



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.

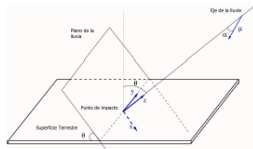


Figura 1: Esquema que muestra el plano de la lluvia (perpendicular al eje de la lluvia), la superficie terrestre y el sistema de coordenadas.

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].

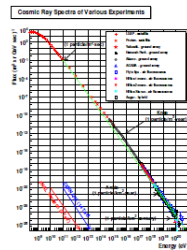


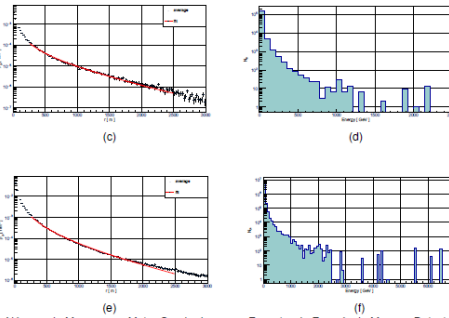
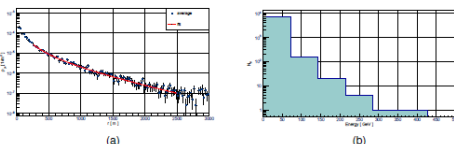
Figura 2: Flujo de partículas en función de la energía

Para la simulación de las EAS, se uso el paquete de interacción hadrónica de altas energías QGS/JEII-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 extrajó 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)).



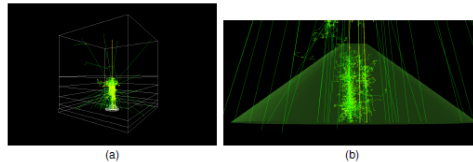
Número de Muones por Metro Cuadrado Provenientes de un Protón a (a) 1 TeV, (c) 10 TeV y (e) 100 TeV. Espectro de Energía de Muones Detectados en la Superficie Provenientes de un Protón a (b) 1 TeV, (d) 10 TeV y (f) 100 TeV.

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. FESFELDT. 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] 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] SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Observatorio Volcanológico 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*