493@gmail.com, dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com



Resumen

Tomography is a technique used to explore complex and heterogeneous structures beneath the earth's surface by imaging. The three-dimensional (3-D) models of the earth's structure allow us to answer some basic questions about its geodynamics. In volcanic regions, images can provide information on magmatic and hydrothermal systems and other structural features. The reconstruction of the internal structure of a volcano constitutes an input for the geophysical interpretation of the behavior of the eruptive activity and for more precise determinations of hypocenters of earthquake-volcanic signals[1]. In this work, it is proposed to probe the internal structure of the Galeras Volcano (GV) through the use of high energy muons from the cosmic rays that have the capacity to penetrate the volcano. In principle, it is proposed the installation of a system of detection of cosmic muons in a previously evaluated profile in the GV zone and implement a method of data analysis that allows to obtain 3D images of the interior of the volcano.

Introduction

The VG is one of the most active in Colombia, in 1991 it was declared one of the Volcanoes of the Decade by IAVCEI as part of the United Nations program of the International Decade for Natural Disaster Reduction. It is located in the department of Nariño in the southwestern Colombian (1° 13,260 N, 77° 21,540 W, 4276 amsl). The indigenous Quillacingas gave the name of Urcunina ("Mountain of fire") to the GV. The first Spanish conquerors gave this name, by its resemblance to Galeras or boats with which they sailed in the Mediterranean. Its active cone is located 9 km west of San Juan de Pasto (approximately 477,540 inhabitants). The GV is a stratovolcano made up of sites of andesitic lava flows and deposits of pyroclastic flows and falls. The current state of activity monitoring of GV is made up of the surveillance network [2], which contains, among others: Seismic stations (short-term and broadband), sound pressure sensors, electronic inclinometers, GNSS stations, sulfur dioxide (SO₂) emissions detection stations, Magnetic field and electric field variation measurement systems, permanent video cameras for observation and monitoring of surface activity, stations for constant monitoring of sludge flows (geophones and a rain gauge), Weather station (speed sensors, wind direction, rainfall, solar radiation, atmospheric pressure, relative humidity, dew point and ambient temperature), Stations for the measurement of radon (Rn-222) gas isotope emissions from the ground, natural field meters of spontaneous electrical potential (PE), the vast majority with telemetric transmission. The mentioned monitoring networks provide data that are valuable for prevention and research purposes. But unfortunately they are very limited especially since their resolution is of the order of 100 m and does not allow to obtain the temporal evolution of the internal structure of the volcano in moments of activity.

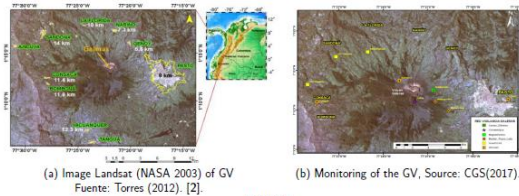


Figure 1

Methodology

In order to achieve the proposed objective, a methodology is proposed which consists of 7 phases summarized below.

1. Compilation and study of the application of the method to existing volcanoes concerning the tomography.
2. Implementation of a Galeras simulation and study of the best detection system to use (Types of detectors with better characteristics).
3. Characterization of the muon flow in the Galeras area.
4. Study of the best conditions (location of the system and climatic) for installation of detection system in the Galeras.
5. Installation of the detection system to be used that includes the entire process of data acquisition, transmission of information via telemetry, reception of the signal, conversion of information from analog to digital.
6. Design and implementation of a data analysis method, which allows us to perform the analysis in real time.
7. Analysis and discussion.

Preliminary results

Fe					
θ	N_{μ}	β	N_{μ}	β	N_{μ}
30°	0.00016	0.96	0.00041	1.3	0.0041
30°	0.00010	0.71	0.00027	1.0	0.0031
45°	0.00006	0.50	0.00015	0.79	0.0021
60°	0.00002	0.15	0.00006	0.38	0.0011

Composition	Percent Weight in Earth's Crust
O	46.6
Si	27.7
Al	8.5
Fe, Ca, Na, K, Mg	17.4

Table 1: Adjustment Parameters for the MLD Table 2: Composition of the internal structure of the GV and crater

The advances are summarized in the following graphs:

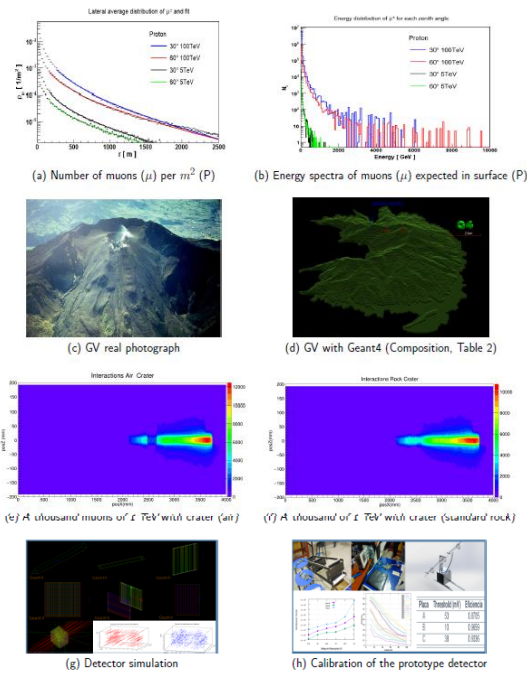


Figure 2

For the simulation of the MLD of the EAS, use was made of Equation 1 of Nishimura-Kamata-Greisen[3], obtained for the arrangement of KASCADE-Large detectors [4] and the energy spectrum for the muons that arrive at the height of the city of Pasto (~2600 m).

$$\rho_{\mu} = N_{\mu} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\alpha} \left(1 + \left(\frac{r}{r_0} \right) \right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{r}{10r_0} \right) \right)^{-\gamma} \quad (1)$$

Where the parameters r_0 , α , and γ were set at 320m, 0.75 and 3 respectively [5] and the parameters β and N_{μ} were adjusted, for protons with different zenith angles and energies mentioned. As shown in Table 1.

Conclusions

So far we are in the second phase of the methodology, the results have been satisfactory, without however there are improvements as:

1. Complement the numerical simulations of the VG structure with data from studies (geophysical and geological) and study the most optimum detection system to use.
2. To carry out studies with simulations that allow to include effects of attenuation of the muon flow when traversing the structure of the volcano in function of the incident energy and the angle of incidence. perform the calculation of the atmospheric profile in the area of the VG to be implemented in the simulation where the gas volume, particle density, composition, thermal diffusion processes and height are taken into account.

References

[1] F. Beauducel et. al. (2008). Muon radiography of volcanoes and the challenge at Mt. Vesuvius, Cosmic radiation and Geoparticle Physics, 10, pp 1-19
 [2] Colombian geological survey-CGS (2015). Volcano Activity Monthly Report of the Galeras, Chiles - Cerro negro, Cumbal, Las Animas, Doña Juana and Azufar, Internal report, 35 p.
 [3] K. KAMATA, J. NISHIMURA. Prog. Theoret. Phys. Suppl. 6 (1958) 93.
 [4] KASCADE-GRANDE COLLAB. Proc 29 ICRC, Pune, India, 6. (2005) 301
 [5] A TAPIA ET AL. Study of the chemical composition of high energy cosmic rays using the muon LDF of EAS between 1017.25 eV and 1017.50 eV. arXiv:1501.02217

Anexo 5: V Uniandes Particle School, del 22-26 de mayo del 2017 (Ponente: Danilo Arturo, poster premiado tercer lugar)



Preliminary simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography.

Danilo Arturo¹, David Dueñas¹, Jairo Rodriguez¹, Jaime Betancourt¹, Alex Tapia², David Martinez³

¹Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
²Department of Basic Sciences, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
³IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).
daniloled1109@gmail.com, dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com



Abstract

Muon radiography is based on the observation of the absorption of muons in matter, as the ordinary radiography does by using X-rays. The interaction of cosmic rays with the atmosphere produce Extensive Air Showers (EAS), which provide abundant source of muons. These particles can be used for various applications, in particular to study the internal structure of different volcanoes edifice. [1]. Using GEANT4 [2], we present a simulation of the volcanic cone and a scintillation detector that has been calibrated with a radioactive source. Subsequently, the scintillation detector was placed at a previously studied point on the GV, and the production of muon flux was realized as a function of the zenith angle and to different energies that cross the Geological structure and hit the scintillation detector.

Introduction

The Galeras Volcano (GV) with a height of 4276 m a.s.l., located in San Juan de Pasto city with an estimated age of 4.500 years, is one with the highest activity in Colombia with important records of eruptions in the past. The increasing of population in higher risk areas around the volcano has motivated to develop special techniques of monitoring the volcano activity, especially for its records respecting to pyroplastic flux generated. The tomography with muons help us to understand the internal volcano structure and its dynamics present during a eruptive process[3]. Muons generated by EAS, interact weakly with atmosphere, losing minimal energy, allowing to get a muon flux with different zenith angles (Fig 1), which arrive to the terrestrial surface (Fig. 2). Using SOLIDWORKS, FASTRAD and GEANT4[2]. We simulated the volcanic profile and a muon scintillation detector as tools for GV tomography.

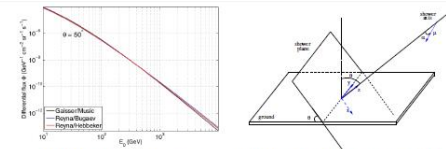


Fig 1: Muon flux model. $\theta = 30^\circ$. Rain plane (Perpendicular to the rain axis) Fig 2: the terrestrial surface and coordinate system [4].

Scintillation detector of atmospheric muons in GEANT4[2]

In the radiation-matter program GEANT4[2], was designed and simulated a scintillation detector of Polyvinyltoluene bars $C_{10}H_{10}$, predetermined material in GEANT4 [2](Fig. 3). The chosen shape of the bars is based on the experiment MINERVA[5], which allow us to observe how interact the muons when cross the detector, the physical processes involved, the energy that they deposit in it and as their tracks are affected. (Fig. 4).

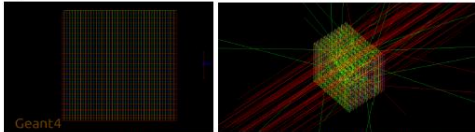


Fig. 3: Front view of the detector. Fig. 4: Simulation of muon interaction with a scintillation detector

GV Geometry in GEANT4[2]

For the implementation of the GV in GEANT4[2] We used different softwares, in order to include the coordinates of the level curves provided by the Colombian geological service[6], and build the solid volcanic complex which was exported to a GDML format[7] that can be read by GEANT4[2]. The simulation of the geometry of the GV (Fig. 5) is composed of standard rock and his crater of air (Tables 1 and 2).

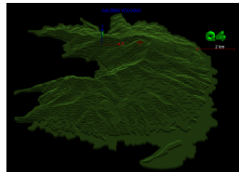


Fig 5: Simulation of Galeras Volcano in GEANT4.

Características del Volcán	
Diametro del cráter	320m
Altura	1100m
Profundidad cráter	320m

Tabla 1: Características del volcán

Composición	Porcentaje en la tierra
O	46.6
Si	27.7
Al	8.3
Fe, Ca, Na, K, Mg	17.4

Tabla 2: Composición química de la roca estándar

Calibration of scintillation detector

For the calibration of the scintillation detector was used a source of C_{60} . C_{60} is artificially produced by activation of C_{60} isotope neutron. C_{60} decays by the disintegration beta of N_{60} stable isotopes (Fig. 6). The activated nickel nucleus emits two gamma rays with energies of 1.17 and 1.33 MeV.

In order to the detector can get a detection of the decays of the source of $Co60$, was added and modified new classes to the program, such as: "GammaPhysics", "PhysicList", "EmStandardPhysics"

and get a graph of the characteristic peaks of gamma radiation. (Fig. 7).

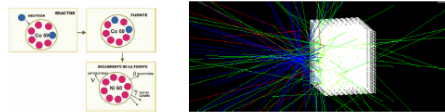


Fig. 6: A neutron hits over a core of C_{60} which becomes in C_{60}^* (unstable)

Fig. 7: C_{60} source simulation

Ideal location of scintillation detector on Galeras volcano

The two geometries (GV and the detector with its characteristics), are implemented in the GEANT4 simulation. The location of detector is an aspect of great importance when applying muography on geological bodies, because the distance that muons cross through the structure, depends of the topography of the place and the location of the area of interest. The best location points are indicated on the map (Fig. 8)

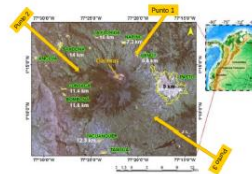


Fig. 8: Convenient points to the disposition of muon detector[6].



Fig. 9: Location on which the simulation is performed[6].

To place the location point at the simulation (Fig 9) We transformed the geographical coordinates of the volcano and the detector to Cartesian coordinates (X,Y,Z). After, a translation was made to the origin of the coordinate system in GEANT4.

Simulation's results in GEANT4

We used ROOT[8] for the analysis of data obtained of the simulation. We simulated 2000 events of interactions of C_{60} source with the scintillation detector. In Fig 10 you can see the decays of the C_{60} source and in Fig. 11 the characteristic peaks of gamma radiation registered by the scintillation detector.

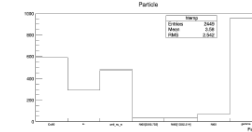


Fig. 10: C_{60} decay.

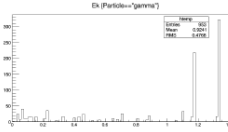


Fig. 11: The characteristic peaks of gamma radiation.

We are working with an extraordinary geometry and many events of interaction, so that the GV simulation has been scaled to units of "mm". To observe the location point of the scintillation detector in the graphical interface, the simulation has been performed with a considerable size detector. The results can be seen in Fig. 12 and Fig. 13.

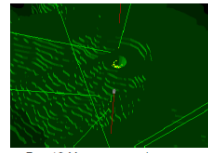


Fig. 12: Muon cross volcanic cone and the scintillation detector

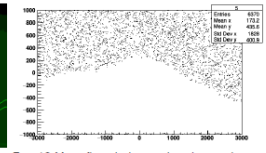


Fig. 13: Muon flux which arrived to the test detector.

Conclusions

- Next step we will calculate the atmospheric profile for Pasto city
- We will develop a real size simulation
- We will do a preliminary measurement of muon flux with the prototype detector in the three locations and the possibility to doing a measurement with the detector which has the high energies investigation group of UNIANDÉS.

Referencias

- [1] 38 TH ICHEP POSTER CONTRIBUTION. <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/>.
- [2] GEANT4 DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS, J. ALLISON ET AL., IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE 53 No. 1, (2006) 270-278.
- [3] TANAKA, H. K. M. ET AL., RADIOGRAPHIC VISUALIZATION OF MAGMA DYNAMICS IN AN ERUPTING VOLCANO, NAT. COMMUN. 5:3381 DOI: 10.1038/ncomms4381 (2014).
- [4] L. CAZON ET AL., A MODEL FOR THE TRANSPORT OF MUONS IN EXTENSIVE AIR SHOWERS, ASTROPART. PHYS. 36 (2012) 211-223.
- [5] DESIGN, CALIBRATION, AND PERFORMANCE OF THE MINERVA DETECTOR <https://arxiv.org/pdf/1305.5199.pdf>
- [6] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO PASTO, <http://www2.sgc.gov.co/PASTO/VOLCANES/VOLCAN GALERAS/GENERALIDADES.ASPX>
- [7] <http://lccapp.cern.ch/PROJECT/SIMU/FRAMEWORK/GDML/DOC/GDMLMANUAL.PDF>
- [8] ROOT DATA ANALYSIS FRAMEWORK. <https://root.cern.ch/GUIDES/USERS-GUIDE>

**Anexo 6: DPF 2017 Meeting of the American Physical Society Division of Particles and Fields, from July 31-August 4, 2017(FERMILAB)
(Ponentes: David Martínez y Alex Tapia)**



Preliminary simulation study of Galeras Volcano structure using Muon Tomography.

Jaime Betancourt¹, Alex Tapia², David Martínez³
David Dueñas¹, Danilo Arturo¹, Jairo Rodríguez¹

¹Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
² Department of Basic Sciences, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
³ IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).
danilolead1109@gmail.com, dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com



Abstract

Muon radiography is based on the observation of the absorption of muons in matter, as the ordinary radiography does by using X-rays. The interaction of cosmic rays with the atmosphere produce Extensive Air Showers (EAS), which provide abundant source of muons. These particles can be used for various applications, in particular to study the internal structure of different volcanoes edifice. For the interaction of the cosmic rays with the atmosphere we have used the CORSIKA software [1]. Using GEANT4 [2], we present a simulation of the volcanic cone and a scintillation detector that has been calibrated with a radioactive source. Subsequently, the scintillation detector was placed at a previously studied point on the GV, and the production of muon flux was realized as a function of the zenith angle and to different energies that cross the Geological structure and hit the scintillation detector.

Introduction

The Galeras Volcano (GV) with a height of 4276 m a.s.l., located in San Juan de Pasto city with an estimated age of 4.500 years, is one with the highest activity in Colombia with important records of eruptions in the past. The increasing of population in higher risk areas around the volcano has motivated to develop special techniques of monitoring the volcano activity, especially for its records respecting to pyroplastic flux generated. The tomography with muons help us to understand the internal volcano structure and its dynamics present during a eruptive process[3]. Using CORSIKA [1] with an atmosphere tropical model and QGSJETII-04[4] as hadronic model for the high energies and GHEISHA2002[5] for low energies were simulated 200 EAS for the angles $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 60° and energies for protons of 5, 10, 100 TeV. In Fig.1 and Fig.2 are shown the MLD and the number of muons arriving to the altitude of Pasto city (~2600m) in function of energy [6]. Using SOLIDWORKS, FASTRAD and GEANT4[2]. We simulated the volcanic profile and a muon scintillation detector as tools for GV tomography.

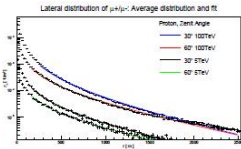


Fig 1: Number of muons per m^2 from protons [6]

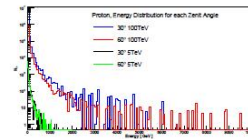


Fig 2: Energy spectrum for μ expected from protons [6]

Scintillation detector of atmospheric muons in GEANT4[2]

In the radiation-matter program GEANT4[2], was designed and simulated a scintillation detector of Polyvinyltoluene bars C_9H_{10} , predetermined material in GEANT4 [2](Fig. 3). The chosen shape of the bars is based on the experiment MINERVA[7], which allow us to observe how interact the muons when cross the detector, the physical processes involved, the energy that they deposit in it and as their tracks are affected. (Fig. 4).

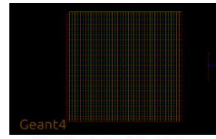


Fig. 3: Front view of the detector.

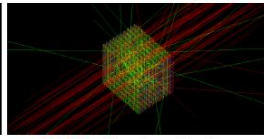


Fig. 4: Simulation of muon interactions with a scintillation detector

GV Geometry in GEANT4[2]

For the implementation of the GV in GEANT4[2] We used different softwares, in order to include the coordinates of the level curves provided by the Colombian geological service[8], and build the solid volcanic complex which was exported to a GDML format[9] that can be read by GEANT4[2]. The simulation of the geometry of the GV (Fig. 5) is composed of standard rock and his crater of air (Tables 1 and 2).

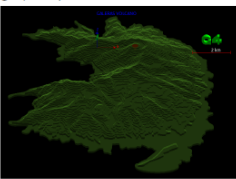


Fig 5: Simulation of Galeras Volcano in GEANT4.

Composition	Percent Weight in Earth's Crust
O	46,6
Si	27,7
Al	8,3
Fe, Ca, Na, K, Mg	17,4

Characteristic of simulated volcano	
Crater Diameter	320 m
Height	1100 m
Crater Depth	250 m

Tables: 1 and 2

Calibration of scintillation detector

For the calibration of the scintillation detector was used a source of Co^{60} . Co^{60} is artificially produced by activation of Co^{59} isotope neutron. Co^{60} decays by the disintegration beta of Ni^{60} stable isotopes (Fig. 6). The activated nickel nucleus emits two gamma rays with energies of 1.17 and 1.33 MeV.

In order to the detector can get a detection of the decays of the source of Co^{60} , was added and modified new classes to the program, such as: "GammaPhysics", "PhysicList", "EmStandardPhysics"

and get a graph of the characteristic peaks of gamma radiation. (Fig. 7).

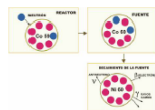


Fig. 6: A neutron hits over a core of Co^{59} which becomes in Co^{60} (unstable)

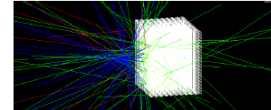


Fig. 7: Co^{60} source simulation

Ideal location of scintillation detector on Galeras volcano

The two geometries (GV and the detector with its characteristics), are implemented in the GEANT4 simulation. The location of detector is an aspect of great importance when applying muography on geological bodies, because the distance that muons cross through the structure, depends of the topography of the place and the location of the area of interest. The best location points are indicated on the map (Fig. 8)

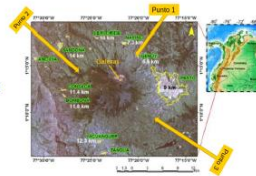


Fig. 8: Convenient points to the disposition of muon detector[8].



Fig. 9: Location on which the simulation is performed[8].

To place the location point at the simulation (Fig 9) We transformed the geographical coordinates of the volcano and the detector to Cartesians coordinates (X,Y,Z). After a translation was made to the origin of the coordinate system in GEANT4.

Simulation's results in GEANT4

We used ROOT[10] for the analysis of data obtained of the simulation. We simulated 2000 events of interactions of Co^{60} source with the scintillation detector. In Fig 10 you can see the decays of the Co^{60} source and in Fig. 11 the characteristic peaks of gamma radiation registered by the scintillation detector.

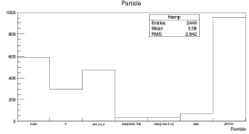


Fig. 10: Co^{60} decay.

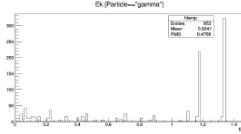


Fig. 11: The characteristic peaks of gamma radiation.

We are working with an extraordinary geometry and many events of interaction, so that the GV simulation has been scaled to units of "mm". To observe the location point of the scintillation detector in the graphical interface, the simulation has been performed with a considerable size detector. The results can be seen in Fig. 12 and Fig. 13.

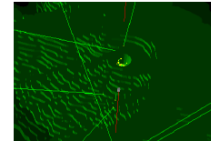


Fig. 12: Muon crossin volcanic cone and the scintillation detector

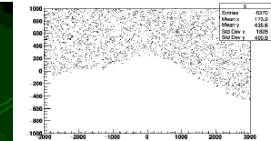


Fig. 13: Muon flux which arrived to the test detector.


Conclusions

- Next step we will calculate the atmospheric profile for Pasto city
- We will develop a real size simulation
- We will do a preliminary measurement of muon flux with the prototype detector in the three locations.

References

[1] D. HECK ET AL, CORSIKA: A MONTE CARLO CODE TO SIMULATE EXTENSIVE AIR SHOWERS, CORSIKA 7.4004.
[2] GEANT4 DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS, J. ALLISON ET AL, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE 53 No. 1, (2006) 270-278.
[3] TANAKA, H. K. M. ET AL, RADIOGRAPHIC VISUALIZATION OF MAGMA DYNAMICS IN AN ERUPTING VOLCANO, NAT. COMMUN. 5:3381 DOI: 10.1038/ncomms4381 (2014).
[4] S. OSTAPCHENKO, QGSJET-II, PRD 83 (2011) 014018.
[5] H.C. FESEFELDT, GHEISHA PROGRAM, TECHNICAL REPORT PITHA 85-02 (1985).
[6] 38 TH ICHHEP POSTER CONTRIBUTION. <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/>.
[7] DESIGN, CALIBRATION, AND PERFORMANCE OF THE MINERVA DETECTOR <https://arxiv.org/pdf/1305.5199.pdf>
[8] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLOGICO PASTO, <http://www2.sgg.gov.co/PASTO/VOLCANES/VOLCAN GALERIAS/GENERALIDADES.ASPX>
[9] <http://logapp.cern.ch/project/simu/framework/gdml/doc/gdmlmanual.pdf>
[10] ROOT DATA ANALYSIS FRAMEWORK. <https://root.cern.ch/guides/users-guide>


Anexo 7: VII Escuela de Rayos C3smicos y Astro part3culas, del 21 de Agosto al 1 de Septiembre de 2017 (EPN Quito, Ecuador) (Ponente: Jaime A. Betancourt)



Preliminary Results of the Tomography of the Galeras Volcano with the use of Atmospheric Muons.

Jaime Betancourt¹, Alex Tapia², David Martinez³
David Dueñas¹, Danilo Arturo¹, Jairo Rodriguez¹, Jhon Paz⁴

¹Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
²Department of Basic Sciences, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
³IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).
⁴Autonoma Corporation of Nariño, Pasto, Colombia.
danirolead1109@gmail.com, dafra90@gmail.com, jairo3584@gmail.com



VII ESCUELA DE RAYOS C3SMICOS Y ASTROPARTICULAS

Abstract

Muon radiography is based on the observation of the absorption of muons in matter, as the ordinary radiography does by using X-rays. The interaction of cosmic rays with the atmosphere produce Extensive Air Showers (EAS), which provide abundant source of muons. These particles can be used for various applications, in particular to study the internal structure of different volcanoes edifices. For the interaction of the cosmic rays with the atmosphere we have used the CORSIKA software [1]. Using Geant4 [2], we present a simulation of the volcanic cone and a scintillation detector that has been calibrated with a radioactive source. Subsequently, the scintillation detector was placed at a previously studied point on the Galeras Volcano (GV), and the production of muon flux was realized as a function of the zenith angle and to different energies that cross the Geological structure and hit the scintillation detector. In the same way a prototype detector is being calibrated to install it at the points studied.

Introduction

The GV with a height of 4276 m a.s.l., located in San Juan de Pasto city with an estimated age of 4 500 years, is one of the highest activity in Colombia with important records of eruptions in the past. The increasing of population in higher risk areas around the volcano has motivated to develop special techniques of monitoring the volcano activity, especially for its records respecting to pyroplastic flux generated. The tomography with muons help us to understand the internal volcano structure and its dynamics present.

Fig 1: Number of muons per m² from protons [6]

Fig 2: Energy spectrum for μ expected from protons [5]

Simulation of the scintillation detector of atmospheric muons in Geant4[2]

In the radiation-matter program Geant4[2], was designed and simulated a scintillation detector of Polyvinyltoluene bars C₆H₁₀, predetermined material in Geant4 [2](Fig. 3). The chosen shape of the bars is based on the experiment MINERvA[7], which allow us to observe how interact the muons when cross the detector, the physical processes involved, the energy that they deposit in it and as their tracks are affected. (Fig. 4).

Fig. 3: Detector simulation process.

Fig. 4: Simulation of muon interactions with a scintillation detector

GV Geometry in Geant4[2]

For the implementation of the GV in Geant4[2] We used different softwares, in order to include the coordinates of the level curves provided by the Colombian geological service[5], and build the solid volcanic complex which was exported to a GDML format[9] that can be read by Geant4[2]. The simulation of the geometry of the GV (Fig. 5) is composed of standard rock and his crater of air (Tables 1 and 2).

Fig 5: Simulation of GV in Geant4.

Composition	Percent Weight in Earth's Crust
O	46.6
Si	27.7
Al	8.3
Fe, Ca, Na, K, Mg	17.4

Characteristic of simulated volcano	
Crater Diameter	320 m
Height	1100 m
Crater Depth	250 m

Tables: 1 and 2

and get a graph of the characteristic peaks of gamma radiation. (Fig. 7)

Fig. 8: Convenient points to the disposition of muon detector[8].

Fig. 9: Location on which the simulation is performed[8].

The two geometries (GV and the detector with its characteristics), are implemented in the Geant4 simulation. The location of detector is an aspect of great importance when applying muonography on geological bodies, because the distance that muons cross through the structure, depends of the topography of the place and the location of the area of interest. The best location points are indicated on the map (Fig. 8)

Fig. 10: The characteristic peaks of gamma radiation.

Fig. 11: Prototype detector.

To place the location point at the simulation (Fig 9) We transformed the geographical coordinates of the volcano and the detector to Cartesian coordinates (X,Y,Z). After a translation was made to the origin of the coordinate system in Geant4.

Simulation's results in Geant4 and Prototype detector calibration

We used ROOT[10] for the analysis of data obtained of the simulation. We simulated 2000 events of interactions of C₆₀ source with the scintillation detector. In Fig 10 you can see the decays of the C₆₀ source and in the figure Fig. 11 can be observed the prototype detector to be calibrated and used in the preliminary measurement of the flow of muons at the points measured.

Fig. 12: Muon crossin volcanic cone and the scintillation detector

Fig. 13: Muon flux which arrived to the test detector.

We are working with an extraordinary geometry and many events of interaction, so that the GV simulation has been scaled to units of "mm". To observe the location point of the scintillation detector in the graphical interface, the simulation has been performed with a considerable size detector. The results can be seen in Fig. 12 and Fig. 13.

Conclusions

- Next step we will calculate the atmospheric profile for Pasto city
- We will develop a real size simulation
- We will do a preliminary measurement of muon flux with the prototype detector in the three locations.

References

- [1] D. HECK ET AL, CORSIKA: A MONTE CARLO CODE TO SIMULATE EXTENSIVE AIR SHOWERS, CORSIKA 7.4004.
- [2] GEANT4 DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS, J. ALLISON ET AL, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE 53 No. 1, (2006) 270-278.
- [3] TANAKA, H. K. M. ET AL, RADIOGRAPHIC VISUALIZATION OF MAGMA DYNAMICS IN AN ERUPTING VOLCANO, NAT. COMMUN. 5:3381 doi: 10.1038/ncomms4381 (2014).
- [4] S. OSTAPCHENKO, QGSJET-II, PRD 83 (2011) 014018.
- [5] H.C. FESEFELDT, GHEISHA PROGRAM, TECHNICAL REPORT PITHA 85-02 (1985).
- [6] 38 TH ICHEP POSTER CONTRIBUTION. <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/>.
- [7] DESIGN, CALIBRATION, AND PERFORMANCE OF THE MINERvA DETECTOR <https://arxiv.org/pdf/1305.5199.pdf>
- [8] SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO, OBSERVATORIO VULCANOL3GICO Y SISMOL3GICO PASTO, <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/VOLCANES/VOLCAN GALERAS/GENERALIDADES.ASPX>
- [9] <https://lccapp.cern.ch/PROJECT/SMT/FRAMEWORK/GDML/DOC/GDMLMANUAL.PDF>
- [10] ROOT DATA ANALYSIS FRAMEWORK. <https://root.cern.ch/guides/users-guide>



First Monte Carlo simulation study of Galeras volcano structure using muon tomography

A. Tapia^a, D. Dueñas^b, J. Rodriguez^b, J. Betancourt^b and D.A. Martínez Caicedo^c

^a*Departamento de Ciencias Básicas, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.*

^b*Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.*

^c*IIT Center for Accelerator and Particle Physics, Illinois Institute of Technology, Chicago-IL (USA).*

E-mail: atapia@udem.edu.co, dafra90@gmail.com,
jairo3584@gmail.com, dmarti36@iit.edu

Muon radiography is based on the observation of the absorption of muons in matter, as the ordinary radiography does by using X-rays. The interaction of cosmic rays with the atmosphere produce Extensive Air Showers (EAS), which provide abundant source of muons. These particles can be used for various applications of muon radiography, in particular to study the internal structure of different volcanoes edifice. We will focus on Galeras volcano located 9 km from Pasto city (Colombia).

In this work we present the first study of the muon lateral distribution at Pasto altitude (4276 m a.s.l.) and a preliminary simulation the volcanic cone using GEANT4[1]. For the interaction of the cosmic rays with the atmosphere we have used CORSIKA 74004[2] software with an atmosphere tropical model and QGSJETII-04[3] as hadronic model for the high energies and GHEISHA2002d[4] for low energies. The analysis considers two different primary particle (proton and iron), four zenith angles (0°, 30°, 45° and 60°) with energies values of 5, 10 and 100 TeV.

*38th International Conference on High Energy Physics
3-10 August 2016
Chicago, USA*

*Speaker.

1. Introduction

The Galeras Volcano with a height of 4276 m.a.s.l., located in Pasto city (Colombia) with an estimated age of 4.500 years, is one with the highest activity in Colombia with important records of eruptions in the past. The increasing of population in higher risk areas around the volcano has motivated to develop special techniques of monitoring the volcano activity, especially for its records respecting to pyroplastic flux generated in previous volcano eruption. The tomography with atmospheric muons help us to understand the internal volcano structure and its magma dynamics. EAS simulation using CORSIKA software has been implemented to obtain the lateral distribution of atmospheric muons (MLDF) and their energy spectrum when they arrive at the altitude of Pasto city. Furthermore, a preliminary simulation of the interaction of these muons with Galeras volcano has been done using GEANT4[1]. The geometric shape of Galeras volcano was performed with SOLiDWORKS (SW) software and implemented for GDML in FASTRAD.

2. Methodology

The EAS were simulated with four different zenith angles: $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and 60° ; two types of primary particles (proton and Fe) with energies of 5, 10, 100 TeV; QGSJET-II-04[3] as the hadronic interaction model for high energies and GHEISHA2002d[4] for low energies. We have used the CORSIKA's tropical atmospheric model and Pasto city magnetic field components Bx and Bz were generated with the NOAA geomagnetic calculator[6].

The GEANT4 toolkit was used to simulate the interaction of muons within volcano and its crater. The geometry has been constructed using SW and converted to GDML files. As input in SW contours provided by the volcano observatory "Servicio Geológico Colombiano (SGC)" were used[7]. The volcano chemical composition had the following percentage: O (46.6%), Si (27,7%), Al (8.3%) and Fe, Ca, Na, K, Mg (17.4%). The volcano geometry was defined using a crater diameter of 320 m, depth of 250 m and a height of 1100 m.

3. Results

Using CORSIKA were simulated 200 EAS for two type of primary particles (Proton and Fe) and angles and energies previously described. For proton as primary particle in figure 1 are shown the MLDF (left) and the number of muons arriving to the altitude of Pasto city (~ 2600 m) in function of energy (right).

The MLDF obtained from simulation behaves according Nishimura-Kamata-Greisen equation[8] for the KASCADE-Grande[9] detectors array:

$$\rho_\mu = N_\mu \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{r}{10r_0}\right)^2\right)^{-\gamma}, \quad (3.1)$$

where N_μ , r_0 , α , β , and γ are fit parameters. These parameters r_0 , α , and γ were fixed in 320m, 0.75 and 3 respectively[11]. In this analysis the fitted parameters are β and the scaling factor N_μ of the distributions. The values of the N_μ and β fit parameters are presented in Table 1 for Proton as

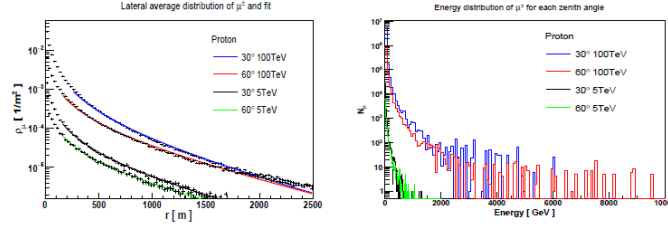


Figure 1: Number of muons per m^2 (left) and energy spectra of muons expected in surface (right) for proton as primary particle. Fe results are similar and could be found at Ref. [10].

primary particle, different zenith angles and primary energy. For Fe case the fit parameters follow the same tendency.

Proton									
		N_μ		β		N_μ		β	
5TeV	0°	0.00014	1.5	10TeV	0.00025	1.5	100TeV	0.0029	2.0
	30°	0.00014	1.4		0.00021	1.4		0.0023	1.9
	45°	0.000097	1.3		0.00015	1.3		0.0015	1.6
	60°	0.000063	1.2		0.00010	1.1		0.00074	1.3

Table 1: Parameters obtained from fitting the number of muons per square meter as a function of core distance using equation 3.1.

3.1 Preliminar results of volcano simulation using GEANT4

In GEANT4 besides the volcano geometry simulation implementation as shown in figure 2 (top-right), we have simulated 1000 muons with energy of 1 TeV passing through the volcano crater. We made a study giving to the crater two types of composition: standard rock and air. Results from this study are shown in figure 2 (bottom).

As a first approach we send the particles through the volcano geometry in an scaled 1:1000. This scaling was done due a simulation at real scale will need an increasing computational power. We are in the process to obtain acces to a cluster and scale the simulation to the real dimensions of the volcano.

4. Conclusions

We have estimated for the first time the MLD at the Pasto city altitude with different zenith angles and energy of the primary particles of the EAS.

We have developed the first steps through a complete simulation of the Galeras volcano geometry, and volcano composition using GDML files as input into GEANT4.

Future steps include calculate the atmospheric profile for Pasto city using stored data in the Global Data Assimilation System (GDAS) platform. Furthermore we are planning to improve the

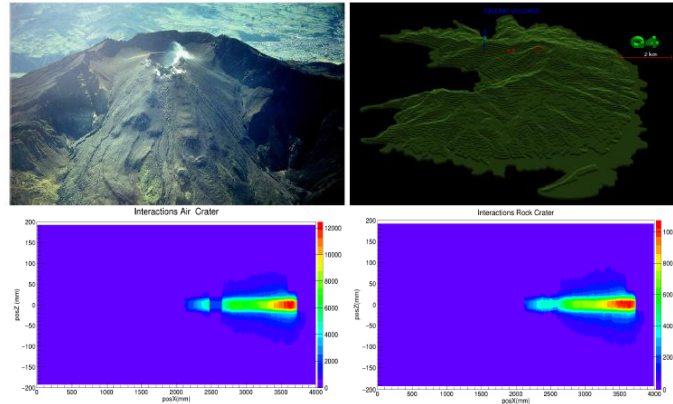


Figure 2: Real picture (*top left*) and GEANT4 simulation of the Galeras volcano (*top right*). Interaction of 1000 muons with the volcano crater (*bottom*). Muons of 1 TeV and two types of crater composition were taken into consideration: air (*bottom-left*) and standard rock (*bottom-right*).

simulation of Galeras volcano composition and increase the number of muons interaction in the volcano using GEANT4 and the real dimensions of it accessing to a cluster. Finally we are in our first steps developing simulations of the particle detectors using plastic scintillator bars and SiPM as one of the future candidates for readout of the particle detector to be constructed once all the simulations are complete.

References

- [1] J. Allison et al, *IEEE Transactions on Nuclear Science* **53** No. **1** (2006) 270-278 and S. Agostinelli et al, *Nuclear Instruments and Methods A* **506** (2003) 250-303.
- [2] D. Heck et al, *CORSIKA* Vol. **6019** FZKA (1998).
- [3] S. Ostapchenko, *Physical Review D* **83** (2011) 014018.
- [4] H.C. Fesefeldt, *Technical Report PITHA* (1985) 85-02.
- [5] H. K. M. Tanaka et al, *Nat. Commun.* **5:3381** (2014).
- [6] NOAA National Centers for Environmental Information, <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>.
- [7] Servicio Geológico Colombiano, *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto*, <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Generalidades.aspx>.
- [8] K. Kamata, J. Nishimura, *Prog. Theoret. Phys. Suppl.* **6** (1958) 93 and K. Greisen, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **10** (1960) 63.
- [9] KASCADE-Grande Collab, in proceedings of *29th ICRC* **6** (2005) 301.
- [10] *38th ICHEP* poster contribution, <https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/1071873/>.
- [11] A. Tapia et al, *AAA Workshop* **7** (2015) 237-240 [[astro-ph.HE/1501.02217](https://arxiv.org/abs/1501.02217)].

Anexo 9: VIII Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía. (Ponencia oral), 8-11 de Noviembre de 2016, Pasto, Nariño, Colombia.

“Una Aproximación a la Caracterización Preliminar del Flujo de Muones en los Alrededores del Volcán Galeras”



8 Congreso Nacional de Enseñanza de Física y la Astronomía



La Universidad de Nariño

Certifica que:

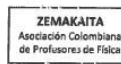
Jaime Betancourt

Participó en el VIII Congreso Nacional de Enseñanza de la Física y la Astronomía en calidad de Ponente

San Juan de Pasto, 8-11 de Noviembre de 2016

Rosa Lidia Casapigna
Rosa Lidia Casapigna
Presidenta de la Asociación Colombiana de profesores de Física

Luis E. Borrillo Salazar
Luis E. Borrillo Salazar
Coordinador del octavo congreso Nacional de enseñanza de la Física y Astronomía



Caracterización Preliminar del Flujo de Muones en los Alrededores del Volcán Galeras.

J. Betancourt, J. Estrada, R. Llerena y O. Riascos



8 CONGRESO NACIONAL DE ENSEÑANZA DE FÍSICA Y ASTRONOMÍA

Grupos Metanoia - AUNAR y Geofísica - UDENAR



Anexo 10: "Introducción al ROOT y Geant4: Software para Análisis de Datos y Simulación", VIII Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas, Realizado en la Universidad de Medellín los días 4, 5, y 6 de mayo del 2016 (Ponencia oral), David Francisco Dueñas y Jairo Rodríguez.



The certificate features a stylized human figure on the left holding a circular graphic with mathematical symbols (+, -, 5, X, %). The background is a light blue geometric pattern. At the top center is the Universidad de Medellín logo and name. The text is centered and includes the recipient's name, role, and a detailed description of the presentation.


UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

CERTIFICA QUE:

David Francisco Dueñas Tonguino
Asistió en calidad de
Tallerista

Con su presentación: "INTRODUCCIÓN A ROOT Y GEANT4: SOFTWARE PARA ANÁLISIS DE DATOS Y SIMULACIÓN" con una intensidad de tres horas, dictado en el marco del VIII Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas, realizado en la Universidad de Medellín los días 4, 5 y 6 de mayo de 2016.


LUZ DORIS BOLÍVAR YEPES
Vicerrectora Académica


JOSÉ ALBERTO RÚA VÁSQUEZ
Jefe Departamento de Ciencias Básicas



This certificate is identical in layout and content to the one above, but the recipient's name is Jairo Hernán Rodríguez. It features the same stylized figure, logo, and text structure.


UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

CERTIFICA QUE:

Jairo Hernán Rodríguez
Asistió en calidad de
Tallerista

Con su presentación: "INTRODUCCIÓN A ROOT Y GEANT4: SOFTWARE PARA ANÁLISIS DE DATOS Y SIMULACIÓN" con una intensidad de tres horas, dictado en el marco del VIII Congreso Internacional de Formación y Modelación en Ciencias Básicas, realizado en la Universidad de Medellín los días 4, 5 y 6 de mayo de 2016.


LUZ DORIS BOLÍVAR YEPES
Vicerrectora Académica


JOSÉ ALBERTO RÚA VÁSQUEZ
Jefe Departamento de Ciencias Básicas



Anexo 11: Estudiante que trabajo en nuestro grupo fue aceptado como estudiantes de Doctorado en la Universidad de Cincinnati, Agosto del 2017.



THE GRADUATE SCHOOL

Graduate School

University of Cincinnati
PO BOX 210627
Cincinnati, OH 45221-0627

Phone (513) 556-4335 
Fax (513) 556-0128 
Email grad.info@uc.edu
Web grad.uc.edu

Dear David Dueñas,

Congratulations! It is my pleasure to inform you that you have been admitted into the Physics, Doctor of Philosophy program in the McMicken College of Arts & Sciences for Fall 2017.

In order to accept or decline admission, you will need to complete the confirmation form now available on your status page.