



ACUERDO N° 048
(Agosto 24 de 2016)

EL COMITÉ CURRICULAR Y DE INVESTIGACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE FÍSICA
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

En ejercicio de sus atribuciones legales, reglamentarias y estatutarias, y

CONSIDERANDO:

- Que el docente tiempo completo Jaime Alfredo Betancourt Miganquer adscrito al Programa de Física, solicitó al Comité Curricular y de Investigaciones el aval para registrar el proyecto de investigación "Caracterización preliminar del flujo en los alrededores del Volcán Galeras utilizando un detector prototipo opto electrónico tipo Centello" en la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Nariño.
- Que este proyecto es una gran oportunidad para la proyección internacional del Grupo de Geofísica, al cual pertenece el docente Jaime Alfredo Betancourt Miganquer.
- Que la política del Departamento de Física es respaldar los procesos de investigación en correspondencia con su parte misional y en virtud de que contribuyen a elevar la calidad del Programa de Física.
- Que el Comité Curricular y de Investigaciones del Departamento de Física aprueba el proyecto de investigación y,

ACUERDA:

PRIMERO: Avalar la solicitud de registro del proyecto "Caracterización preliminar del flujo en los alrededores del Volcán Galeras utilizando un detector prototipo opto electrónico tipo Centello" presentado por el docente Jaime Alfredo Betancourt Miganquer en el Sistema de Investigaciones.

SEGUNDO: Aprobar el proyecto de investigación "Caracterización preliminar del flujo en los alrededores del Volcán Galeras utilizando un detector prototipo opto electrónico tipo Centello" a cargo del docente Jaime Alfredo Betancourt Miganquer, a partir del Semestre B de 2016 con una descarga de tres (3) horas una vez se cuente con el Acuerdo de inscripción emitido por la VIPRI.

TERCERO: La Vicerrectoría de Investigaciones, Postgrados y Relaciones Internacionales y el Departamento de Física anotarán lo de su cargo.

CUARTO: El proyecto tendrá una duración de un (1) año contados a partir del semestre B de 2016 y hasta el semestre B de 2017.

COMUNIQUESE Y CUMPLASE:

Dado en San Juan de Pasto, a los veinticuatro (24) días del mes de agosto de dos mil dieciséis (2016).


ALVARO RUGELES PEREZ

Presidente
Comité Curricular y de Investigaciones
Departamento de Física



2. TÍTULO DEL PROYECTO:

CARACTERIZACION PRELIMINAR DEL FLUJO DE MUONES EN LOS ALREDEDORES DEL VOLCAN GALERAS UTILIZANDO UN DETECTOR PROTOTIPO OPTOELECTRONICO TIPO CENTELLO.

3. **RESUMEN DEL PROYECTO:** 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 optoelectrónico 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.

4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:

- 4.1. **Planteamiento de la pregunta o problema de investigación y su contexto:** ¿De acuerdo a los estudios relacionados con las lluvias atmosféricas extendidas de partículas de alta energía, en qué medida es posible con el detector prototipo optoelectronico tipo centelleo, caracterizar la distribución lateral de muones en los alrededores del Volcán Galeras (VG)?

- 4.2. **Justificación en términos de necesidades y pertinencia:** A pesar del monitoreo durante décadas de la actividad volcánica, de los avances recientes en el conocimiento de los volcanes, de acuerdo a los acontecimientos relacionados a erupciones, todavía no se tiene una imagen clara de la estructura interna de volcanes activos. Por tanto, la tomografía de muones puede aportar al conocimiento de la estructura interna del VG y mejorar las ideas respecto a la dinámica de los magmas y los mecanismos de erupciones. Este proyecto tiene el potencial de arrojar resultados prometedores en las áreas de: conocimiento del entorno, caracterización del flujo y distribución lateral de muones para ser usados en la tomografía volcánica.

Es la primera vez que se intenta esta aproximación al conocimiento del VG, es económica y en principio simple y los resultados aportaran al conocimiento del flujo de muones en la región del Galeras, resultado del proceso experimental en la caracterización. El impacto de este trabajo va más allá de la obtención de resultados estrictamente científicos ya que las conclusiones servirán como insumo para complementar la tomografía del VG.

5. MARCO TEÓRICO, ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES:

5.1. Marco teórico y estado del arte:

5.1.1. 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} 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 austriaco. 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].

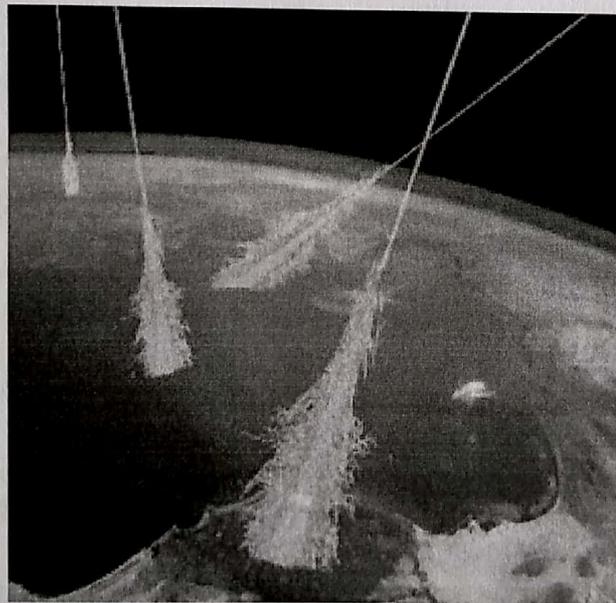


Figura 1 Lluvia de Rayos Cósmicos provenientes del exterior (Fuente CERN). Los rayos cósmicos al penetrar la atmosfera adquieren la forma de una escoba por qué interactúan con las moléculas de la atmosfera produciendo más partículas.

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 atmosfera 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 (que 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 2 MeV 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 2 GeV al pasar por la atmósfera. Con una energía media de muones en la superficie del mar de 4 GeV , 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.

5.1.2. 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 interactúa 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.

5.1.3. 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

5.1.3.1. 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 GeigerMuller 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.

5.1.3.2. 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.

5.1.4. 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 atmósfera). A partir de ese punto, debido al tipo de partículas involucradas en la lluvia, podemos identificar dentro de la cascada tres componentes:

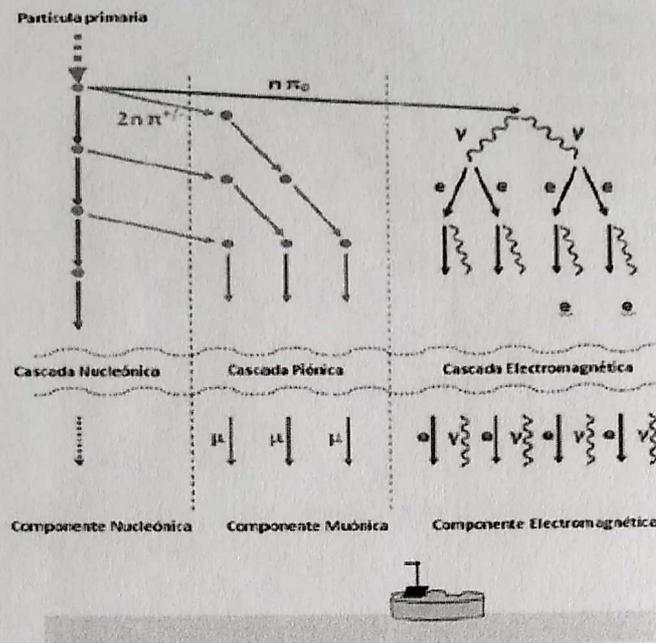
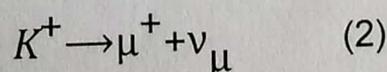
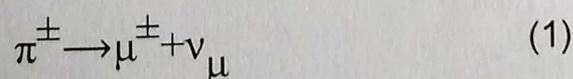


Figura 2 Diagrama esquemático mostrando los procesos principales en las cascadas.

- 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 observará 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 ($(2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8} \text{ s}$ y $1,24 \times 10^{-8} \text{ s}$. [4]), es que comienzan a producirse los decaimientos del tipo (pion decayendo en un muon más un neutrino del tipo muonico y kaon 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, por lo que la mayoría penetra hasta alcanzar el nivel del suelo, estos procesos pueden verse claramente en el diagrama de la Figura 3.

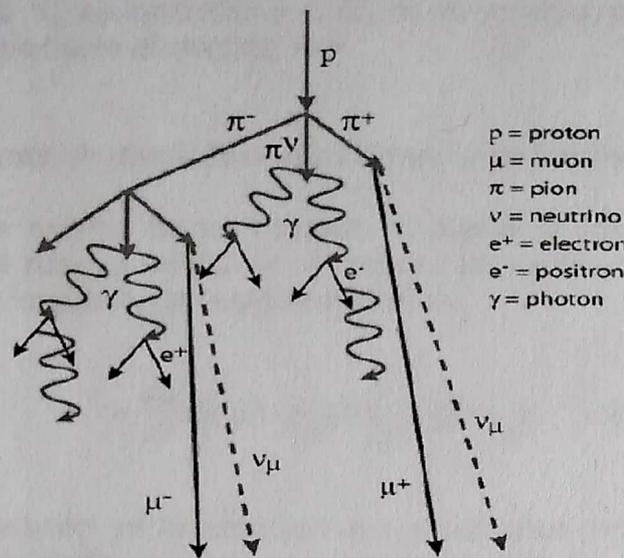


Figura 3 Diagrama esquemático de la formación de muones a partir de un protón [5].

Es importante mencionar también que la cascada muónica (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.

5.1.5. 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:

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

Donde W_μ es la probabilidad supervivencia de un muon. El cociente del momento del muon con el momento del pion (π^\mp) 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.

5.1.6. 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), $b_p(E)E$ producción de pares y $b_n(E)$ 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:

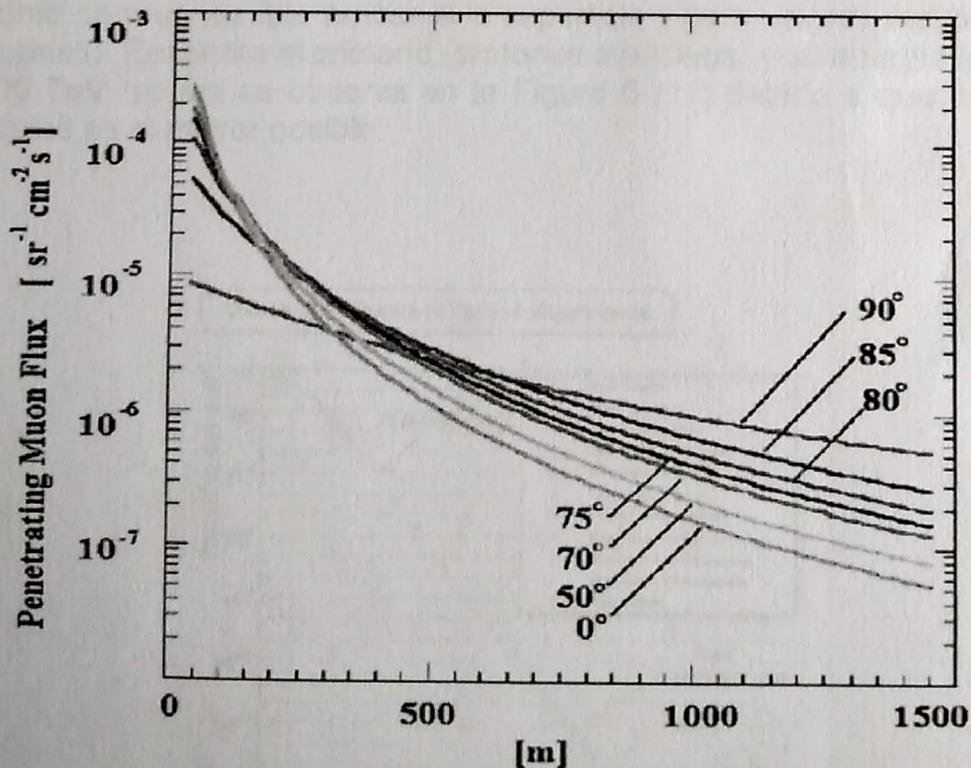


Figura 4 Flujo integrado de muones a varios ángulos (θ) de penetración a través de una roca de densidad 2.5 g/cm^3 [9].

5.1.7. 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.

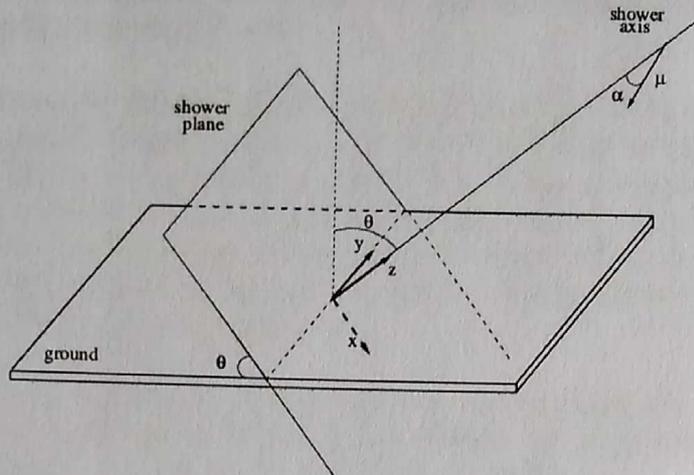
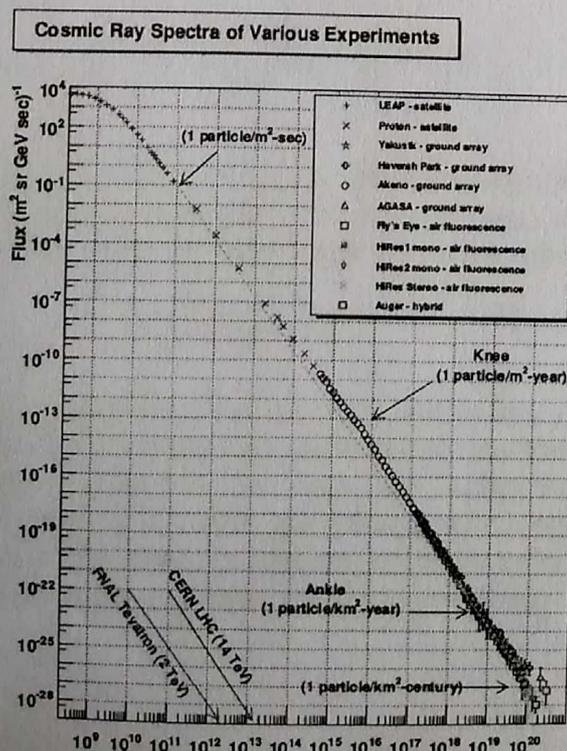


Figura 5 Esquema que muestra el plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), la superficie terrestre y el sistema de coordenadas.

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.



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 está 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.

5.2. Antecedentes

5.2.1. Exploración de sitios arqueológicos por tomografía de muones

En 1969 el físico premio nobel Luis Alvarez desarrollo un método para explorar la parte interior de la pirámide de Giza 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 Alvarez pudo tomar una tomografía similar a la de los rayos X ubicando unos detectores (cámaras de detección, sparkchambers) debajo de la pirámide midiendo el flujo que le llegaba de distintas direcciones (Figura7). 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.

5.2.2. Imágenes de residuos nucleares

Lo que han propuesto recientemente GuzJonkmans 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 (Figura8).

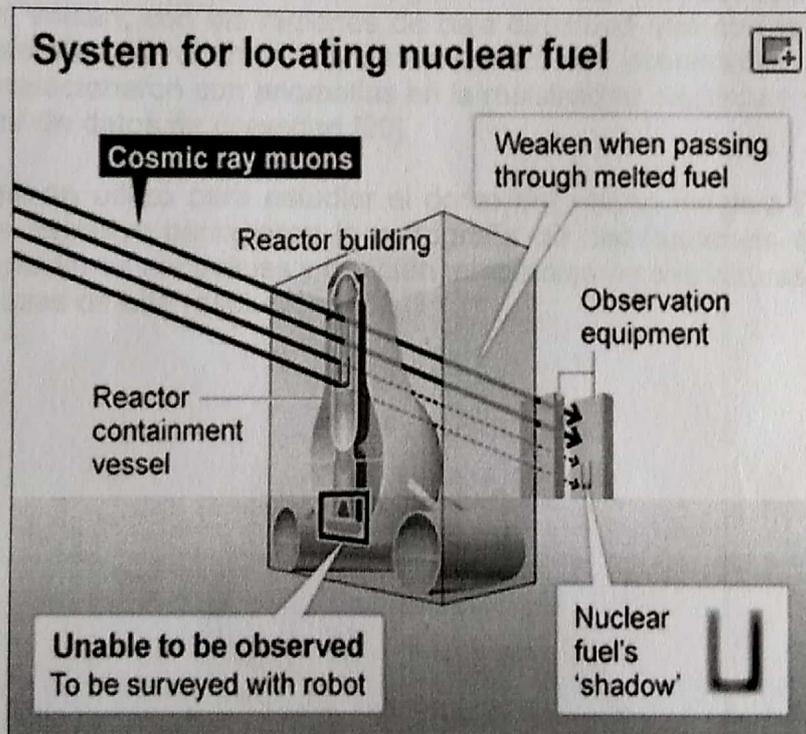


Figura 8 Imagen del interior de la planta nuclear de Fukushima. Fuente: Shimbun(2014).

5.2.3. 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, Tanakay sus colaboradores [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 esta 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].

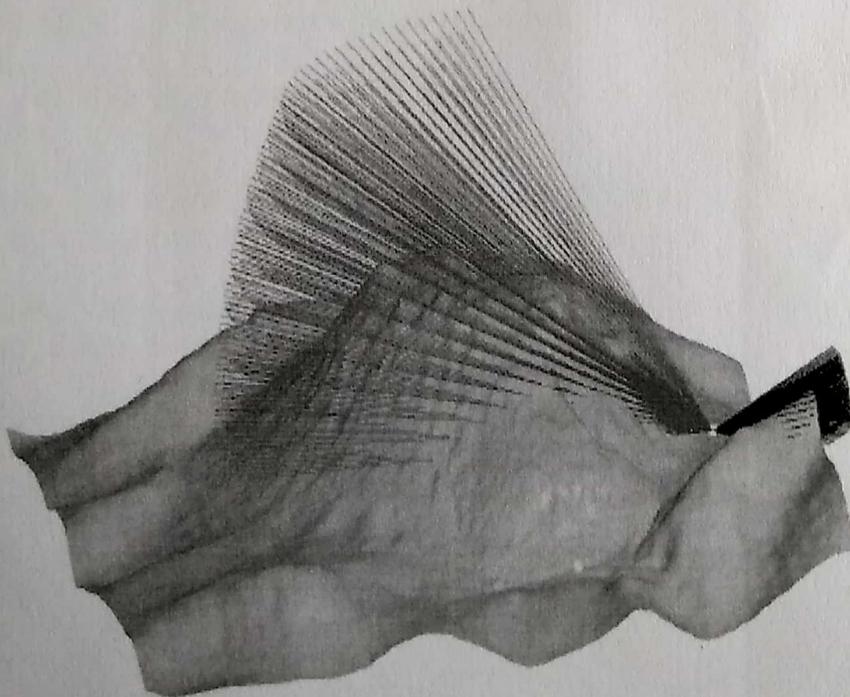


Figura 9 Distribución de rayos cósmicos para el Volcán Soufriere [5].

6. OBJETIVOS

6.1. *Objetivo General*

Caracterizar el flujo de muones en los alrededores del volcán Galeras mediante el uso de un detector prototipo optoelectrónico tipo centelleo, como una medida preliminar.

6.2. *Objetivos Específicos*

- Definir los parámetros de funcionamiento para los diferentes componentes estructurales del detector de muones existente, de tal modo que se pueda aprovechar la capacidad máxima en la medición de las variables asociadas al objeto de estudio.
- Evaluar las condiciones ambientales en puntos geográficos estratégicos, de los alrededores del volcán Galeras, para la eficiente ubicación del detector de muones.
- Analizar y procesar los datos recolectados realizando los ajustes necesarios.

7. METODOLOGÍA PROPUESTA

La investigación será de tipo exploratoria, aplicando un diseño experimental cuyo objetivo es comprobar una hipótesis, en este caso el saber si con el detector prototipo optoelectronico tipo centelleo puede o no caracterizar de forma preliminar el flujo de muones en los alrededores del VG.

Para alcanzar los objetivos propuestos se propone una metodología que consta de 7 fases que se resumen a continuación.

1. Revisión y estudio de información a manera de recopilación bibliografía que incluya:
 - Los rayos cósmicos en la atmósfera
 - Estudio del flujo de muones, dispersión, dependencia con el ángulo cenital etc.
 - Estudio de background (Flujo de electrones, positrones, etc)
 - Técnicas de detección de muones
 - Tipos de detectores de muones
 - Detectores tipo centelleo
 - Caracterización de parámetros de funcionamiento de las componentes del detector prototipo.
 - Aspectos geográficos, ambientales y estructurales del VG.
 - Estudios de tomografía realizados en el VG
 - Estudio de algunos modelos de la distribución lateral de muones(MLD).
 - Métodos de ajustes simultáneos con software especializado (ROOT).
2. Adecuación y puesta a punto del detector prototipo para el aprovechamiento de las capacidades máximas de medición de las variables asociadas con el objeto de estudio.
3. Estudio de las mejores condiciones (sitios de instalación, condiciones ambientales, condiciones logísticas y de seguridad, movilidad de equipo, herramientas y personal) para la instalación del sistema de detección.
4. Recolección de datos del flujo de muones en los puntos geográficos estratégicos del Galeras.
5. Diseño e implementación de un método análisis de datos que permita caracterizar la distribución lateral de muones en forma de histogramas.
6. Determinar el ajuste simultáneo con el software ROOT, para obtener las curvas caracterizadas de la distribución lateral de muones.
7. Escritura del informe final de la investigación, presentando los resultados obtenidos.

8. CRONOGRAMA

8.1. Cronograma General

Actividad	2016	2016	2016
	Agosto-septiembre	Octubre-noviembre	Diciembre-enero
Etapa 1: Definición de los parámetros defuncionamiento para los diferentes componentes estructurales del detector de muones existente, de tal modo que se pueda aprovechar la capacidad máxima en la medición de las variables asociadas al objeto de estudio.			
Etapa 2: Evaluación de las condiciones ambientales en puntos geográficos estratégicos, de los alrededores del volcán galeras, para la eficiente ubicación del detector de muones.			
Etapa 3: Analizar y procesar los datos recolectados realizando los ajustes necesarios al modelo más adecuado para la distribución lateral de muones.			

8.2. Cronograma de las etapa 1

Actividad	Mes 1				Mes 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Revisión y estudio de información a manera de recopilación bibliografía								
Adecuación y puesta a punto del detector prototipo para el aprovechamiento de las capacidades máximas de medición de las variables asociadas con el objeto de estudio.								

8.3. Cronograma de las etapa 2

Actividad	Mes 3				Mes 4				Mes 5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Estudio de las mejores condiciones (sitios de instalación, condiciones ambientales, condiciones logísticas y de seguridad, movilidad de equipo, herramientas y personal) para la instalación del sistema de detección.	■	■	■	■								
Recolección de datos del flujo de muones en los puntos geográficos estratégicos del Galeras					■	■	■	■				
Diseño e implementación de un método análisis de datos que permita caracterizar la distribución lateral de muones en forma de histogramas.									■	■	■	■

8.4. Cronograma de las etapa 3

Actividad	Mes 6				
	1	2	3	4	5
Determinar el ajuste simultáneo con el software ROOT, para obtener las curvas caracterizadas de la distribución lateral de muones.	■	■			
Escritura del informe final de la investigación, presentando los resultados obtenidos.			■	■	■