

Estimación de la contribución del *forward scattering* de muones en la señal registrada por el
detector MuTe

Ricardo de León Barrios

Trabajo de Grado para optar al título de Físico

Director

Mauricio Suárez Durán

Doctor en Ciencias Naturales

Codirector

Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez

Doctor en Ciencias Naturales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2022

dedicado

a marco, por subirme a sus hombros para ayudarme a mirar arriba;

a vilma, en quien descubrí la mayor fortaleza humana posible;

a laura, yéssika y ariadna, quienes me enseñaron sobre paciencia, resiliencia y amor;

a néstor y miryan, quienes descubrieron el secreto de una memoria eterna a orillas de un río;

y a mis amigos de casa y caza, bastiones del corazón ante la inexorable decadencia del tiempo.

¡hora de zarpar, exploradores denodados! ¡una isla mágica al borde de un abismo nos aguarda!

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia entera por el amor que son capaces de dar. Innumerales como son, Marco, Vilma, Laura, Yéssika, Ariadna, Néstor, Miryan, Carmen, Mayo, Belkis, Douglas, Brenda, Karina, Yhineska, Maite, Waldir, José, Carolg, Keivin, Nelson, Hillary y Juanes han sido los imprescindibles forjadores de mi historia.

Agradezco a mis amigos por encontrar algo dentro de mí que yo desconocía. Simón, Martín, Panda, Juancho, Moreno, Paola, Hernán, Vega, Quijano, Miguel, Remolina y Jennifer: sigan guiando el camino, yo solo los sigo. Lucho, Santiago y Diego: sigamos explorando mundos desconocidos.

Agradezco a mis compañeros de carrera, quienes conquistaron montañas conmigo a su lado: Daniel, Cristian, Juan, Laura, Steven, Jorge, Lucía, Jhon, Rolando, Jhonatan, Verónica, Kevin y muchos otros de cuyos nombres no logro olvidarme. Sé que avanzaremos más allá del infinito.

Por supuesto, agradezco a la UIS y al grupo Halley por su calor, en especial a mis directores Mauricio y Luis y a Jesús y Adriana. Ustedes presenciaron el nacimiento y crecimiento de este trabajo e iluminaron mi camino en todo momento.

Y gracias a todas las demás personas que en algún instante vivieron mi propia vida tanto como yo, y que por alguna razón no me atrevo a nombrar. Dejaron huellas que aún se pueden leer.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Muografía y detector MuTe	15
1.1. Muografía	15
1.2. Detector MuTe	19
1.3. Fuentes de ruido en muografía	22
2. <i>Muon Forward Scattering</i> y EAS	26
2.1. <i>Forward scattering</i> de muones (MFS)	26
2.2. Rayos cósmicos y EAS	28
2.3. Espectro de secundarios en Cerro Machín	31
2.3.1. Perfiles atmosféricos mediante <i>GDAS</i>	31
2.3.2. Estimación de secundarios a nivel de Cerro Machín	35
2.3.3. Corrección por efectos geomagnéticos	38
3. Estimación del <i>Muon Forward Scattering</i>	51
3.1. Estimación del MFS a través de un modelo computacional	52
3.2. Estimación del MFS como función del momentum	53
3.3. Estimación del MFS para muones en Cerro Machín	59

4. Conclusiones

71

Referencias Bibliográficas

73

Apéndices

79

Lista de Figuras

Figura 1.	Esquemática de distintas aplicaciones posibles para la muografía	17
Figura 2.	Diagrama de la estructura mecánica básica de MuTe y fotografía del detector	20
Figura 3.	Volcanes candidatos para proyecto MuTe y Cerro Machín	21
Figura 4.	Principales fuentes de ruido en muografía	23
Figura 5.	Definición de <i>muon forward scattering</i>	27
Figura 6.	Diagrama de una cascada atmosférica extensa	30
Figura 7.	Perfil de densidad GDAS para julio de 2019	34
Figura 8.	Espectro de secundarios a nivel de Cerro Machín	37
Figura 9.	Espectro de muones a nivel de Cerro Machín	38
Figura 10.	Ejemplo de trayectorias permitidas y prohibidas de rayos cósmicos para diferentes valores de rigidez magnética	42
Figura 11.	Rigidez de corte para el Cerro Machín	44
Figura 12.	Espectro de secundarios en Cerro Machín con corrección por efectos geomagnéticos	45
Figura 13.	Espectro de muones en Cerro Machín con corrección por efectos geomagnéticos	46
Figura 14.	Diferencia porcentual entre el espectro de secundarios con y sin corrección geomagnética	46
Figura 15.	Función de distribución acumulada del momentum de muones atmosféricos	48

Figura 16.	Espectro de muones en Cerro Machín en función del ángulo cenital	50
Figura 17.	Ambiente de Geant4 para simulaciones de MFS	52
Figura 18.	Comparación de trayectorias de muones con y sin dispersión por MFS	54
Figura 19.	Probabilidad de presentar MFS en función del ángulo de incidencia	57
Figura 20.	Probabilidad de presentar MFS en función del momentum inicial	57
Figura 21.	Probabilidad de presentar MFS en función del momentum y ángulo iniciales	58
Figura 22.	Densidad de cuentas de muones atmosféricos en Cerro Machín de hasta 10 GeV/c	60
Figura 23.	Espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín en función del ángulo cenital y momentum	61
Figura 24.	Diagrama con ángulos relevantes para el MFS teniendo en cuenta la elevación del terreno	61
Figura 25.	Espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín con ángulos entre 20,5°-30,5° y 80°-90°	63
Figura 26.	Cantidad de muones atmosféricos a nivel de Cerro Machín que se espera presenten MFS	65
Figura 27.	Ángulo cenital final vs inicial para muones atmosféricos dispersados por MFS	66
Figura 28.	Deflexión en el ángulo cenital de los muones atmosféricos tras dispersarse por MFS, $\Delta\theta$, en función de su momentum	67
Figura 29.	Comparación de la deflexión en el ángulo cenital de los muones con un estudio previo	67

Figura 30. Deflexión en el ángulo acimutal, $\Delta\phi$, de los muones atmosféricos que presentan MFS 69

Figura 31. Extracto del *notebook* Persephone.ipynb para crear perfiles atmosféricos mensuales promedio por GDASTool 81

Figura 32. Extracto del *notebook* The Merovingian.ipynb para crear un archivo MACRO de entrada para MAGNETOCOSMICS 83

Figura 33. Pantallazo de la GUI de Geant4 para el código de LAGO usado para modelar el MFS 84

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Códigos computacionales y repositorio de GitHub	79

Resumen

Título: Estimación de la contribución del *forward scattering* de muones en la señal registrada por el detector MuTe *

Autor: Ricardo de León Barrios **

Palabras Clave: *forward scattering* de muones, MuTe, muografía, rayos cósmicos, cascadas atmosféricas extensas

Descripción: La muografía es una técnica que permite obtener imágenes de la estructura interna de volúmenes de gran tamaño al detectar las variaciones en el flujo de muones que lo atraviesan y reconstruir sus trayectorias. En la Universidad Industrial de Santander se construyó MuTe, un telescopio de muones híbrido que combina la tecnología de un hodoscopio y un detector Cherenkov de agua y cuyo objetivo es estudiar volcanes de Colombia mediante muografía. Sin embargo, un obstáculo potencial en esta aplicación es el *forward scattering* de muones (MFS), un fenómeno en el que muones de bajas energías que no han atravesado el objeto estudiado son dispersados cerca de su superficie y registrados por el detector, en donde su trayectoria se recrea como si hubieran atravesado la estructura. Mediante el uso encadenado de los códigos computacionales de CORSIKA, MAGNETOCOSMICS y Geant4, en este trabajo se estudiaron algunas características distintivas de este fenómeno, tales como la probabilidad de que los muones se dispersen por MFS y su dependencia en el momentum y ángulo de incidencia. Se halló que la probabilidad de presentar MFS aumenta con el ángulo de incidencia de los muones y disminuye con su momentum inicial. También se halló que cerca del 22,7% de los muones que inciden con un ángulo de 85° o mayor respecto de la normal de la superficie y con momentum de $5,5 \text{ GeV}/c$ o menor son dispersados por MFS. Finalmente, se halló que más del 67% de los muones que presentan MFS se desvían 5° o menos en sus ángulos cenital y acimutal. Los resultados de este trabajo son importantes para evaluar el impacto del MFS en la muografía y mitigar su efecto en la operación de MuTe.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Mauricio Suárez Durán, Doctor en Ciencias Naturales. Codirector: Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez, Doctor en Ciencias Naturales.

Abstract

Title: Estimation of the contribution of Muon Forward Scattering to the signal registered by the MuTe detector *

Author: Ricardo de León Barrios **

Keywords: muon forward scattering, MuTe, muography, cosmic rays, extensive air showers

Description: Muography is a technique that allows one to obtain images of the internal structure of large volumes by detecting variations in the flux of muons that cross it and recreating their trajectories. At Universidad Industrial de Santander, the hybrid Muon Telescope (MuTe) was built, which combines the technology of a hodoscope with a water Cherenkov detector and whose goal is to study volcanoes in Colombia through muography. However, a potential obstacle to this application is Muon Forward Scattering (MFS), a phenomenon in which low-energy muons that haven't crossed the studied object are scattered near its surface and registered by the detector, where their trajectory is recreated as if they had gone through the structure. In this work, using the CORSIKA, MAGNETOCOSMICS and Geant4 software packages in conjunction, some distinctive features of this phenomenon were studied, such as the probability of muons being scattered via MFS and its dependency on the momentum and incidence angle. It was found that the probability of presenting MFS increases along with the muons incidence angle and decreases with their initial momentum. It was also found that around 22.7% of muons that have an incidence angle of 85° or greater with respect to the surface's normal vector and momentum of 5.5 GeV/c or less are scattered via MFS. Finally, it was found that more than 67% of muons that present MFS are deflected by 5° or less on their zenith and azimuth angles. The results of this work are important for evaluating the impact of MFS on muography and for mitigating its effect on the operation of MuTe.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Mauricio Suárez Durán, Doctor en Ciencias Naturales. Codirector: Luis Alberto Núñez de Villavicencio Martínez, Doctor en Ciencias Naturales.

Introducción

La muografía es una técnica que permite obtener imágenes de la distribución de densidad de materia al interior de una estructura al medir, con un detector, el flujo de muones que la atraviesan. El número de muones que registra el detector varía en función de la cantidad de materia que los muones han atravesado en su recorrido, de forma que este sirve como indicador de la densidad de materia al interior de una estructura (Kaiser, 2019).

La técnica de muografía es una herramienta que resulta útil para el estudio de las estructuras internas de edificios geológicos, como los volcanes. Debido al riesgo que los edificios volcánicos pueden presentar para ciertas poblaciones, la muografía ha despertado el interés de la comunidad científica como una posible forma de monitorear su actividad (Kaiser, 2019). En el contexto de la muografía volcánica en Colombia, el detector MuTe¹ nace a partir de la experiencia acumulada de los investigadores de los grupos Halley y GIRG en el observatorio LAGO. El detector MuTe es un telescopio de muones híbrido, combinando la funcionalidad de un hodoscopio con la de un detector Cherenkov de agua (con el propósito de estudiar al volcán Cerro Machín, en el departamento de Tolima (Peña-Rodríguez y col., 2020; Vesga-Ramírez, 2018)).

La técnica de muografía es susceptible a distintas fuentes de ruido que pueden afectar la señal registrada por el detector. Una de estas fuentes de ruido es el *forward scattering* de muones, o MFS (por sus siglas en inglés, *muon forward scattering*). Éstos son muones que inciden sobre

¹ **Muon Telescope**, <https://halley.uis.edu.co/fuego/en/>

la superficie de la estructura estudiada y son dispersados en dirección al detector, en donde su trayectoria se reconstruye, erróneamente, como si hubieran atravesado la estructura (Gómez y col., 2017). La pregunta de investigación que buscamos responder fue: ¿Cuál es la contribución del MFS a la señal registrada por el detector MuTe? Para esto, hemos hecho uso de una cadena de simulaciones Monte Carlo en la que incluimos los códigos de CORSIKA, MAGNETOCOSMICS y Geant4².

El presente libro está estructurado de la siguiente forma:

- El capítulo 1 es una presentación de algunos de los conceptos teóricos más relevantes. Explicamos de forma general la técnica de la muografía, el detector MuTe, su funcionamiento y su implementación, y exponemos las principales fuentes de ruido que afectan a la muografía.
- En el capítulo 2 definimos el fenómeno del *muon forward scattering*. Asimismo, explicamos el fenómeno de las cascadas atmosféricas extensas (los eventos en donde son producidos los muones atmosféricos) y mostramos el proceso para estimar el espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín mediante el uso enlazado de los códigos computacionales CORSIKA y MAGNETOCOSMICS.
- En el capítulo 3 mostramos el proceso que seguimos para estudiar el MFS en roca estándar y los resultados centrales de nuestro trabajo. Aquí estimamos los parámetros físicos que

² En el capítulo 2 explicamos qué son los códigos de CORSIKA y MAGNETOCOSMICS y por qué hemos decidido usarlos. Similarmente, en el capítulo 3 explicamos el funcionamiento de Geant4 y la razón de su implementación en nuestro trabajo.

afectan la probabilidad de que ocurra MFS así como el porcentaje de muones atmosféricos que presentan MFS.

- En el capítulo 4 exponemos las conclusiones más relevantes de nuestro trabajo.
- Finalmente, en el apéndice 1 hablamos brevemente sobre la cadena de códigos computacionales que diseñamos para este trabajo. Los códigos los hemos publicado en un repositorio de GitHub, disponibles para cualquier usuario que requiera hacer uso de ellos.

1. Muografía y detector MuTe

1.1. Muografía

La muografía es una técnica que permite la estimación de la distribución de densidad de materia al interior de estructuras al registrar los muones que la atraviesan. Se han realizado importantes avances en esta tecnología en las últimas dos décadas y se han desarrollado aplicaciones tanto comerciales como académicas. Las aplicaciones más relevantes de la muografía se pueden ver en la esquemática de la figura 1. Estas incluyen los campos de la geociencia, seguridad nuclear, ingeniería civil y arqueología (Kaiser, 2019).

El principio en el que se basa la muografía es análogo al de las radiografías con rayos X en la medicina: un haz incidente de rayos X es atenuado en distintas medidas por las diferentes estructuras internas del cuerpo, permitiendo crear una imagen 2D (McKetty, 1998). En el caso de la muografía, las variaciones del flujo de muones emergentes (es decir, las variaciones en el número registrado de muones que atraviesan la estructura por distintas regiones) sirven como indicador de la densidad de materia de la estructura. Los muones tienen menos probabilidad de interactuar / ser absorbidos en materia de baja densidad que en materia de alta densidad, por lo que el número de muones que atraviesan estas regiones de baja densidad de materia es mayor comparado al de regiones de más alta densidad. La imagen primordial en 2D que crea un detector en muografía es llamada muograma, y esta es una matriz que muestra el número de muones registrados por el detector que han atravesado la estructura estudiada. Debido a esto, es muy frecuente el uso del término *radiografía de muones*, especialmente para referirse a la creación de imágenes 2D del interior

de una estructura (Kaiser, 2019); por otro lado, para la creación de imágenes tridimensionales se prefiere el término *tomografía de muones* (Kaiser, 2019). La muografía hace uso de un suministro inagotable de muones atmosféricos que, como explicamos en el siguiente capítulo, son creados en eventos llamados cascadas aéreas extensas como resultado del constante bombardeo de rayos cósmicos al que está sujeto la Tierra (Kaiser, 2019).

Una de las aplicaciones más importantes de la muografía, y la que concierne a nuestro trabajo, es el estudio de estructuras volcánicas. Los volcanes son puntos en la superficie de la Tierra por donde se puede presentar la salida de material magmático. La formación y erupción de un volcán responde a un largo proceso geológico de miles a millones de años (Vesga-Ramírez, 2018). Los volcanes activos presentan importantes riesgos para las poblaciones cercanas, entre los que se encuentran la expulsión de lava, los flujos piroclásticos, los corrimientos de tierra, la expulsión de gases volcánicos (dióxido de azufre, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, etc.) entre otros. Estos eventos pueden destruir edificios e infraestructura, y poner en riesgo la salud de la población (Blong, 1984).

Entre los trabajos que han puesto a prueba la utilidad de la muografía como herramienta para el estudio de estructuras geológicas está el presentado en la referencia (D'Alessandro y col., 2019), cuyos autores han lanzado la iniciativa MURAVES, la cual consiste en la aplicación de una serie de hodoscopios para la detección de muones en el Monte Vesuvio, en Italia. Otro ejemplo lo observamos en la referencia (Oláh y col., 2019), donde los autores estudian la posibilidad de implementar muografía para monitorear la estructura interna del Monte Sakurajima, en Japón, y realizan múltiples simulaciones computacionales para observar el efecto de la dispersión angular

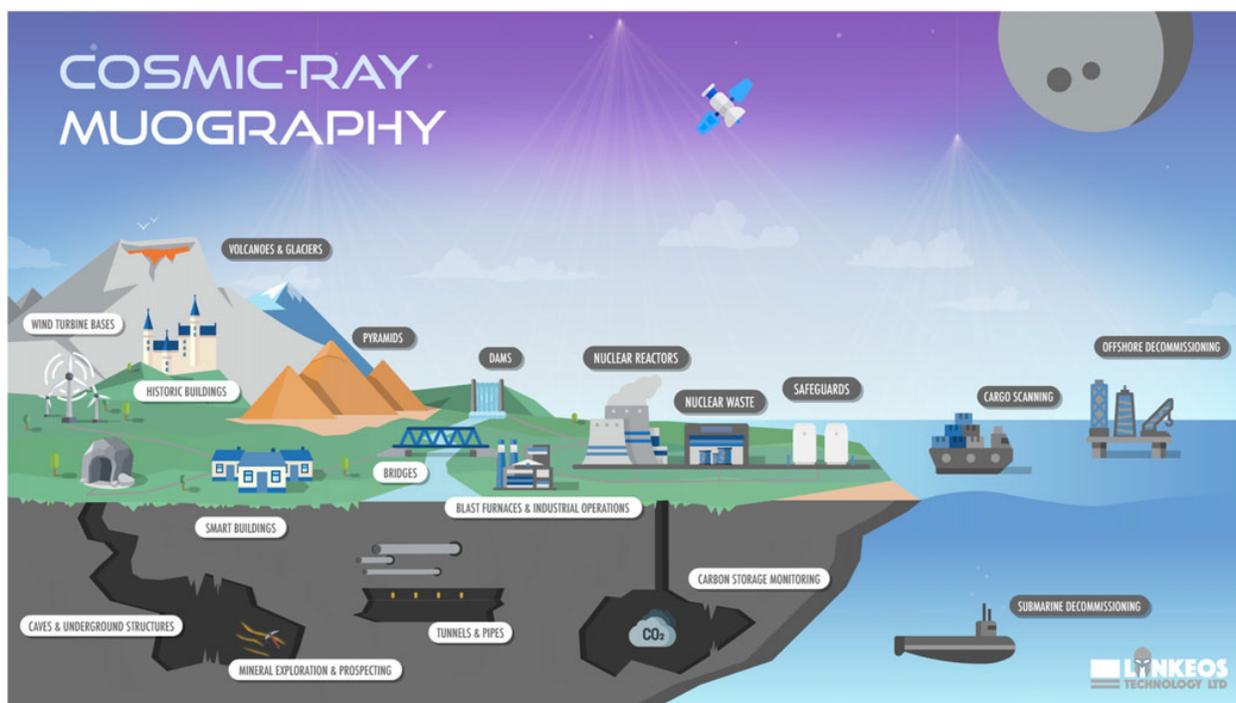


Figura 1. Esquemática que muestra distintas aplicaciones posibles para la muografía. Entre ellas, vemos el estudio de estructuras volcánicas, glaciares y cuevas. También se ha aplicado en arqueología, para el estudio del interior de pirámides. En el campo de la ingeniería civil, se puede aplicar para el análisis de estructuras como puentes, diques y líneas de tuberías subterráneas, mientras que en el ámbito de la seguridad nuclear, se puede aplicar para el monitoreo de reactores nucleares y de desechos radiactivos (Kaiser, 2019).

de muones en la creación de imágenes. Por su parte, la referencia (Tanaka, 2019) es una revisión de estudios observacionales en los que se ha usado muografía para explorar el interior de distintos tipos de volcanes en Japón.

El objeto que se desee estudiar mediante muografía presentará una opacidad ante el paso de muones, que es función de la trayectoria que sigue el muon que atraviesa la roca, L , y está relacionada con la densidad del objeto mediante la siguiente ecuación:

$$\varrho(L) \equiv \int_L \rho(\xi) d\xi. \quad (1)$$

En esta ecuación $\rho(\xi)$ es la densidad del objeto y ξ es la coordenada a lo largo de la trayectoria L del muon atravesando la roca; ϱ se expresa en $g \cdot cm^{-2}$. Esta opacidad se puede definir como la resistencia que el material presenta al paso de los muones. La opacidad se puede deducir a partir de la comparación del flujo de muones que atraviesan la estructura y son registrados en un detector, con el flujo de muones en condiciones de cielo abierto (Lesparre y col., 2010). La distancia que un muon puede atravesar en la materia antes de ser absorbido varía según la energía del muon incidente (mientras mayor sea la energía del muon, mayor es la distancia que pueden avanzar) y también varía según el material que esté atravesando.

1.2. Detector MuTe

El detector MuTe es un proyecto nacido en la UIS a partir de la experiencia acumulada de los investigadores de los grupos Halley³ y GIRG⁴ en el observatorio LAGO⁵. El objetivo del proyecto es el diseño e implementación de un telescopio de muones para el estudio de volcanes en Colombia, a través de la técnica de muografía. El telescopio combina la tecnología de un hodoscopio y un detector Cherenkov de agua (WCD), por lo que es denominado *detector híbrido* (Peña-Rodríguez y col., 2020).

La figura 2 muestra la estructura mecánica básica de MuTe. El hodoscopio, ubicado en la parte frontal del telescopio, consiste de dos paneles, cada uno con un arreglo de 60 barras centelleantes (30 horizontales y 30 verticales), con un total de 900 píxeles de 16 cm² de área activa cada uno. Los dos paneles están separados por una distancia modificable, que alcanza un máximo de 250 cm. El uso del hodoscopio permite reconstruir la trayectoria de partículas cargadas que inciden sobre los dos paneles (Peña-Rodríguez y col., 2019; Peña-Rodríguez y col., 2020).

La otra parte del telescopio híbrido es un detector Cherenkov de agua. Este es un tanque cúbico de 1,2 m de lado, construido en acero inoxidable y que se llena con agua. Su funcionamiento se basa en el fenómeno de la radiación de Cherenkov, así llamada por el físico soviético Pável

³ Grupo Halley de Astronomía y Ciencias Aeroespaciales, <https://halley.uis.edu.co/>

⁴ Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación, <https://halley.uis.edu.co/GIRG/>

⁵ Latin American Giant Observatory, http://wiki.lagoproject.net/index.php/Main_Page

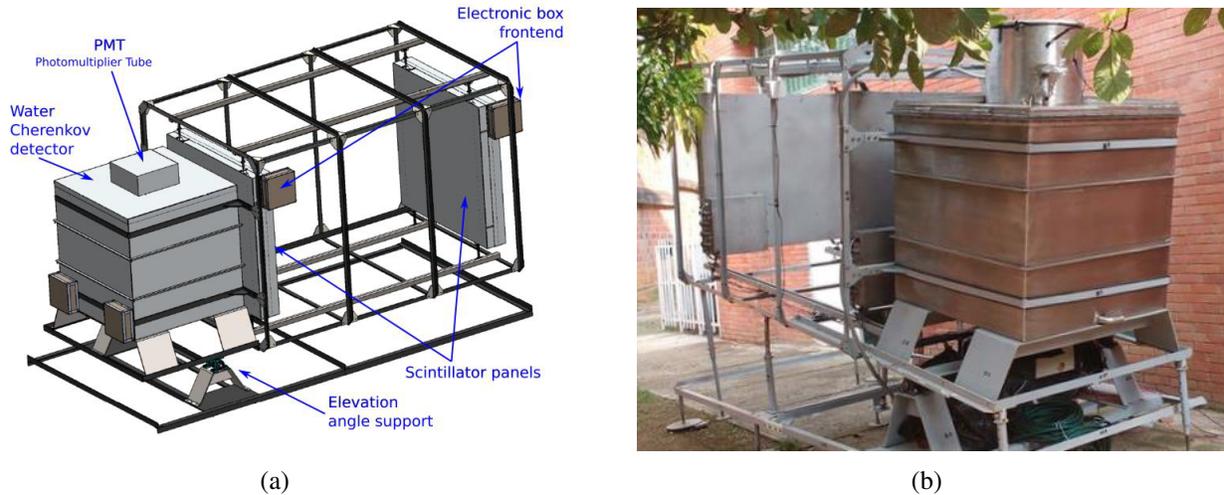


Figura 2. (a) Diagrama de la estructura mecánica básica de MuTe (Vesga-Ramírez y col., 2017). (b) Fotografía del telescopio MuTe. En las imágenes se aprecia la unión de un hodoscopio de dos paneles centelleantes que permiten detectar la trayectoria de partículas cargadas incidentes, y un detector Cherenkov de agua que registra la radiación Cherenkov producida por partículas que lo atraviesan.

Cherenkov. Esta es la radiación electromagnética emitida por las moléculas de un medio dieléctrico (tras ser excitadas y, posteriormente, regresar a su estado fundamental emitiendo energía en forma de fotones) debido al paso de una partícula cargada viajando a una velocidad superior a la de la luz en ese medio (Jelley, 1955). Este detector incluye un tubo fotomultiplicador (PMT) para registrar la radiación Cherenkov producida en el tanque (Peña-Rodríguez y col., 2019; Peña-Rodríguez y col., 2020).

Para la implementación en campo de MuTe, en las referencias (Vesga-Ramírez, 2018; Vesga-Ramírez y col., 2017) los autores estudiaron trece volcanes activos en Colombia como posibles candidatos para muografía, como muestra la figura 3. En (Vesga-Ramírez, 2018; Vesga-Ramírez y col., 2017) se analizó la viabilidad de cada uno de los posibles sitios basados en tres criterios

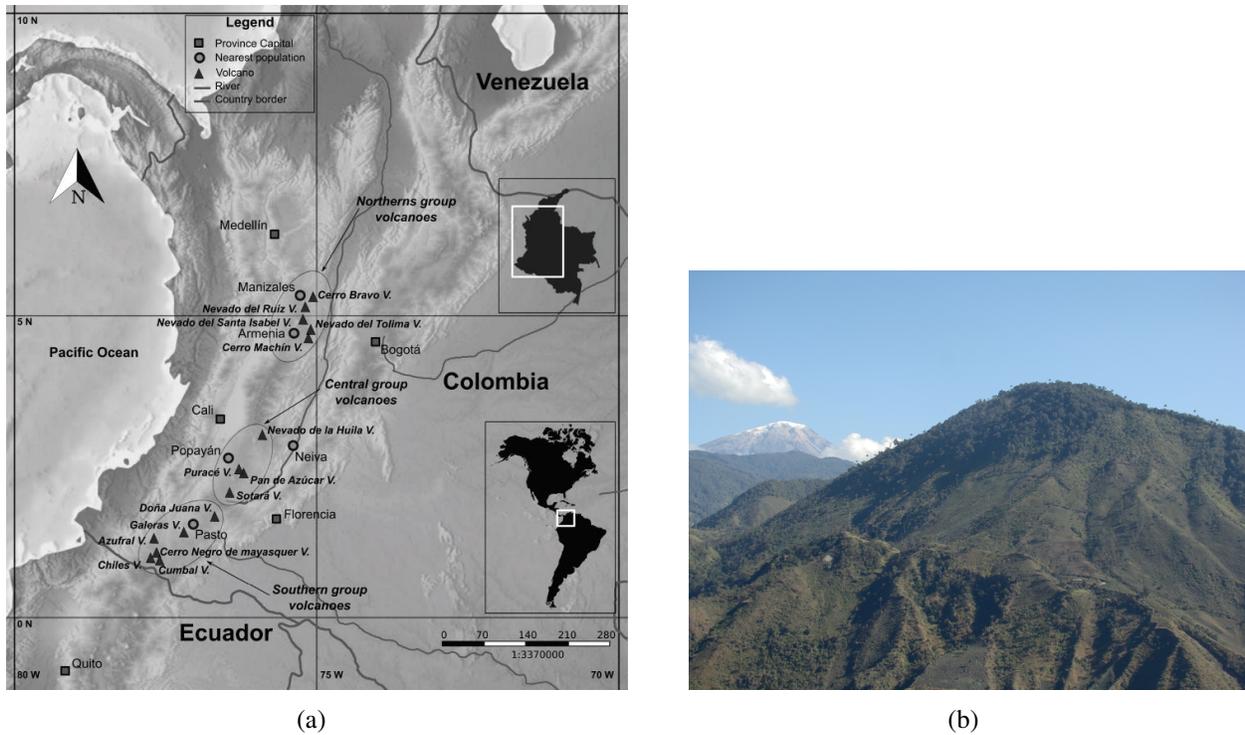


Figura 3. (a) 13 volcanes colombianos activos, candidatos para el proyecto MuTe (Vesga-Ramírez y col., 2017). (b) El Volcán Cerro Machín, ubicado en el departamento de Tolima. Este fue determinado como el candidato ideal para la implementación de MuTe. Imagen tomada de (SGC, 2021)

(el tamaño de la base del volcán, la presencia de otras estructuras topográficas que obstaculizaran la detección de muones, y la accesibilidad al sitio de observación) y determinaron que el mejor volcán candidato para la implementación de MuTe es el Cerro Machín, ubicado en el departamento de Tolima. Teniendo esto en mente, nosotros hemos tomado la ubicación del Cerro Machín como localización central para nuestro trabajo, en el que estimamos cuantitativamente el impacto del *forward scattering* de muones en la aplicación de la muografía.

1.3. Fuentes de ruido en muografía

La técnica de muografía es susceptible a varias fuentes de ruido (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021), las cuales se muestran en la figura 4. Al hablar de fuentes ruido, nos referimos a fenómenos que pueden generar una señal no deseada en el detector. En el caso de la muografía, la señal deseada en el detector proviene de muones atmosféricos que han atravesado la estructura que se busca estudiar, que componen el muograma. Los fenómenos que afecten el conteo de muones en el muograma y que no estén relacionados con muones atravesando la estructura estudiada son lo que llamamos fuentes de ruido.

Las partículas cargadas del tipo electrones / positrones contribuyen al ruido en muografía. Estas partículas, (que, como explicamos en la siguiente sección, denominamos componente electromagnética de cascadas atmosféricas extensas) pueden causar ruido si poseen la suficiente energía para atravesar el detector imprimiendo una señal similar a la de un muon; esto debido a que las energías depositadas por electrones / positrones y muones en el hodoscopio son del mismo orden (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021; Suárez-Durán, 2019). Otra fuente de ruido es la incidencia simultánea de múltiples partículas en el detector. Este fenómeno se clasifica en eventos correla-

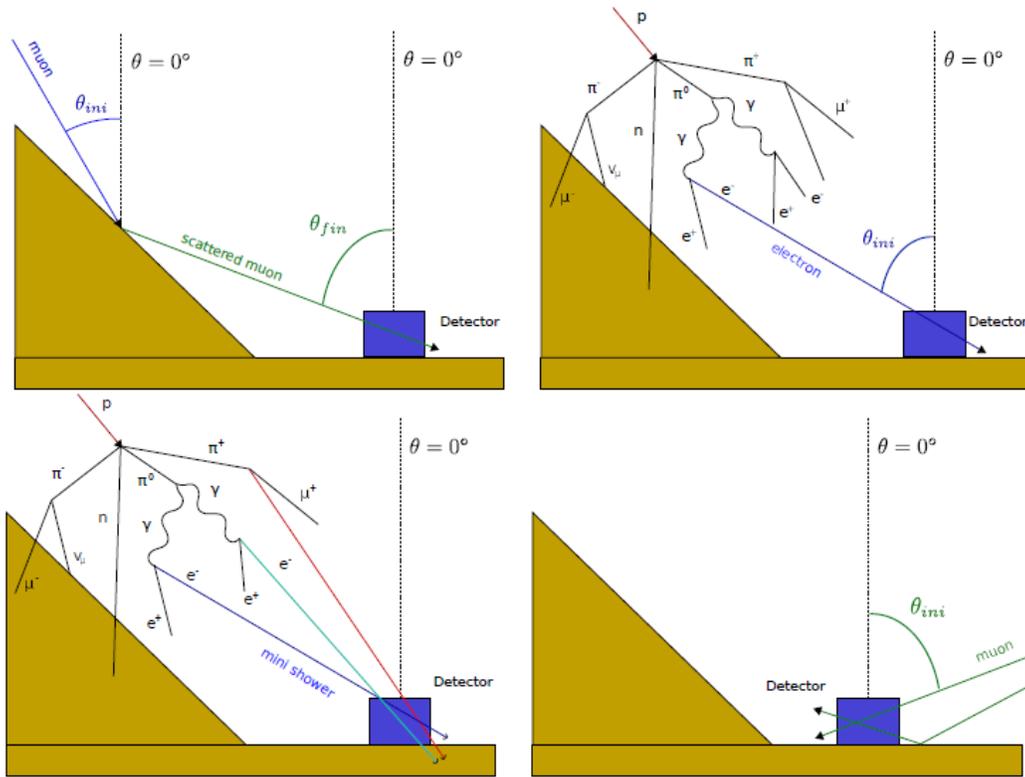


Figura 4. Las cuatro principales fuentes de ruido en muografía. Arriba a la izquierda: muones dispersados por *forward scattering*, que consiste en la alteración de la trayectoria de estas partículas al interactuar con la superficie de la estructura que se desea estudiar y ser desviadas hacia el detector. Arriba a la derecha: electrones incidiendo sobre el detector, los cuales pueden ser confundidos con muones al depositar energías del mismo orden en el hodoscopio. Abajo a la izquierda: múltiples partículas incidiendo simultáneamente en el detector, las cuales pueden crear eventos falsos-positivos. Abajo a la derecha: *backward muons* o flujo inverso, que consiste en muones incidiendo en el detector a través de su parte trasera, los cuales pueden contribuir al conteo de muones registrado en el muograma. Cada uno de estos eventos puede generar una señal no deseada en el detector, por lo que se les considera fuentes de ruido. Imagen tomada de (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021).

cionados y no correlacionados según el origen de las partículas: partículas originadas en fuentes independientes (por ejemplo, diferentes cascadas atmosféricas extensas, las cuales definimos en el siguiente capítulo) generan los eventos no correlacionados. El tiempo de llegada relativo entre estas partículas es del orden de microsegundos, permitiendo a un detector con resolución del orden de nanosegundos filtrar los eventos no correlacionados. Los eventos correlacionados están compuestos por muones y electrones / positrones procedentes de la misma fuente (es decir, una misma cascada atmosférica) (Peña-Rodríguez, de León-Barrios y col., 2021). Una fuente de ruido adicional es el flujo inverso de muones (o *backward muons*), definido como muones (de alrededor de ~ 10 GeV/c) que ingresan al detector a través de la parte posterior de este, y que contribuyen al conteo total de muones registrado en el muograma (Peña-Rodríguez, de León-Barrios y col., 2021). La última fuente de ruido importante en muografía es la dispersión de muones. Esta consiste en muones cuyas trayectorias se ven alteradas por la interacción con la materia de la estructura que se desea estudiar. Para muones de ~ 10 GeV/c cruzando 10 m de roca estándar la desviación en su trayectoria está entre 1° - 2° . Esta desviación causa un efecto de distorsión del muograma, llamado borrón o manchón (en inglés, *blurring*). (Oláh y col., 2019; Oláh y col., 2018; Suárez-Durán, 2019) han estudiado este fenómeno con el nombre de *dispersión múltiple*. (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021) encontró que para el MuTe, el 22% de las partículas incidentes en el detector son parte del flujo inverso (para un ángulo de inclinación del detector de 15°) y el 78% forman el flujo frontal. De estas últimas partículas, el 36% son partículas electromagnéticas, el 30% son eventos múltiples y el 33% son muones individuales.

El detector MuTe está diseñado para reducir el impacto de algunas de estas fuentes de

ruido. Gracias a la inclusión de un WCD, MuTe puede filtrar la señal proveniente de partículas que ingresan al hodoscopio desde su parte posterior (es decir, en sentido hodoscopio-volcán y no volcán-hodoscopio), teniendo en cuenta que el volumen de agua del WCD absorbe a las partículas con energía menor a 240 MeV (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021; Suárez-Durán, 2019). De igual forma, la inclusión del WCD permite distinguir entre las señales producidas por la incidencia de muones y de electrones / positrones pues las distintas partículas depositan energías diferentes en el WCD: la componente electromagnética (e^\pm , γ) abarca hasta 180 MeV mientras que los muones depositan energía en el rango de 180 MeV - 400 MeV (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021). El uso del WCD se hace necesario en este caso pues la energía depositada por los muones y la componente electromagnética en el hodoscopio es del mismo orden (Suárez-Durán, 2019). Por su parte, el sistema *Time-of-Flight* (ToF), con resolución de ~ 97 ps, permite discernir entre eventos correlacionados y no correlacionados: los correlacionados y las partículas individuales tienen un $\text{ToF} < 30$ ns, mientras que para los eventos no correlacionados, $\text{ToF} > 300$ ns (Peña-Rodríguez, Núñez y col., 2021).

2. *Muon Forward Scattering* y EAS

En este capítulo iniciamos explicando el fenómeno del *muon forward scattering* y planteamos el inicio de la metodología que hemos implementado para abordar nuestro problema de investigación, siendo este la estimación del número de casos de *muon forward scattering* en Cerro Machín y cómo este depende de la energía y dirección de incidencia de los muones.

2.1. *Forward scattering* de muones (MFS)

En nuestro trabajo estudiamos una forma de dispersión de muones específica, conocida como *muon forward scattering* o MFS. Este es un fenómeno en el que los muones atmosféricos se desvían de sus trayectorias originales al interactuar con la materia del suelo o alguna otra estructura (Gómez y col., 2017). Como se ilustra en la figura 5, esta desviación en la trayectoria de los muones es similar a un rebote en la superficie sólida. Al hacer muografía de volcanes, los muones que se dispersan por MFS en la superficie de la estructura geológica pueden ser desviados hacia el detector, y su trayectoria puede ser reconstruida erróneamente, como muones que han atravesado la estructura. Esto lleva entonces a una sobreestimación del flujo de muones en esa dirección, que representa una importante fuente de ruido (Gómez y col., 2017).

En este trabajo estudiamos cómo el MFS depende de la energía y dirección de incidencia de los muones, y cómo se compara el MFS con el fondo de muones atmosféricos estimado en Cerro Machín. Para esto, seguimos una metodología que consistió en el uso de múltiples códigos computacionales aplicados de la siguiente forma:

- Mediante los códigos computacionales de CORSIKA y MAGNETOCOSMICS estimamos

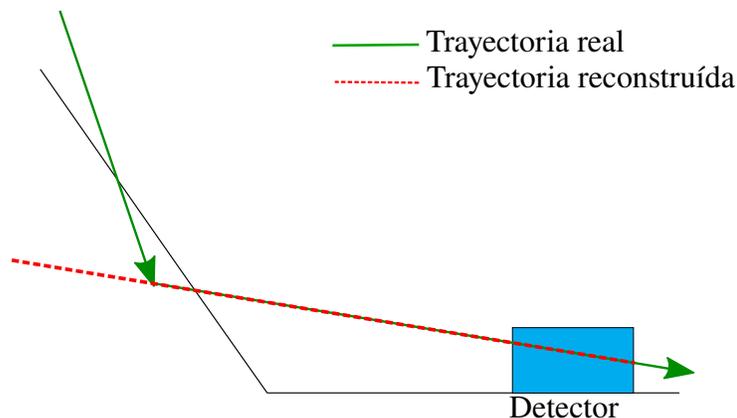


Figura 5. Definición del MFS. La línea negra sólida representa la superficie de una estructura geológica (montaña, volcán) con la que interactúa un muón. Las flechas verdes indican la trayectoria real del muón y la línea roja entrecortada es la trayectoria reconstruida del muón una vez incide sobre el detector. A pesar de que el muón no ha atravesado la estructura, la trayectoria reconstruida coincide con la de un muón que sí la ha atravesado, llevando a una sobreestimación en el flujo en ese punto.

el espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín. Estos muones se crean en fenómenos llamados cascadas aéreas extensas, que resultan de la interacción de rayos cósmicos con las partículas de la atmósfera terrestre. CORSIKA permite simular estas cascadas mediante métodos Monte Carlo, y estimar el espectro de las partículas resultantes. Ahora, la trayectoria de los rayos cósmicos que inciden sobre la atmósfera de la Tierra puede verse afectada por el campo geomagnético. Para tener en cuenta este efecto, hicimos uso de la herramienta MAGNETOCOSMICS, la cuál nos permite simular el paso de partículas cargadas (como lo son los rayos cósmicos) a través de un campo magnético.

- Usamos un código de Geant4 para simular el fenómeno de MFS. Geant4 es una herramienta computacional que permite simular el paso de partículas a través de materia, modelando interacciones como dispersión de Coulomb e ionización. En este caso, usamos este *software*

para simular las interacciones entre muones atmosféricos (cuyo espectro calculamos mediante CORSIKA) y una superficie hecha de roca estándar, permitiéndonos obtener un estimado del MFS en Cerro Machín.

- Comparamos nuestra estimación del MFS con el fondo⁶ de muones en Cerro Machín para evaluar la influencia que este fenómeno tiene en la muografía.

2.2. Rayos cósmicos y EAS

Los rayos cósmicos están compuestos principalmente por núcleos de elementos que van desde el más ligero, el hidrógeno, hasta núcleos de elementos pesados, como el hierro. Electrones y antipartículas como positrones y antiprotones también forman parte del espectro de rayos cósmicos. Estas son partículas altamente energéticas⁷ provenientes de objetos astronómicos como el Sol, remanentes de supernova y núcleos activos de galaxias. Los rayos cósmicos se pueden clasificar entre aquellos provenientes de nuestro propio Sol y de fuentes externas al sistema solar, ya sea dentro de la Vía Láctea, o de fuentes extragalácticas; esta clasificación se define en términos de bandas energéticas: las *partículas energéticas solares* generalmente llegan a energías del orden de decenas o cientos de MeV. Por su parte, los *rayos cósmicos galácticos* tienen energías superiores a los 100 MeV, generalmente del orden de GeV y superiores (Moldwin, 2008). Estos rayos cósmicos creados en fuentes externas a la Tierra se denominan **partículas primarias**. Existen varios factores

⁶ La palabra fondo se refiere a las partículas secundarias producidas por primarios de hasta 10^{15} eV. En este caso, estamos interesados en el fondo de muones.

⁷ La energía de los rayos cósmicos puede llegar hasta valores máximos cerca de 10^8 TeV (CERN, s.f.)

que pueden afectar la incidencia de rayos cósmicos sobre la atmósfera terrestre, tales como la actividad solar y el campo magnético terrestre (Tanabashi y col., 2018).

Cuando los rayos cósmicos primarios llegan a la atmósfera terrestre interactúan con los componentes del aire (principalmente nitrógeno, oxígeno y argón) produciendo **partículas secundarias**, en fenómenos llamados *cascadas atmosféricas extensas*, o *EAS*⁸. Estas partículas secundarias tienen menos energía que las primarias que las crearon. Algunas partículas secundarias que se pueden formar en estas cascadas son piones y kaones, que a su vez, pueden decaer en muones y neutrinos. También se pueden formar cascadas con electrones, positrones y fotones, a quienes en conjunto se les denomina **componente electromagnética** (Grieder, 2010).

De particular interés para nuestro trabajo es el estudio del espectro de muones atmosféricos, los cuales se forman por el decaimiento de piones y kaones. Los muones son inestables, decayendo por interacción débil con un promedio de vida de $2,2\mu\text{s}$. Si no se tienen en cuenta los efectos relativistas, un muon que, por ejemplo, se crea a 8000 m de altura sobre el suelo y viaja al 99,8 % de la velocidad de la luz recorrería una distancia de $(0,998c \text{ m/s})(2,2 \times 10^{-6} \text{ s}) \approx 658,22 \text{ m}$ antes de decaer, la cual resultaría insuficiente para llegar al suelo. Sin embargo, debido a las velocidades relativistas que alcanzan los muones, debemos tener en cuenta la dilatación temporal: el factor de Lorentz sería $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-0,99^2}} \approx 15,82$. La distancia que podrían recorrer sería entonces $d = v(\gamma t) = \gamma(658,22 \text{ m}) \approx 10412,65 \text{ m}$, con lo que los muones sí podrían alcanzar el suelo (Cunningham, 2019; Griffiths, 2020).

⁸ *Extensive Air Showers.*

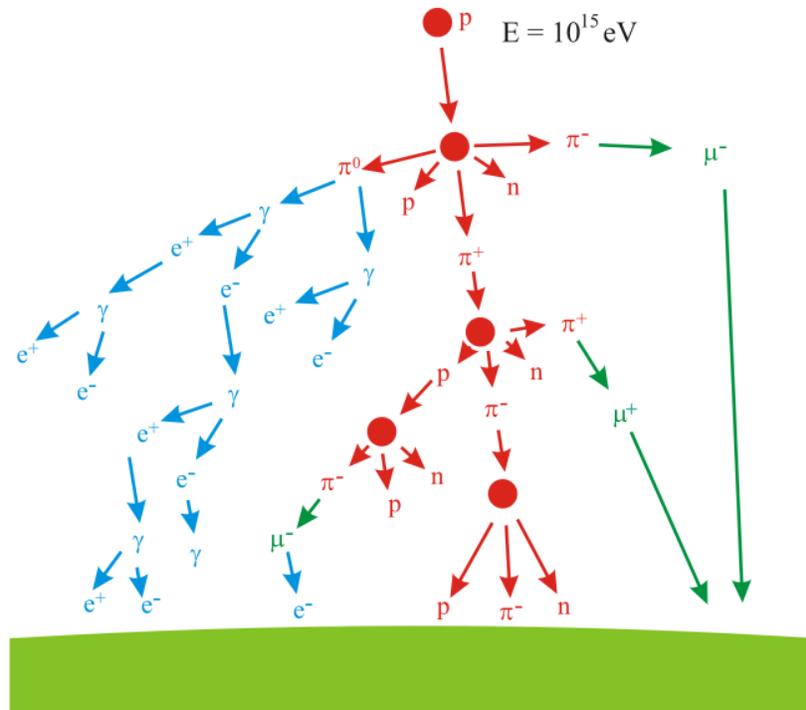


Figura 6. Diagrama simplificado que muestra el desarrollo longitudinal de una EAS, y los principales componentes derivados de ella. Aquí vemos cómo un rayo cósmico primario ingresa a la atmósfera y, por medio de la interacción con los núcleos atómicos del aire, se desencadenan las cascadas de secundarios. En azul se observa la componente electromagnética de la cascada, en rojo la componente hadrónica y en verde los muones. Imagen tomada de Wikimedia Commons.

2.3. Espectro de secundarios en Cerro Machín

Para modelar los eventos de EAS en donde se crean estos muones atmosféricos, hemos recurrido al código de CORSIKA⁹, un programa computacional que permite simular EAS y estimar el espectro de partículas secundarias que se crean en estas utilizando métodos de Monte Carlo.

El programa hace uso de diferentes modelos físicos para simular las interacciones tales como VENUS, QGSJET, DPMJET y SIBYLL para interacciones hadrónicas a altas energías (~80 GeV o más para la mayoría de modelos, ~60 GeV o más para SIBYLL), GHEISHA, FLUKA y UrQMD para interacciones hadrónicas a bajas energías y una adaptación de EGS4 para interacciones electromagnéticas (Heck y col., 1998). Los resultados de las simulaciones de CORSIKA ofrecen una estimación de las partículas producidas en EAS, las posiciones y energías con las que llegan a nivel del suelo (Heck y col., 1998).

2.3.1. Perfiles atmosféricos mediante *GDAS*

Para simular las interacciones entre los rayos cósmicos y las partículas de aire, CORSIKA requiere que el usuario suministre un modelo atmosférico. Este modelo atmosférico está basado en un perfil de densidad que divide la atmósfera en cinco capas distintas, donde la densidad atmosférica para cada capa se modela mediante las ecuaciones 2 y 3 (Heck y col., 1998). Para las primeras cuatro capas (del suelo hacia arriba), se usa:

⁹ *COsmic Ray SIMulations for KAScade*, <https://www.iap.kit.edu/corsika/>

$$T(h) = a_i + b_i e^{-\frac{h}{c_i}}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

Y para la quinta capa (la más superior de la atmósfera) se implementa:

$$T(h) = a_s - b_s \frac{h}{c_s}. \quad (3)$$

En estas ecuaciones, $T(h)$ se refiere a la densidad atmosférica en función de la altura h , con la altura máxima siendo $h=112,8$ km. Los parámetros a , b y c son únicos para cada capa atmosférica.

El método que aplicamos para calcular los parámetros de las ecuaciones 2 y 3 consiste en usar la herramienta *gdastool*. Esta herramienta se basa en la obtención de datos del Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS, por sus siglas en inglés), un sistema de predicción del comportamiento atmosférico manejado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, NOAA¹⁰. GDAS usa datos ambientales medidos mediante boyas, globos meteorológicos, aeronaves y más, y los interpola para generar un modelo atmosférico distribuido en una cuadrícula alrededor del globo terrestre de resolución 1x1 grados. Este modelo contiene interpolaciones para intervalos de tres horas cada día (NOAA, 2012).

CORSIKA dispone de la herramienta *gdastool* que permite al usuario crear un perfil atmosférico para la simulación de EAS basado en los datos del GDAS. Para esto, el usuario debe escoger

¹⁰ <https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas/>

una fecha y hora específica así como también una posición geográfica. Con esta información, *gdastool* toma los datos correspondientes al punto más cercano en el modelo de la cuadrícula global y a la hora del día más cercana dentro del intervalo de tres horas, y los usa para construir el perfil atmosférico. En trabajos anteriores, se ha comprobado la validez y gran utilidad de esta herramienta para reconstruir perfiles atmosféricos de CORSIKA (Grisales-Casadiegos y col., 2020).

Para nuestro trabajo hemos utilizado un perfil atmosférico correspondiente a la ubicación del Cerro Machín siguiendo la metodología diseñada y expuesta en (Grisales-Casadiegos, 2020; Grisales-Casadiegos y col., 2020). Para esto, hemos seguido los siguientes pasos:

1. Primero, creamos perfiles atmosféricos individuales mediante *gdastool* para una fecha y hora específicas, utilizando la ubicación geográfica del Cerro Machín. Las coordenadas del Cerro Machín las obtuvimos del Servicio Geológico Colombiano: $4^{\circ}29'N$, $75^{\circ}22'O$ (SGC, 2021).
2. Repetimos este proceso para crear perfiles atmosféricos para todos los días del mes de julio de 2019. Específicamente, creamos dos perfiles por día: uno para la medianoche y otro para el mediodía, hora local. Este proceso de crear dos perfiles por cada día lo continuamos hasta abarcar todos los días del mes de julio del año 2019. Al final, acabamos con un total de 62 perfiles atmosféricos del Cerro Machín: dos por cada uno de los 31 días de julio de 2019.
3. Finalmente, utilizamos una rutina basada en C++ y ROOT, desarrollada por (Grisales-Casadiegos, 2020) para promediar los datos de cada perfil individual, creando efectivamente un único perfil atmosférico mensual promedio que usamos para nuestras simulaciones de EAS en CORSIKA.

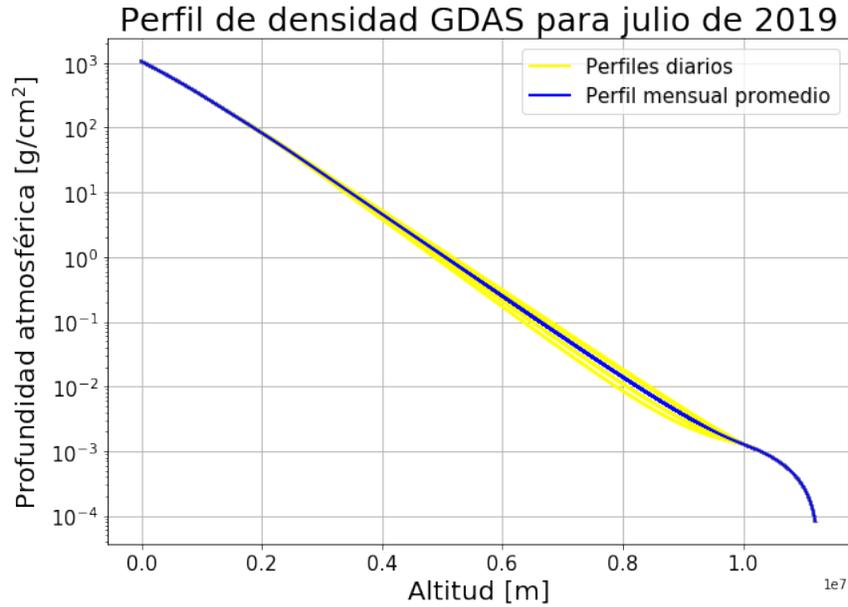


Figura 7. Densidad atmosférica en función de la altura, $T(h)$, en la ubicación del Cerro Machín, para el mes de julio de 2019. Aquí, las curvas amarillas muestran los perfiles atmosféricos individuales que creamos a lo largo de todo el mes (dos por día), mientras que la curva azul muestra el perfil mensual promedio. Este perfil mensual promedio, consistente con los resultados de (Grisales-Casadiegos, 2020; Grisales-Casadiegos y col., 2020), fue el que proveímos a CORSIKA para estimar el espectro de secundarios en Cerro Machín.

Este perfil atmosférico mensual promedio contiene los parámetros necesarios para calcular la densidad atmosférica, dada por las ecuaciones 2 y 3. Usando esas ecuaciones y los parámetros atmosféricos obtenidos mediante *gdastool*, obtuvimos una curva de densidad atmosférica que mostramos en la figura 7. En esa figura observamos a cada uno de los perfiles bi-diarios (líneas amarillas) y al perfil mensual promedio (línea azul). Es importante mencionar que el perfil de densidad está construido de tal forma que la curva sea continua en los límites de cada capa. Como se observa en la figura, la densidad atmosférica tiende a disminuir a medida que se aumenta la altura. Esta curva es consistente con los resultados de (Grisales-Casadiegos, 2020; Grisales-Casadiegos y col., 2020).

De acuerdo con (Grisales-Casadiegos, 2020), este perfil mensual promedio exhibe importantes diferencias con el perfil atmosférico subtropical que usa CORSIKA de forma predeterminada. Los autores de (Grisales-Casadiegos, 2020) hallaron que la diferencia entre el valor de la densidad atmosférica calculada para este perfil subtropical predeterminado de CORSIKA respecto de un perfil mensual promedio de *gdastool* se mantenía por encima del 40% para altitudes de hasta 30 km. Asimismo, los autores comprobaron que un perfil creado mediante esta metodología es capaz de reproducir la densidad atmosférica de forma más precisa que los modelos predeterminados de CORSIKA, siendo esto una confirmación de la validez y utilidad de este método.

2.3.2. Estimación de secundarios a nivel de Cerro Machín

Hemos procedido a implementar el *software* de CORSIKA para construir una estimación del espectro de rayos cósmicos secundarios en esa ubicación, con un perfil atmosférico del Cerro Machín para el mes de julio de 2019.

Los parámetros de entrada que utilizamos para nuestra simulación se enumeran a continuación:

- Coordenadas de Cerro Machín: 4°29'N, 75°22'O (SGC, 2021).
- Altitud de 2750 msnm (SGC, 2021).
- Tiempo de flujo de 12 horas¹¹.

¹¹ Al hablar de tiempo de flujo nos referimos al tiempo de exposición de la simulación. En nuestro caso, por ejemplo, estimamos el espectro de secundarios resultante de un tiempo de exposición simulado de doce horas.

- Rango de ángulos cenitales de ingreso entre 0° y 90° .
- Energía de primarios entre 5 y 10^6 GeV.
- Valor de rigidez de corte de 5 GV.
- Modelo atmosférico promedio mensual para julio de 2019 discutido en la sección 2.3.1.
- Componentes horizontal y vertical del campo magnético con valores de $26,8045 \mu\text{T}$ y $13,9824 \mu\text{T}$ respectivamente, calculadas según los modelos WMM e IGRF mediante una herramienta provista por la NOAA (NOAA, s.f.).

Como los eventos de cascadas atmosféricas son estocásticos, decidimos simular un flujo de secundarios de 12 horas con el objetivo de tener una estadística lo más representativa posible.

La figura 8 muestra los resultados obtenidos por nuestra simulación de CORSIKA. En la figura, se observa el espectro de secundarios como dependiente del momentum de éstos.

En esta simulación de 12 horas se obtuvo un conteo de 83 768 172 partículas por metro cuadrado en total, con un promedio de 6 980 681 partículas por hora por metro cuadrado. De estas partículas, la componente electromagnética (electrones, positrones y fotones) representa un 84,21% mientras que la componente hadrónica (piones, protones y neutrones) es un 4,70%.

Del total de partículas secundarias contabilizadas en las 12 horas de flujo, 9 294 518 de estas (alrededor de un 11,10%) fueron muones ($4\,955\,888 \mu^+$ y $4\,338\,630 \mu^-$, con un cociente de $R_{\mu^{+/-}}=1,14$ consistente con la bibliografía (Agafonova y col., 2010)), dándonos un conteo promedio de $\sim 774\,543$ muones por hora. El espectro de muones se muestra en la figura 9.

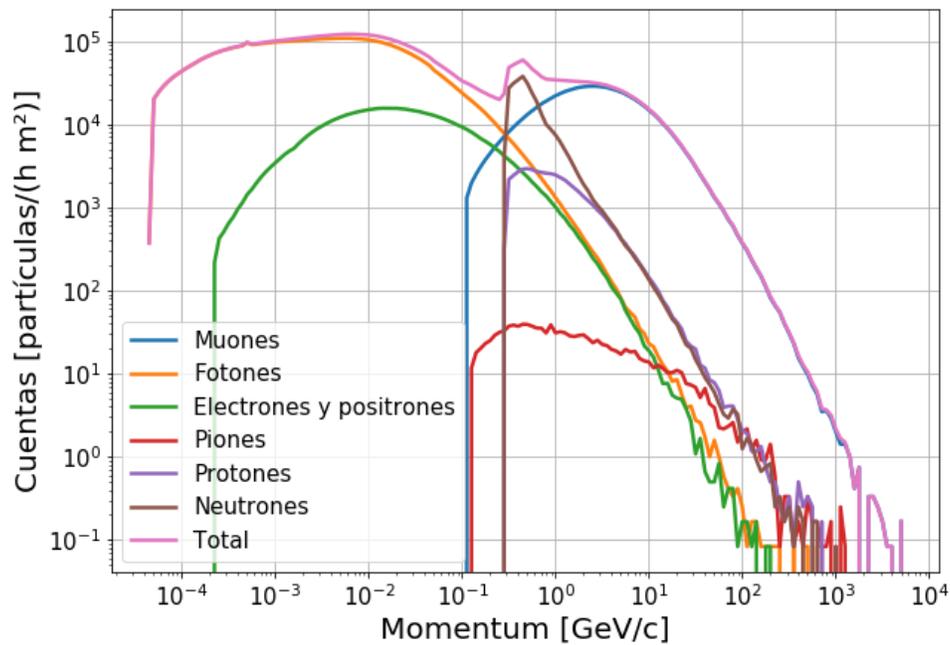


Figura 8. Espectro de secundarios a nivel de Cerro Machín, estimado mediante CORSIKA y usando el perfil atmosférico promedio del mes de julio obtenido mediante gdstool. Cada curva de un color representa un grupo diferente de partículas. La curva rosada representa la suma total de secundarios.

En la figura 9 observamos que los muones están distribuidos entre un valor mínimo de 0,11 GeV/c y uno máximo de 5011.87 GeV/c de momentum, con una media de ~ 2.82 GeV/c.

Una vez que hemos estimado el espectro de secundarios mediante CORSIKA, es importante considerar que podemos aplicar pequeñas mejoras a esta simulación al tener en cuenta los efectos que el campo geomagnético tiene sobre la trayectoria de los rayos cósmicos (Asorey y col., 2018; Suárez-Durán, 2015, 2019). Específicamente, este proceso se basa en aplicar el *software* MAGNETOCOSMICS para calcular el valor de la rigidez de corte de los distintos primarios que ingresan a la parte superior de la atmósfera y usar estos resultados para filtrar el conteo de secundarios

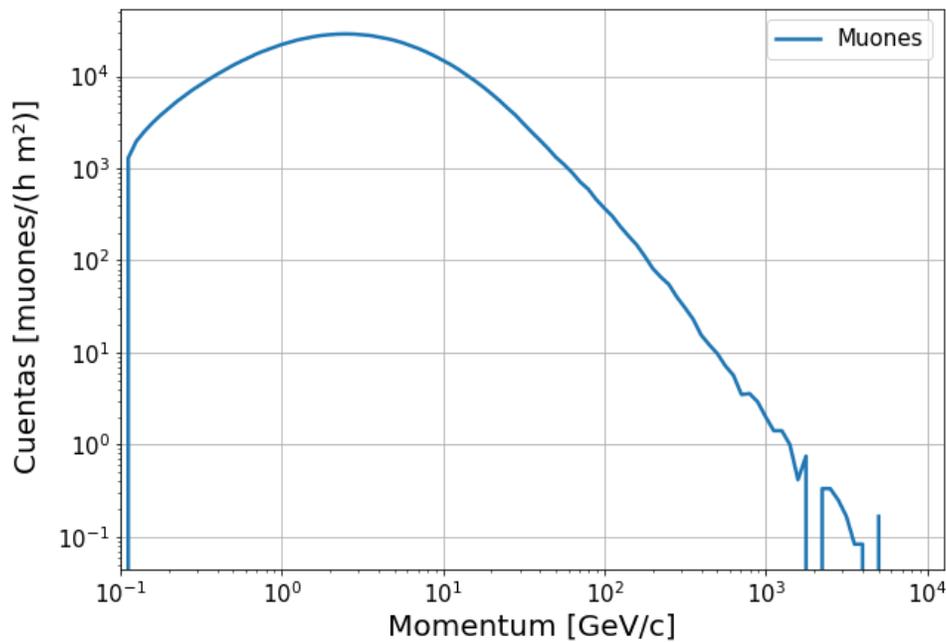


Figura 9. Espectro de muones a nivel de Cerro Machín, estimado mediante CORSIKA. Estos muones se hallan entre 0,11 GeV/c y 5011,87 GeV/c, con un momentum medio de $\sim 2,82$ GeV/c.

estimado por el CORSIKA¹². En la siguiente sección discutimos la metodología de esta corrección y sus resultados.

2.3.3. Corrección por efectos geomagnéticos

Debido a que los rayos cósmicos son partículas cargadas, estos son propensos a tener cambios en sus trayectorias por la interacción del campo geomagnético (Störmer, 1955).

Para calcular el efecto que el campo geomagnético tiene sobre el espectro de secundarios, nos

¹² En la lista de parámetros de entrada para la simulación de CORSIKA mencionamos que usamos un valor de rigidez de corte de 5 GV, el cual CORSIKA utiliza de forma predeterminada. La corrección por efectos de campo geomagnético se basa en usar MAGNETOCOSMICS para calcular el valor de la rigidez de corte para los primarios que ingresan a la parte superior de la atmósfera. Esta corrección se aplica de forma retroactiva, filtrando el conteo de partículas obtenidas en la salida de CORSIKA.

basamos en los resultados mostrados en (Suárez-Durán, 2015, 2019). Así, partimos del concepto de rigidez magnética, que se define como:

$$R_m \equiv \frac{pc}{Ze}, \quad (4)$$

donde R_m corresponde al valor de la rigidez magnética de una partícula de carga Ze y de momentum p . c es la velocidad de la luz en el vacío. Esta magnitud se entiende como la resistencia que presenta una partícula cargada a que su trayectoria sea alterada por el campo magnético a través del cual se propaga. Partículas con igual posición y dirección iniciales e igual rigidez seguirán la misma trayectoria a través del campo magnético.

En este trabajo hicimos uso de la herramienta computacional MAGNETOCOSMICS¹³ según la metodología establecida en (Suárez-Durán, 2015, 2019). Esta herramienta facilita el cálculo de las trayectorias permitidas para rayos cósmicos primarios que llegan a la superficie de la Tierra basándose en un modelo físico-computacional del campo geomagnético y el cálculo de la rigidez magnética.

MAGNETOCOSMICS recrea el campo magnético en la magnetósfera terrestre como la suma de un campo geomagnético proveniente de fuentes internas a la Tierra y un campo magnético externo creado por corrientes por fuera de la Tierra (Desorgher, 2006).

El modelo del campo geomagnético de MAGNETOCOSMICS se basa en el modelo *In-*

¹³ <http://cosray.unibe.ch/~laurent/magnetocosmics/>

ternational Geomagnetic Reference Field (IGRF), en el que el campo geomagnético se describe mediante el gradiente del siguiente potencial escalar (en coordenadas esféricas) (Desorgher, 2006):

$$V(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^{n_{max}} (R_E/r)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\cos \theta). \quad (5)$$

Donde R_E es el radio de la Tierra, P_n^m es el polinomio de Legendre normalizado por Schmidt de grado n y orden m y g_n^m y h_n^m son los coeficientes de Gauss, derivados de medidas del campo magnético en estaciones geomagnéticas y publicados por la *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA) cada cinco años (Thébault y col., 2015).

Para la recreación del campo externo, se recurre al modelo de Tsyganenko01 (T01). En este modelo, se consideran a las corrientes Chapman-Ferraro en la magnetopausa, la corriente anular, la capa de corriente de la *magnetocola* y sistemas de corrientes de Birkeland como las principales fuentes del campo magnético externo (Desorgher, 2006; Kivelson y col., 1995; Stern, 1994).

Para calcular el efecto que el campo geomagnético ejerce sobre las trayectorias de partículas de rayos cósmicos nos referimos al trabajo de (Suárez-Durán, 2015). Inicialmente, los autores verifican si primarios con ciertos valores de rigidez magnética pueden arribar a la atmósfera terrestre con una dirección paralela al cénit de Bucaramanga. Estos resultados preliminares se muestran en la figura 10. En la figura, se denota mediante el valor 1 a aquellas R_m que llevan a trayectorias permitidas, mientras que el valor 0 se usa para las R_m con trayectorias prohibidas. Allí, se evidencian tres regiones principales: una primera región donde todas las trayectorias son permitidas, una región donde todas las trayectorias son prohibidas, y una tercera región, situada

entre las dos anteriores, donde aparecen de forma aleatoria tanto trayectorias permitidas como prohibidas. Esta última región se denomina **región de penumbra**. A partir de esta división por regiones, los autores extrajeron los siguientes valores límite de rigidez magnética:

- R_L , que corresponde al límite inferior de rigidez magnética para trayectorias permitidas. En esta situación, todas las trayectorias con R_m menor a R_L serán prohibidas.
- R_U , que corresponde al límite superior para trayectorias prohibidas. En esta situación, todas las trayectorias con R_m mayor a R_U serán permitidas.
- R_C , un valor que caracteriza la región intermedia o región de penumbra, y que se calcula como:

$$R_C = R_U - \Delta R \sum_{i=R_L}^{R_U} i_{permitida}, \quad (6)$$

donde $i_{permitida}$ son aquellos valores de R_m con trayectorias permitidas y ΔR es la resolución usada en la simulación, que en este caso particular fue de 0,01 GV.

Siguiendo la línea de trabajo desarrollada por (Suárez-Durán, 2015), nosotros buscamos calcular los valores de R_C que caracterizan las regiones de penumbra para distintas direcciones de acceso de rayos cósmicos sobre la atmósfera en la localización del Cerro Machín, ya que estos valores de rigidez de corte nos determinarían qué rayos cósmicos primarios lograrían llegar a la superficie de la atmósfera. De esta forma, utilizamos la rutina de MAGNETOCOSMICS diseñada por (Suárez-Durán, 2015, 2019) con ciertas modificaciones específicas para nuestro trabajo. Los parámetros de entrada para este cálculo fueron:

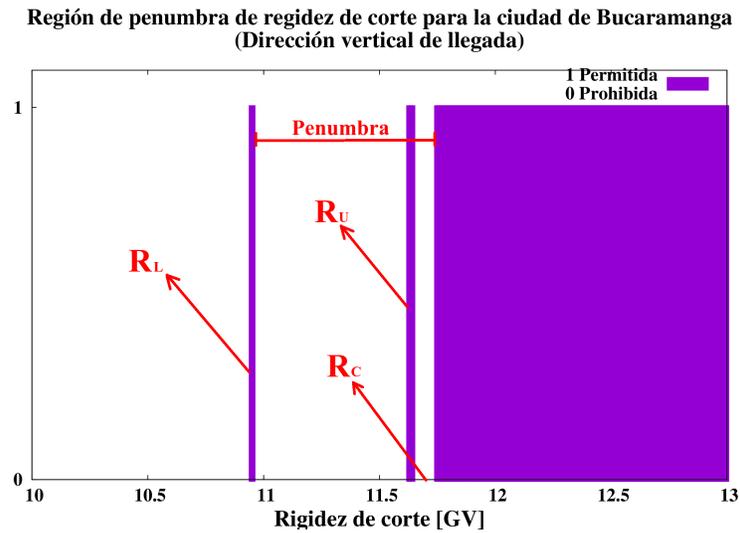


Figura 10. Ejemplo de trayectorias permitidas y prohibidas para rayos cósmicos ingresando a la atmósfera terrestre de forma directamente vertical sobre la ciudad de Bucaramanga para diferentes valores de rigidez magnética. Aquí, se evidencian los valores límites de R_L , a partir del cual todas las trayectorias con R_m inferior son prohibidas, R_U , a partir del cual todas las trayectorias con R_m superior son permitidas; y R_C , que caracteriza la región de penumbra donde hay tanto trayectorias permitidas como prohibidas. Imagen tomada de (Suárez-Durán, 2015)

- Las coordenadas del Cerro Machín ($4^{\circ}29'N$, $75^{\circ}22'O$ (SGC, 2021)).
- La altura del punto máximo de ingreso de los rayos cósmicos a la atmósfera: 112,8 km sobre el nivel del mar (Suárez-Durán, 2015).
- Empleo de modelo IGRF para campo geomagnético y modelo T01 para simulación de campo externo con parámetros correspondientes al día 23 de marzo de 2014. Esta es la fecha más reciente en la base de datos de Tsyganenko disponible en (Denton, s.f.).

Adicionalmente, el cálculo de R_C lo realizamos para diferentes direcciones de ingreso sobre la atmósfera, barriendo ángulos cenitales y acimutales de la siguiente forma:

- Ángulos cenitales entre 0° y 90° con paso de 3°
- Ángulos acimutales entre 0° y 360° con paso de 15°

Con estos parámetros de entrada, la rutina de MAGNETOCOSMICS nos permitió calcular el valor de la rigidez de corte, R_C , para un protón que ingresa a la atmósfera sobre el Cerro Machín, para cada combinación posible de ángulo cenital y ángulo acimutal de ingreso. Los resultados obtenidos se muestran de forma sintetizada en la figura 11

En la figura 11 vemos la dependencia del valor de la rigidez de corte en la dirección de ingreso. Observamos que el máximo valor de R_C se da en cada caso para un ángulo acimutal de unos 60° y que este valor cambia con el ángulo cenital de entrada, siendo, por ejemplo, 52,46 GV para un ángulo acimutal de 90° , 26,32 GV para 60° y 16,46 GV para 30° . Aquí, es importante notar la anomalía que se observa en el valor de la rigidez de corte para ángulos cenitales entre 45° y

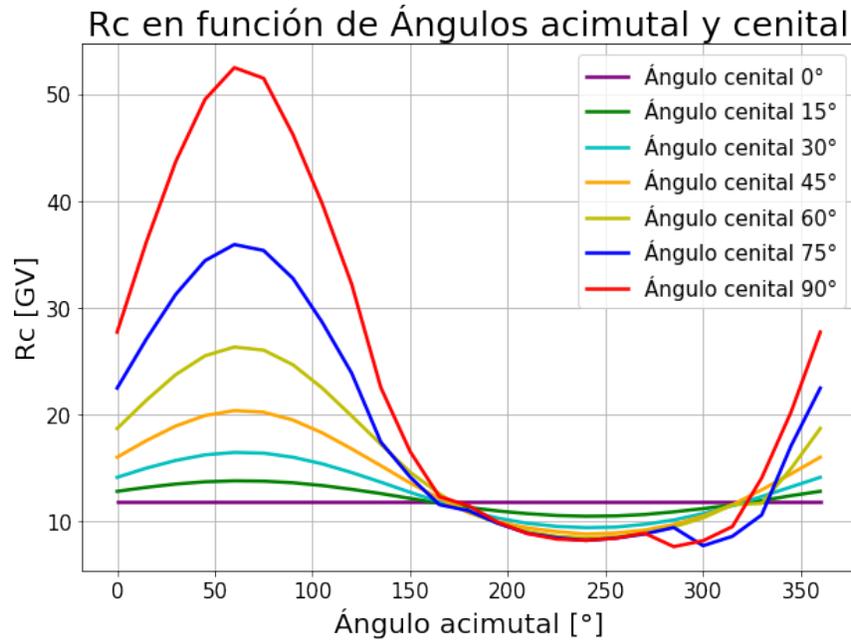


Figura 11. Rigidez de corte para el Cerro Machín como función de la dirección de ingreso a la atmósfera (ángulos cenital y acimutal).

90° y ángulos acimutales aproximadamente entre 240° y 330°. Este comportamiento corresponde a trayectorias que pasan a través de la anomalía del Atlántico Sur (Suárez-Durán, 2015).

Una vez calculamos los valores de R_C , para diferentes direcciones de ingreso de rayos cósmicos sobre la atmósfera en Cerro Machín, hemos procedido a realizar un filtrado a los archivos de salida de nuestra simulación de CORSIKA (sección 2.3.2). Este proceso de filtrado se realizó mediante las herramientas de CrkTools¹⁴. Todas aquellas partículas con trayectorias que no habrían podido haber ingresado a la atmósfera sobre el Cerro Machín fueron descartadas. La figura 12 muestra por un lado el espectro de secundarios en Cerro Machín sin la corrección por campo

¹⁴ <http://wiki.lagoproject.net/index.php?title=ARTI>

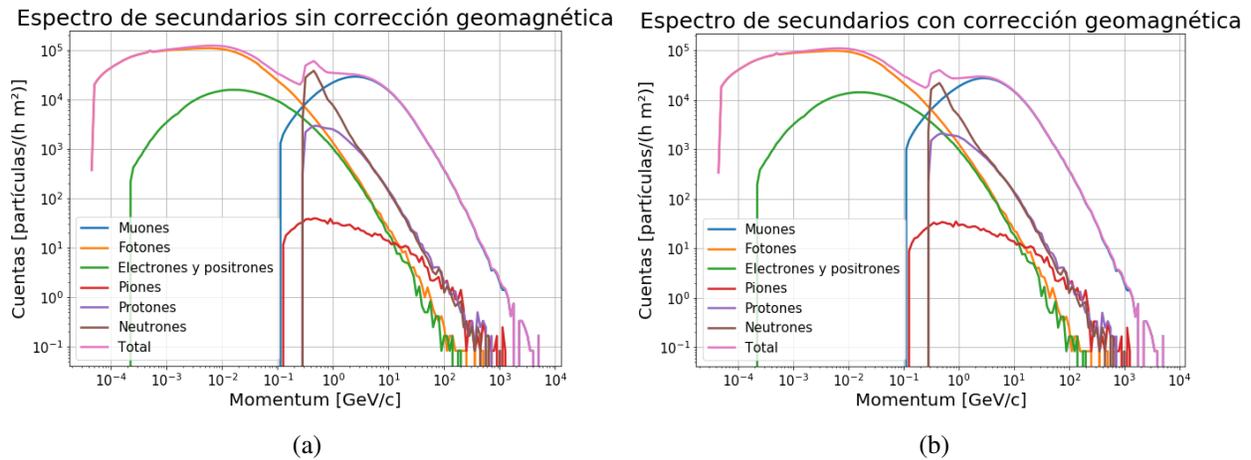


Figura 12. Espectro de secundarios en Cerro Machín estimado mediante CORSIKA con corrección por efectos geomagnéticos realizada mediante el cálculo de la rigidez de corte por MAGNETOCOSMICS (derecha) y sin esta corrección (izquierda). El número total de secundarios se redujo en un 10,73 %.

geomagnético (el mismo mostrado en la figura 8) y por otro lado el corregido gracias al cálculo de la rigidez de corte mediante MAGNETOCOSMICS. En esta figura observamos una reducción en el número total de partículas tras la corrección. El número total de secundarios calculados para la simulación de 12 horas sin corrección fue de 83 768 172 mientras que, al aplicar la corrección geomagnética, el número total de secundarios obtenidos descendió a 74 777 471, una diferencia de 8 990 701 para las 12 horas de flujo, o alrededor del 10,73 % del total de secundarios.

Por su parte, la figura 13 compara el espectro estimado de muones sin corrección (el mismo mostrado en la figura 9) y con corrección por campo geomagnético. Aquí pasamos de obtener un total de 9 294 518 muones a 8 520 951 muones con corrección geomagnética, siendo esto una diferencia de 773 567 para las 12 horas de flujo, o alrededor del 8,32 % del total de muones.

La diferencia entre el espectro de secundarios sin y con corrección geomagnética es depen-

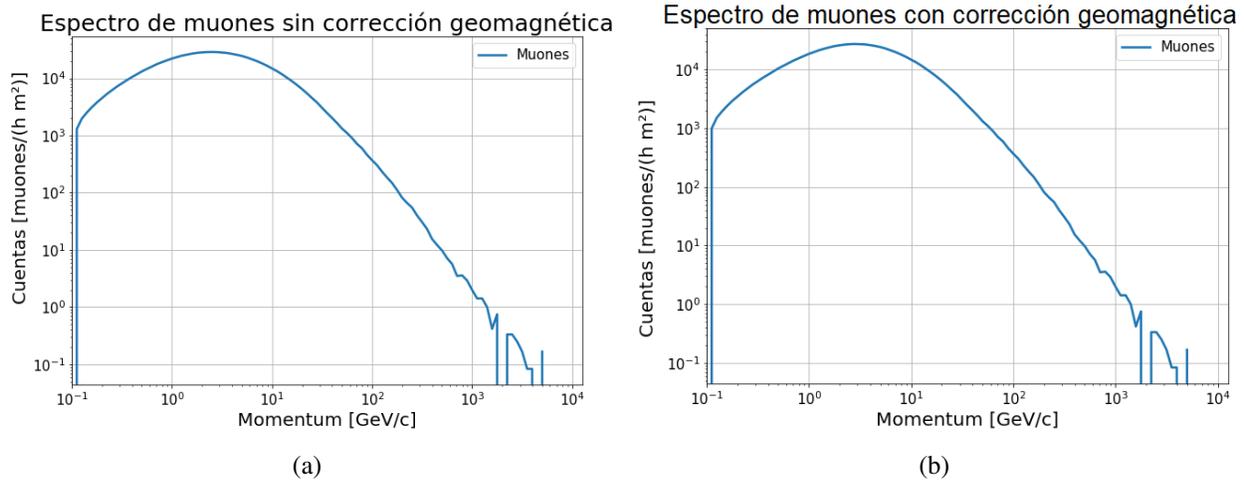


Figura 13. Espectro de muones en Cerro Machín estimado mediante CORSIKA con corrección por efectos geomagnéticos realizada mediante el cálculo de la rigidez de corte por MAGNETOCOSMICS (derecha) y sin esta corrección (izquierda). El número total de muones se redujo en un 8,32 %.

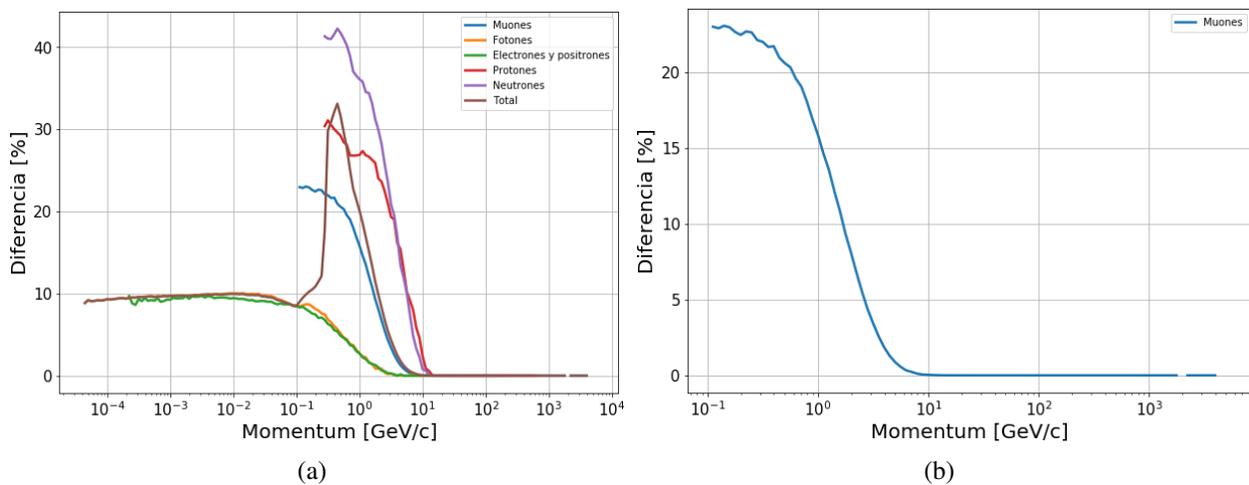


Figura 14. (a) Diferencia porcentual entre las cuentas de secundarios con y sin corrección geomagnética como función de la energía de las partículas. (b) Diferencia porcentual entre las cuentas de muones con y sin corrección geomagnética como función de su energía.

diente de la energía de las partículas. En la figura 14 observamos que para el caso específico de los muones, la mayor diferencia entre el flujo con y sin corrección se dio para muones de alrededor de 0,14 GeV/c de momentum, con un máximo de 23,04% de diferencia en el número de partículas. También es importante notar que para partículas con momentum superior a unos ~ 20 GeV/c la diferencia en las cuentas es de cero. Esto obedece al hecho de que estas partículas provienen de primarios con muy altas energías que no se ven afectados por la corrección geomagnética que aplicamos (Jaimes-Motta, 2018).

Para nuestro estudio del *forward scattering* de muones, una de las propiedades más importantes a tener en cuenta es la energía de los muones atmosféricos incidentes (Gómez y col., 2017). Teniendo eso en mente, y para facilitar el análisis de los resultados, creamos la función de distribución acumulada de momentum para los muones a partir del espectro observado en la figura 13(b). Esta función de distribución acumulada se presenta en la figura 15

En la figura 15 observamos que la mayoría de muones atmosféricos que llegan a Cerro Machín (específicamente, un 87,63%) tienen momentum por debajo de los ~ 10 GeV/c. Similarmente, otra propiedad relevante de los muones atmosféricos para nuestro estudio es el ángulo cenital de incidencia sobre la superficie (Gómez y col., 2017). En los resultados de simulación de CORSIKA los ángulos de llegada de los secundarios no están disponibles de forma explícita; sin embargo, CORSIKA sí provee los vectores de momento lineal de los secundarios que llegan a la superficie. Teniendo el vector $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$ para cada muon atmosférico que llega a Cerro Machín, podemos calcular el ángulo cenital θ de la siguiente forma:

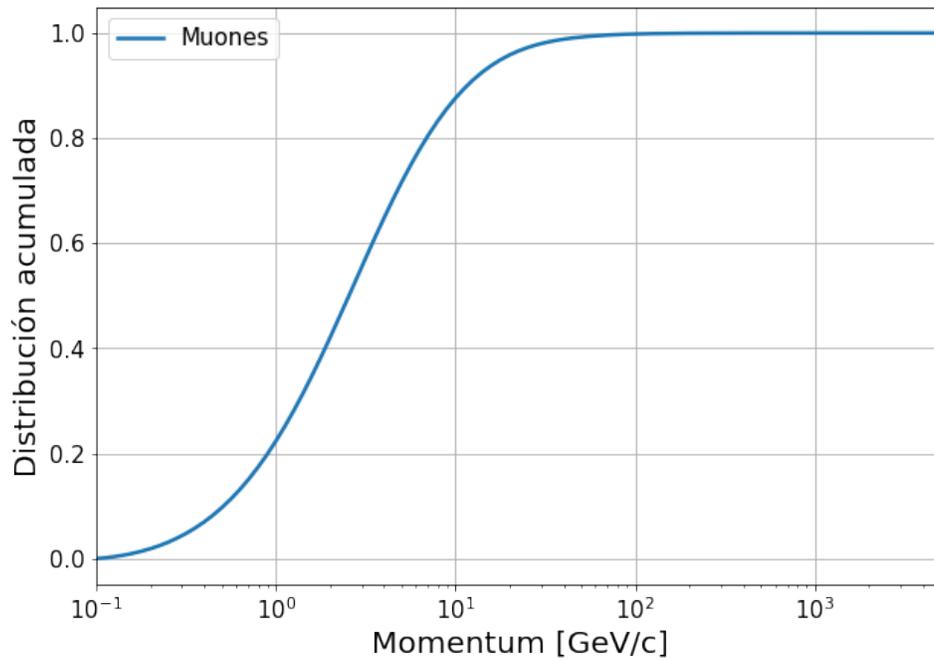


Figura 15. Función de distribución acumulada del momentum de muones atmosféricos. En esta figura observamos que el 87,63% de los muones atmosféricos que llegan a Cerro Machín tienen momentum por debajo de los 10 GeV/c.

$$p = \|\mathbf{p}\| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}, \quad (7)$$

$$\theta = \arccos \frac{p_z}{p}. \quad (8)$$

La razón por la que usamos la función coseno inverso en la ecuación 8 es porque nos interesa definir el ángulo cenital respecto del vector normal a la superficie del suelo. Habiendo calculado entonces el ángulo cenital de ingreso para cada muon que llega a Cerro Machín, elaboramos la figura 16 que presenta el espectro de muones atmosféricos ordenado por el ángulo cenital. De esta figura podemos extraer que el máximo flujo de muones atmosféricos en Cerro Machín se da a un ángulo cenital de 30° respecto de la normal del suelo. Igualmente, vemos que para los ángulos más tangenciales al suelo (de 80° a 90°), el flujo es bastante bajo, siendo este solo un 0,085 % del total de muones.

Una vez completada la caracterización y análisis del espectro de secundarios en Cerro Machín, procedimos a realizar el estudio del fenómeno del *forward scattering* de muones. El proceso completo de este estudio junto con los resultados obtenidos conforman el capítulo 3 de este libro.

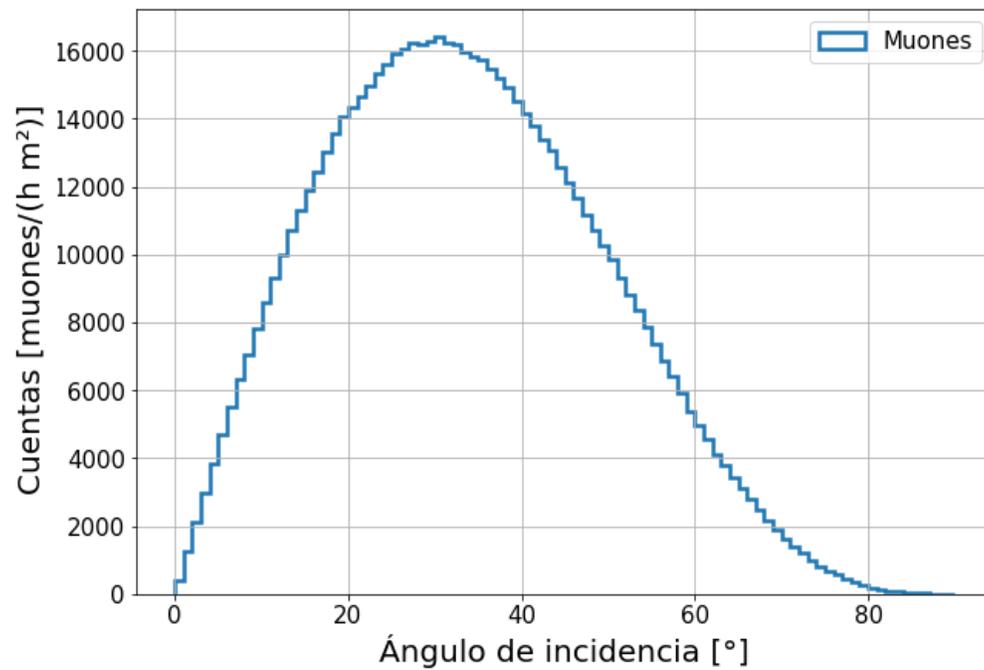


Figura 16. Espectro de muones atmosféricos que llegan a Cerro Machín ordenado con respecto del ángulo cenital. El ángulo cenital se mide desde de la normal del suelo (0° es directamente vertical, perpendicular al suelo). El pico de muones se da a 30° .

3. Estimación del *Muon Forward Scattering*

En este capítulo discutimos el proceso y los resultados finales de nuestro modelado del fenómeno del MFS. En esta última etapa de nuestro trabajo hicimos uso del *software* Geant4¹⁵, el cual modela la interacción de partículas con la materia, mediante métodos Monte Carlo (Agostinelli y col., 2003). Nuestro objetivo en esta sección fue modelar la interacción de muones atmosféricos con un volumen sólido compuesto de roca estándar y estudiar los parámetros que afectan la ocurrencia del MFS.

Para nuestro trabajo adaptamos un código de Geant4 diseñado por la colaboración LAGO para el modelado de un WCD (Jaimes-Motta, 2018; Suárez-Durán, 2019). Este ambiente¹⁶ de Geant4 consta de un volumen cúbico de 100 de lado lleno de aire y, dentro de él, un paralelepípedo de base rectangular de 28 x 28 y altura de 2,8 , que sirve como superficie sólida con la cual interactúan los muones. Este último volumen está compuesto de *roca estándar*, un material basado en el dióxido de silicio (SiO₂) con densidad de 2,65 g/cm³ (Groom y col., 2001; Menon & Murthy, 1967). Decidimos utilizar este material como medio de interacción de los muones ya que es un estándar para las simulaciones de muografía, y ha sido utilizado en múltiples trabajos previos que han estudiado distintas formas de dispersión de muones al interactuar con la materia (Athanasas

¹⁵ **Geometry and tracking**, <https://geant4.web.cern.ch/node/1>

¹⁶ Con la palabra *ambiente* nos referimos al espacio virtual en donde transcurren todos los procesos físicos que simulamos. En nuestro caso, estos procesos físicos son la interacción (ionización, dispersión de Coulomb, etc.) entre muones y materia.

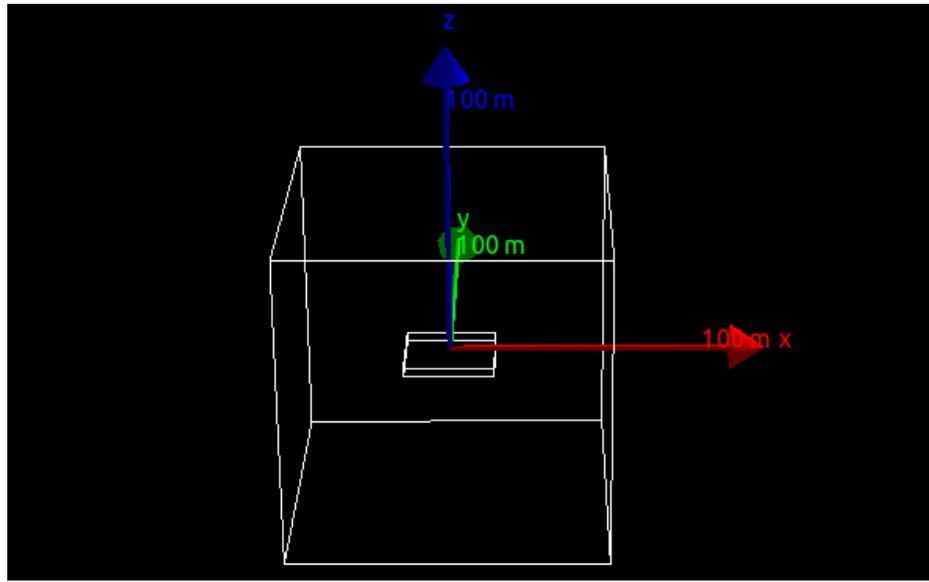


Figura 17. Ambiente de Geant4 usado para nuestras simulaciones del MFS. El cubo exterior es el volumen lleno de aire mientras que el paralelepípedo en su interior es el volumen compuesto por roca estándar.

y col., 2020; Gómez y col., 2017; Oláh y col., 2019; Oláh y col., 2018). La figura 17 presenta una imagen del ambiente 3D de Geant4 que usamos para este trabajo.

3.1. Estimación del MFS a través de un modelo computacional

Para determinar el porcentaje de muones de 1 GeV/c que presentan MFS, propagamos 1000 muones a través del medio compuesto de aire en dirección al volumen de roca (que llamamos suelo), con un ángulo cenital de 86° respecto de la normal de la superficie del suelo, y a una altura inicial de 165 cm sobre este. Posteriormente, analizamos las trayectorias de cada muon, e identificamos los muones cuyas trayectorias concordaban con la definición de MFS y comparamos sus trayectorias con las de otros muones que no presentaron MFS. Las figuras 18(a) y 18(b) muestran el ejemplo de un muon que sí presentó MFS. En este ejemplo, el muon penetró el suelo a una profundidad máxima de 39 mm antes de regresar al exterior. En la subfigura (a) presentamos la vista lateral

de la trayectoria seguida por el muon (plano xz) mientras que en la subfigura (b) mostramos la vista frontal (plano yz). Al observar la subfigura (b) notamos que el muon presentó un cambio en su ángulo acimutal. Mientras que el ángulo acimutal que llevaba el muon en el momento en que ingresó al suelo era de 0° , al salir de este su ángulo acimutal fue de $2,86^\circ$. Al final de la sección 3.3 cuantificamos las desviaciones en los ángulos cenital y acimutal de los muones que presentan MFS. En esta simulación, alrededor del 7,81 % de los muones presentaron MFS.

Por su parte, las subfiguras 18(c) y 18(d) muestran el caso de un muon que no presentó MFS. En ellas, observamos la trayectoria de un muon tanto en el plano xz (vista lateral) como en el plano yz (vista frontal). Este muon ingresa al suelo y allí interactúa con la materia. Finalmente, el muon pierde toda su energía. La disipación de la energía del muon se da como resultado de las interacciones de Coulomb con los electrones y la dispersión por los núcleos atómicos del material (Altameemi y col., 2019). Como vemos en las gráficas, en ningún punto de su trayectoria se observa el característico *rebote* que hace que el muon salga de nuevo a la superficie, que es la definición de MFS.

3.2. Estimación del MFS como función del momentum

En esta sección estudiamos cómo la energía inicial del muon y su dirección de incidencia al suelo afectan la probabilidad de presentar MFS.

Para esta nueva serie de simulaciones usamos el mismo ambiente que mostramos en la sección anterior. La altura inicial para los muones fue de 22 mm por sobre el suelo; la elección de este valor es arbitraria pues no estuvimos interesados en observar los efectos de la altura inicial en nuestras simulaciones. Para el momentum inicial de los muones, escogimos valores entre 0-10

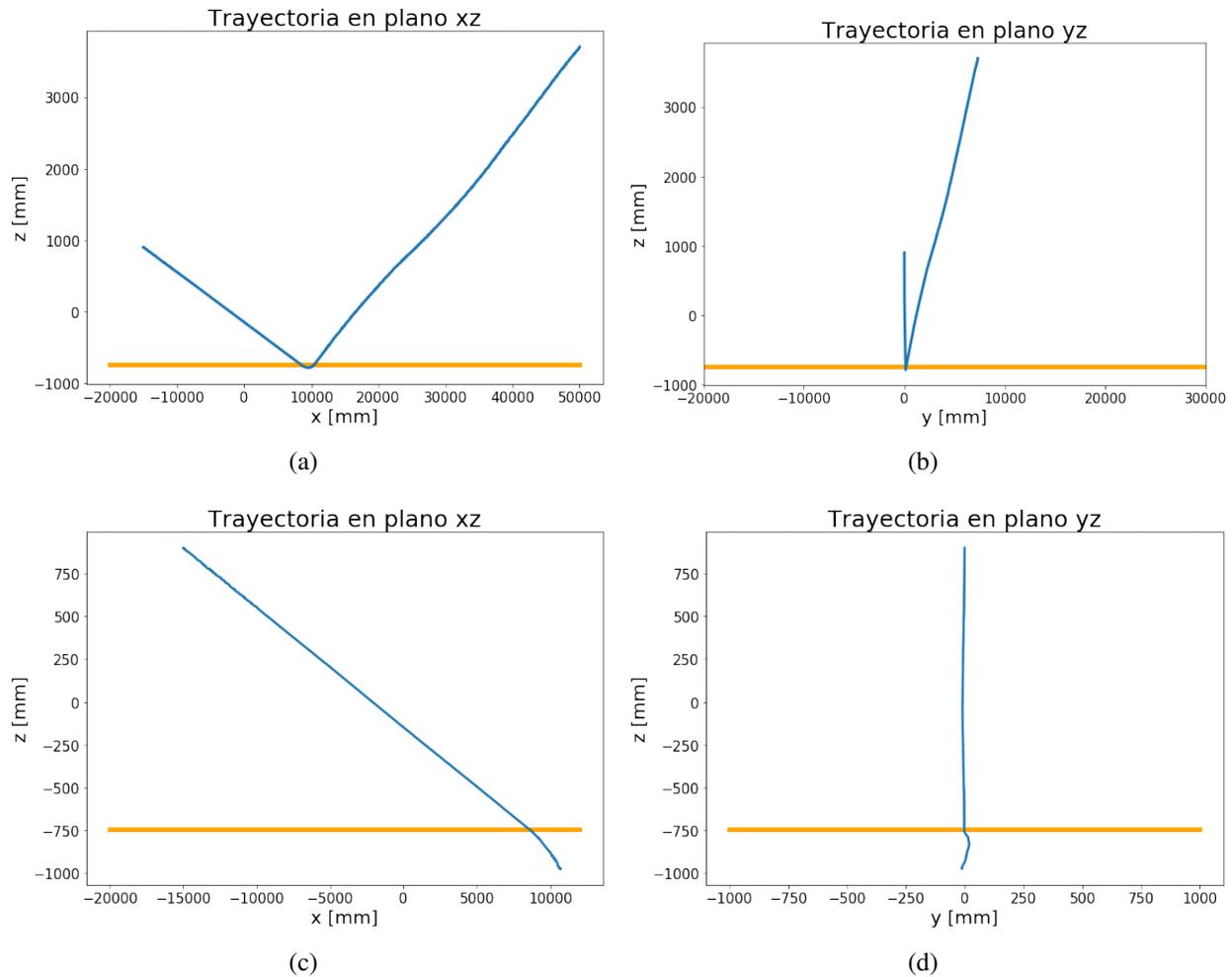


Figura 18. (a) Vista lateral (plano xz) y (b) vista frontal (plano yz) de la trayectoria de un muon que concuerda con la definición de MFS. La superficie del suelo se muestra como una línea horizontal naranja. En la vista lateral, la trayectoria inicia del lado izquierdo de la gráfica. (c) Vista lateral y (d) vista frontal de la trayectoria de un muon que no presenta MFS al interactuar con el suelo. En estas dos últimas subfiguras vemos que una vez el muon ingresa al suelo, ninguna interacción causa que el muon ñrebote nuevamente hacia el exterior, por lo que afirmamos que este muon no presentó MFS; en lugar de eso, fue absorbido por la materia del suelo.

GeV/c, con paso de 0,5 GeV/c. Para cada valor de momentum, lanzamos veinte grupos de 10 000 muones, cada uno con ángulos cenitales de incidencia entre 80° y 89,5°, con paso de 0,5°. Es importante recordar que este ángulo es medido respecto de la normal del suelo. La figura 19 muestra la probabilidad de que un muon, con un ángulo cenital de incidencia determinado, presente MFS. Esta probabilidad la calculamos para cada grupo de muones como

$$P(\text{MFS}) = \frac{N_{\mu}^{\text{MFS}}}{N_{\mu}^{\text{Total}}}, \quad (9)$$

donde N_{μ}^{MFS} es el número de muones (dentro de cada grupo de 10 000) que presentaron MFS y N_{μ}^{Total} es el número total de muones lanzados por cada grupo. Para evitar sobrepoblar la figura 19, solo mostramos las curvas para algunos de los valores de momentum usados. En la figura, observamos cómo la probabilidad de un muon de presentar MFS incrementa con el ángulo cenital. El incremento de la probabilidad se hace bastante dramático en los ángulos más grandes (los cuales representan trayectorias de incidencias cada vez más tangenciales sobre el suelo), mientras que para los ángulos más pequeños esta probabilidad se hace prácticamente nula. Para un muon de 1 GeV/c de momentum con un ángulo cenital de incidencia de 89,5° la probabilidad de MFS fue de 59,31%. Esta probabilidad cae a 45,68% para un ángulo de 89° y a 35,15% cuando el ángulo es de 88,5°, evidenciando la dependencia de la probabilidad respecto de este ángulo. Para muones de mayor momentum, observamos que la curva tiene un comportamiento similar, incrementando rápidamente con los ángulos más grandes. Sin embargo, vemos que el valor de la probabilidad disminuye conforme aumenta la energía del muon. Para muones de 9 GeV/c, hallamos que la

probabilidad de MFS incidiendo con un ángulo de $89,5^\circ$ al suelo fue de 43,62%, y este valor disminuye para ángulos menores, siendo de 22,70% para 89° y 10,82% para $88,5^\circ$.

La figura 20 muestra también la probabilidad de que los muones presenten MFS, pero esta vez como función del momentum inicial de los muones. Cada curva muestra la función de probabilidad para un ángulo cenital constante. Nuevamente, para evitar sobrepoblar la figura, solo mostramos las curvas para algunos de los ángulos cenitales que modelamos. En esta figura evidenciamos la dependencia de la probabilidad en el ángulo de incidencia. Aquí también se observa que la probabilidad de presentar MFS disminuye a medida que el momentum inicial de los muones aumenta. La explicación es que los muones de mayor momentum atraviesan el suelo interactuando poco con el material, y es más difícil que estas interacciones causen cambios importantes en sus trayectorias (Gómez y col., 2017). En cuanto a la dependencia del ángulo de incidencia, para los muones que ingresan al suelo a $89,5^\circ$, la probabilidad a 1 GeV/c es de 59,31%, 50,32% para 5 GeV/c y 42,19% para 10 GeV/c. Para los muones que ingresan a 89° , hallamos que las probabilidades de presentar MFS son de 45,68%, 30,45% y 21,45% para 1 GeV/c, 5 GeV/c y 10 GeV/c respectivamente.

Para entender la dependencia del MFS en el ángulo de incidencia y momentum inicial de los muones, hemos graficado la probabilidad de los muones de presentar MFS como un mapa de color 2D en la figura 21. En esa figura, la escala de color indica la probabilidad de presentar MFS. El eje horizontal muestra el momentum inicial de los muones mientras que el eje vertical muestra el ángulo de incidencia.

En la figura 21 observamos de forma clara que cuando los muones tienen ángulos muy

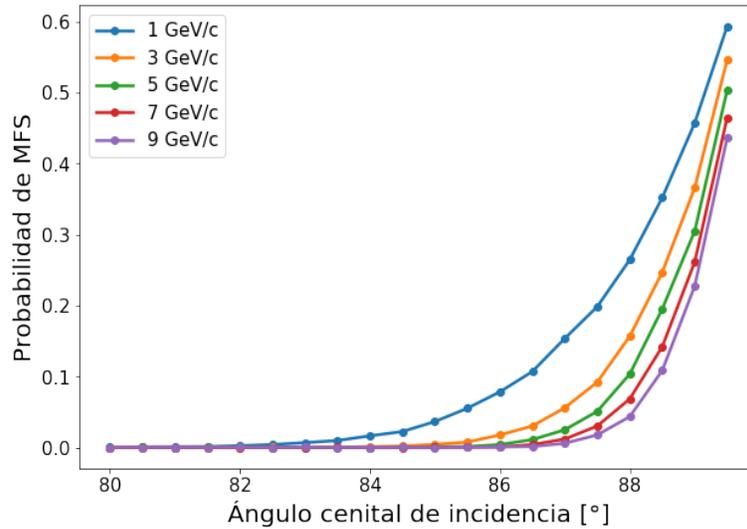


Figura 19. Probabilidad de que un muon que interactúa con una superficie de roca estándar presente MFS como función de su ángulo de incidencia. Cada curva de color representa la función de probabilidad para muones con distintos valores de momentum. En estos resultados observamos que la probabilidad de presentar MFS es alta para muones que inciden con ángulos muy cercanos a la tangente del suelo, pero esta función cae rápidamente para ángulos más pequeños.

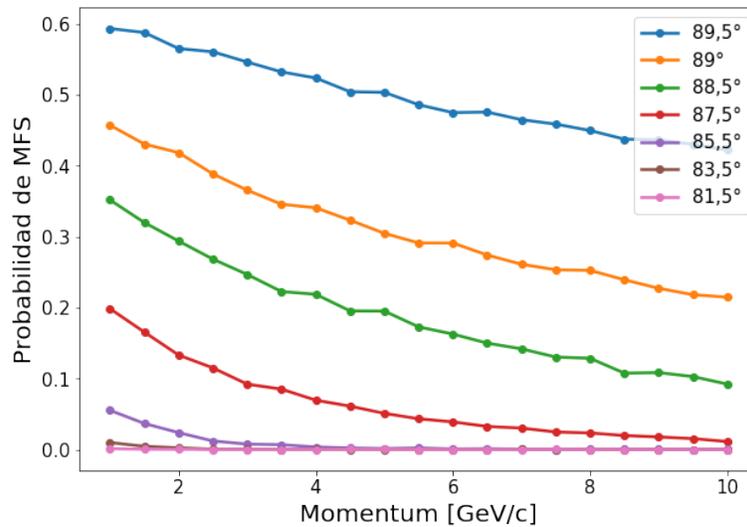


Figura 20. Probabilidad de que un muon que interactúa con una superficie de roca estándar presente MFS como función de su momentum inicial. Cada curva de color representa la función de probabilidad para muones con distintos ángulos cenitales de incidencia sobre la superficie. Observamos que la probabilidad disminuye si la energía inicial del muon aumenta.

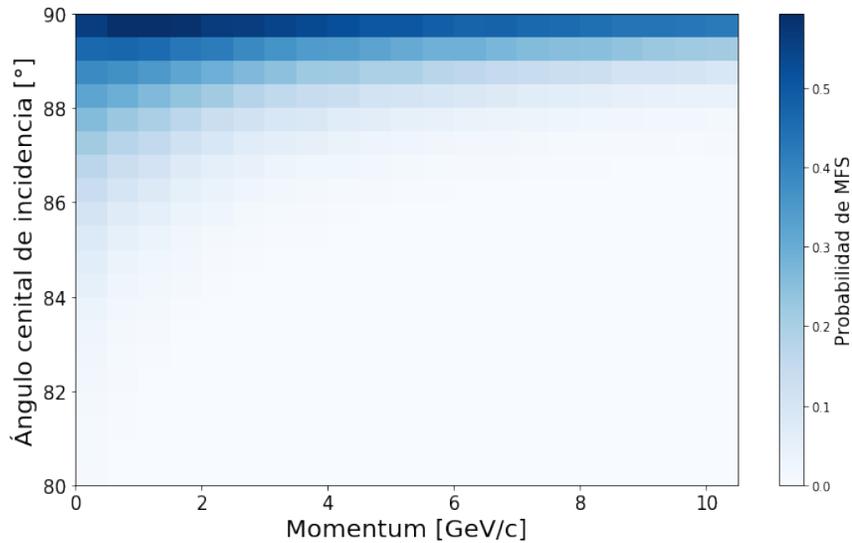


Figura 21. Probabilidad de presentar MFS en función del momentum inicial y el ángulo cenital de incidencia. Aquí observamos cómo el fenómeno de MFS tiende a ocurrir más a menudo con muones de bajas energías y con ángulos muy cercanos a la tangente de la superficie con la que interactúan, en este caso, roca estándar.

cercanos a la tangente de la superficie con la cual interactúan, los casos de MFS son mucho más frecuentes. Es importante notar también que, para los muones de energía más baja (momentum por debajo de los 0,5 GeV/c) la probabilidad de presentar MFS es menor que para aquellos muones entre 0,5-1 GeV/c. Esto se debe a que estos muones de bajas energías son fácilmente absorbidos por la materia del suelo antes de lograr dispersarse por MFS. Los resultados que hemos obtenido hasta este punto son consistentes con la referencia (Gómez y col., 2017), en donde los autores igualmente deducen que el número de casos de MFS se reduce cuando aumentamos la energía y disminuimos el valor del ángulo cenital inicial. Ahora, para aplicar estos resultados en el contexto del proyecto MuTe, se hizo necesario integrar los resultados obtenidos mediante nuestras simulaciones en Geant4 con los obtenidos en el capítulo 2 mediante CORSIKA. Específicamente, lo que buscamos

fue integrar el espectro estimado de muones atmosféricos al cálculo de la ocurrencia del MFS¹⁷.

3.3. Estimación del MFS para muones en Cerro Machín

Para la estimación de la probabilidad de MFS para muones atmosféricos que arriban a Cerro Machín, tomamos el espectro de muones estimado mediante CORSIKA. Este se muestra en la figura 13 (b), la cual es un histograma de las cuentas de muones atmosféricos ordenadas según su momentum. Este histograma tiene 20 bins por década de momentum¹⁸. En este caso, el ancho de cada bin no es constante, sino que cada uno posee un ancho diferente. Teniendo esto en cuenta, creamos el histograma de la figura 22, en donde tomamos el espectro de muones atmosféricos y dividimos el número de cuentas en cada bin por el ancho del bin, dándonos una curva de densidad de las cuentas. Allí, hemos tenido en cuenta solo muones de hasta 10 GeV/c¹⁹. Al observar esta figura, notamos que el máximo de muones se concentra entre 0,5 GeV/c y 1 GeV/c.

Seguido a esto, hemos creado un mapa 2D de color a partir del espectro estimado de muones atmosféricos. Para el momentum, utilizamos bins de 0,5 GeV/c e incluimos el rango completo de ángulos cenitales ($0^\circ - 90^\circ$), con bins de $0,5^\circ$. Este histograma 2D se muestra en la figura 23. Debido a que hemos usado bins de ancho constante en este histograma, la distribución de muones

¹⁷ La idea de integrar los resultados de CORSIKA a nuestra estimación del MFS responde a que, como vimos en el capítulo 2, el espectro estimado de muones atmosféricos en Cerro Machín no es uniforme para todos los valores de momentum y ángulo cenital.

¹⁸ Esto significa que, por ejemplo, entre 0,1 GeV/c y 1 GeV/c hay 20 bins, entre 1 GeV/c y 10 GeV/c hay otros 20 bins, etc.

¹⁹ La razón por la que hemos limitado el momentum hasta 10 GeV/c es porque, como vimos en la figura 15 el 87,63% de los muones están en este rango de momentum.

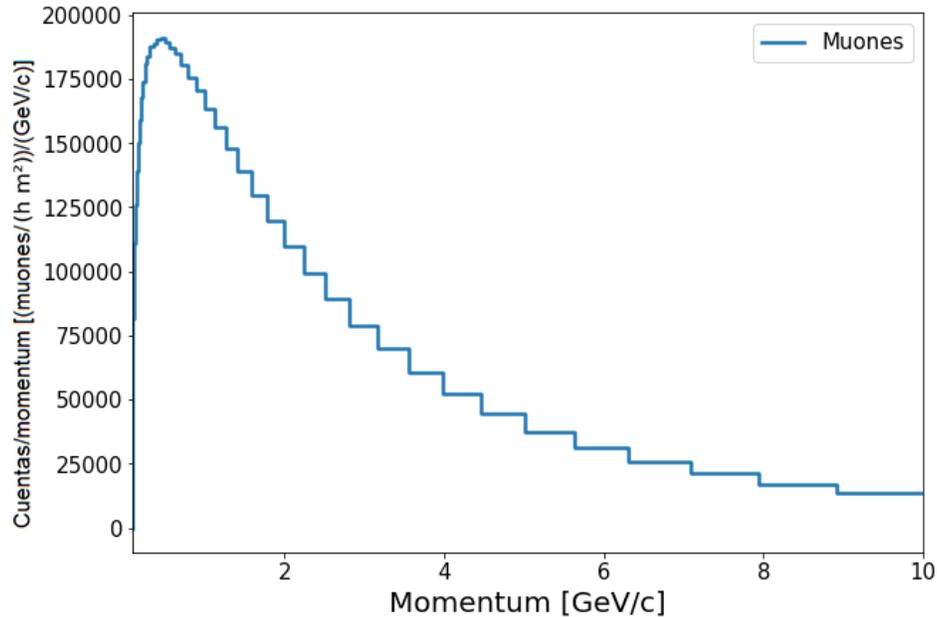


Figura 22. Densidad de cuentas de muones atmosféricos en Cerro Machín de hasta 10 GeV/c estimado mediante CORSIKA. Tomamos el espectro de muones de la figura 13 (b) y dividimos el número de cuentas en cada bin por el ancho del bin.

en el eje del momentum es consistente con la mostrada en la figura 22. El propósito de crear esta matriz con la distribución de muones en diferentes valores de momentum y ángulo de incidencia, fue multiplicarla por la matriz de probabilidad de MFS (figura 21), obteniendo como resultado una estimación del número de muones atmosféricos que se dispersan por MFS.

Antes de presentar el resultado de dicha multiplicación, debemos enseñar la importancia de la elevación del terreno con el cual interactúan los muones. Como mostramos en la figura 21, la probabilidad de MFS depende del ángulo con el que los muones inciden sobre la superficie del terreno y, como se ilustra en la figura 24, este ángulo está correlacionado con la inclinación del terreno.

En la figura 24 el ángulo del cual depende el MFS se denomina θ_{MFS} . Este ángulo está

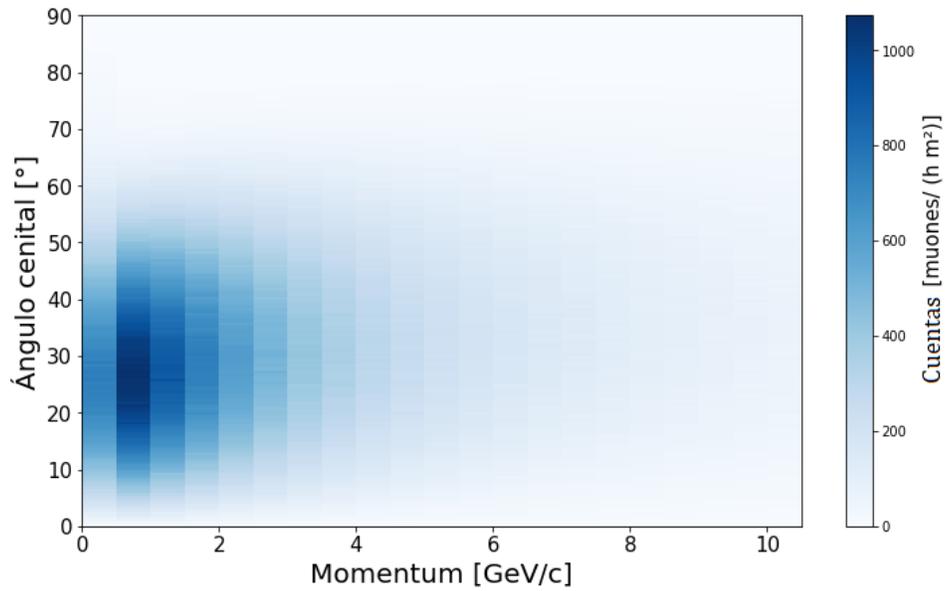


Figura 23. Espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín, calculado con CORSIKA. Este espectro de muones es el que usamos de entrada para estimar el MFS en Cerro Machín.

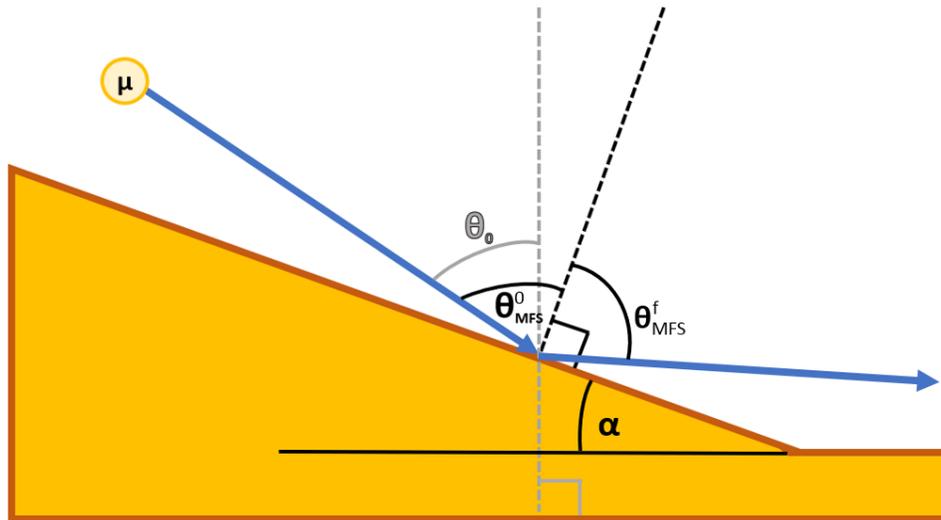


Figura 24. Diagrama que ilustra la importancia de la inclinación del terreno. α es el ángulo de inclinación del terreno; θ_0 es el ángulo cenital al cual llegan los muones atmosféricos medido respecto de un vector perpendicular al suelo horizontal; θ_{MFS}^0 es el ángulo de incidencia de los muones respecto de la normal de la superficie con la cual interactúan, y es igual a la suma de los otros dos ángulos. Este último ángulo es el que define la probabilidad de presentar MFS. θ_{MFS}^f es el ángulo de salida del muon tras dispersarse por MFS.

determinado por la inclinación de la superficie (α) con la cual interactúan los muones y por el ángulo cenital con el cual arriban los muones atmosféricos (θ_0). De esta forma,

$$\theta_{\text{MFS}}^0 = \theta_0 + \alpha. \quad (10)$$

Según nuestras simulaciones de CORSIKA la distribución del ángulo cenital de los muones atmosféricos que llegan a Cerro Machín tiene un pico en $30^\circ \leq \theta_0 < 30,5^\circ$, como se presentó en la figura 16. Esto, sumado al hecho de que la probabilidad de presentar MFS es mayor mientras más cercano sea θ_{MFS} a 90° (como se muestra en la figura 21), nos permite estimar que una pendiente $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ maximizaría la ocurrencia de MFS. La figura 25 muestra dos recortes de la figura 23: uno para los muones atmosféricos que llegan con θ_0 entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$, maximizando el número de ocurrencias de MFS en un plano inclinado entre $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$, y otro para muones de $\theta_0 \geq 80^\circ$ (muones que llegan casi horizontalmente) con $\alpha = 0$. El flujo de muones en el rango máximo es unas ~ 595 veces mayor que el flujo de muones entre 80° y 90° . Del total de muones atmosféricos en Cerro Machín, solo el 0,085 % llega con $80^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$.

Teniendo las matrices de las figuras 21, que indica la probabilidad de que un muon con momentum y ángulo de incidencia determinados se disperse por MFS (calculada mediante Geant4), y 25, que muestra el espectro estimado de muones atmosféricos a nivel de Cerro Machín (calculado por CORSIKA), el siguiente paso consistió en multiplicarlas entre ellas de tal forma que obtuviéramos finalmente un mapa de color que nos mostrara directamente el número estimado de muones en Cerro Machín que se espera se dispersen por MFS. Este mapa se muestra en la figura 26, para

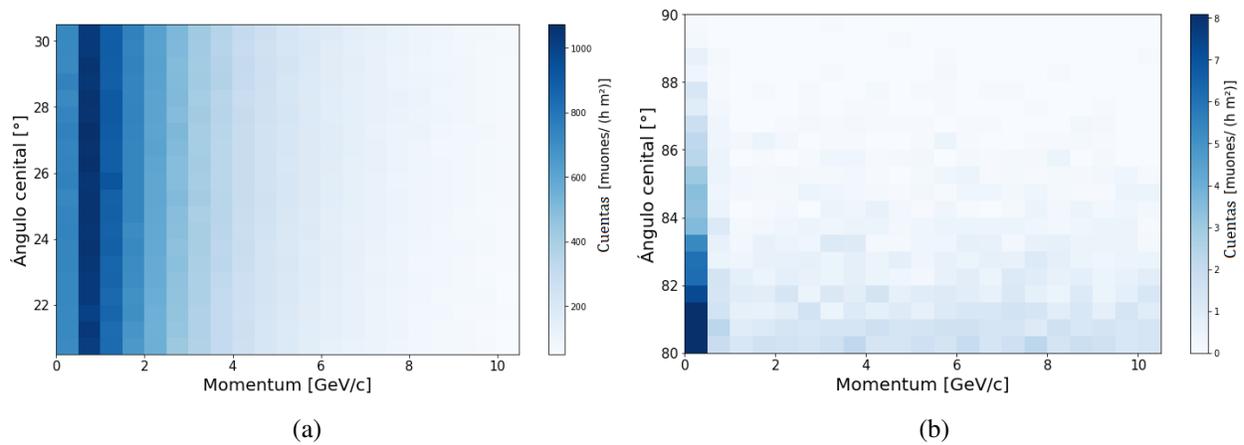


Figura 25. Espectro de muones atmosféricos en Cerro Machín. En (a) se muestra el espectro de muones que llegan con θ_0 entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$ (máximo) y en (b) se muestra el espectro de muones que llegan con $\theta_0 \geq 80^\circ$.

el caso máximo (θ_0 entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$, $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$) y el caso de muones cuasi-horizontales ($\theta_0 \geq 80^\circ$, $\alpha = 0$). Es importante recordar que en ambos casos estamos asumiendo que existe una superficie inclinada sobre la cual inciden los haces de muones de tal forma que *siempre* se cumpla que $\theta_{\text{MFS}}^0 \geq 80^\circ$. Al dividir el número de MFS de la subfigura 26(a) por el total del fondo de muones atmosféricos (figura 25(a)), hallamos que un 9,83% de los muones atmosféricos en este rango de momentum (hasta 10,5 GeV/c) y ángulo de incidencia (θ_0 entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$) son los que se dispersan por MFS. Para los muones cuasi-horizontales (subfigura 26(b)), solo el 1,64% de estos muones atmosféricos se dispersan por MFS. El número total de MFS de la figura 26(a) es ~ 3565 veces mayor que el total de MFS en la subfigura 26(b).

Al observar la figura 26, notamos que la gran mayoría de los casos de dispersión los vemos en los muones con el momentum más bajo y ángulos de incidencia muy cercanos a la tangente de la superficie. Específicamente, si reducimos el intervalo mostrado en la subfigura (a) para incluir

solo a los muones de 5,5 GeV/c o menos de momentum, y con un ángulo $\theta_0 \geq 25,5^\circ$, vemos que esto muones constituyen el 88,87% de los casos de MFS. Ahora, respecto del fondo de muones atmosféricos que llegan en este rango de momentum y ángulo de incidencia, un 22,70% de estos se han dispersado por MFS. Es importante notar también que la mayor concentración de muones dispersados se da entre 0.5 y 1,0 GeV/c; para los muones con momentum menor a 0,5 GeV/c observamos que los casos de MFS disminuyen porque, como mencionamos anteriormente, estos muones decaen al interior de la roca antes de poder dispersarse. En este punto, podemos hacer varias comparaciones de nuestros resultados con la referencia (Gómez y col., 2017). En primera instancia, un resultado nuevo que aporta nuestro trabajo es el hallazgo de que el número de casos de MFS aumentará para muones atmosféricos con direcciones de incidencia más alejadas de la horizontal ($\theta_0 < 80^\circ$, siempre que el terreno tenga un ángulo α que conserve $\theta_{\text{MFS}}^0 \geq 80^\circ$). Este efecto es causado por la variación en el flujo de muones atmosféricos dependiendo del ángulo cenital θ_0 , algo que pudimos estimar con la ayuda de CORSIKA y que no está presente en (Gómez y col., 2017). Por otra parte, los resultados de nuestro trabajo concuerdan con los obtenidos por (Gómez y col., 2017) sobre la importancia del ángulo de incidencia (respecto de la superficie sólida) θ_{MFS}^0 y el momentum de los muones.

Al presentar MFS, el muon se dispersa tanto en su ángulo cenital como en el acimutal, lo que implica una deflexión en su trayectoria. La parte final en nuestro proceso para caracterizar el fenómeno del MFS fue estudiar de forma estas deflexiones en los ángulos cenital y acimutal de los muones, ya que esto nos da una idea general de las direcciones que estos toman tras dispersarse. Estos últimos análisis los realizamos *únicamente* para los muones con θ_0 entre $25,5^\circ$ y $30,5^\circ$, valor

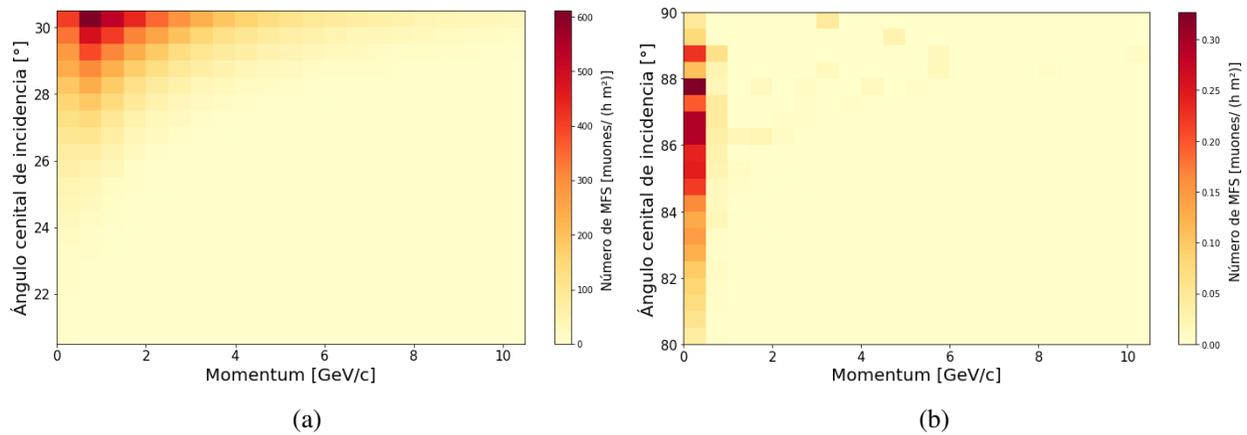


Figura 26. Mapa de color que indica la cantidad de muones atmosféricos a nivel de Cerro Machín que se espera presenten MFS. La mayoría de los casos de MFS ocurren para muones de bajas energías que inciden con ángulos bastante cercanos a la tangente de la superficie sólida. En (a), tenemos θ_0 entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$, con $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$. En (b), $\theta_0 \geq 80^\circ$, con $\alpha = 0$.

que maximiza el número de MFS.

La figura 27 compara los ángulos cenitales de entrada y salida para los muones atmosféricos que se dispersan por MFS. Es importante recordar que los muones que contamos en este análisis están en el rango de $25,5^\circ \leq \theta_0 < 30,5^\circ$, y los consideramos incidiendo sobre una superficie inclinada de tal forma que se cumpla que $85^\circ \leq \theta_{\text{MFS}}^0 < 90^\circ$. El ángulo cenital mostrado en la figura 27 es θ_{MFS}^0 . Por su parte, la figura 28 muestra la diferencia en los ángulos cenitales de salida e incidencia en función del momentum. En esta figura, vemos nuevamente que los muones con momentum más bajo son los que más tienden a dispersarse. En los muones de momentum menor a $2,5 \text{ GeV}/c$, vemos una distribución asimétrica donde $\Delta\theta$ tiende hacia el lado negativo, lo que implica que estos muones son propensos a tener un ángulo cenital final menor al inicial después de presentar MFS. Como los muones que mostramos en las figuras 27 y 28 tienen θ_{MFS}^0 en el rango de 85° a 90° , por la geometría del problema, es forzado que $\Delta\theta < 5^\circ$, ya que con valores mayores esta dispersión no

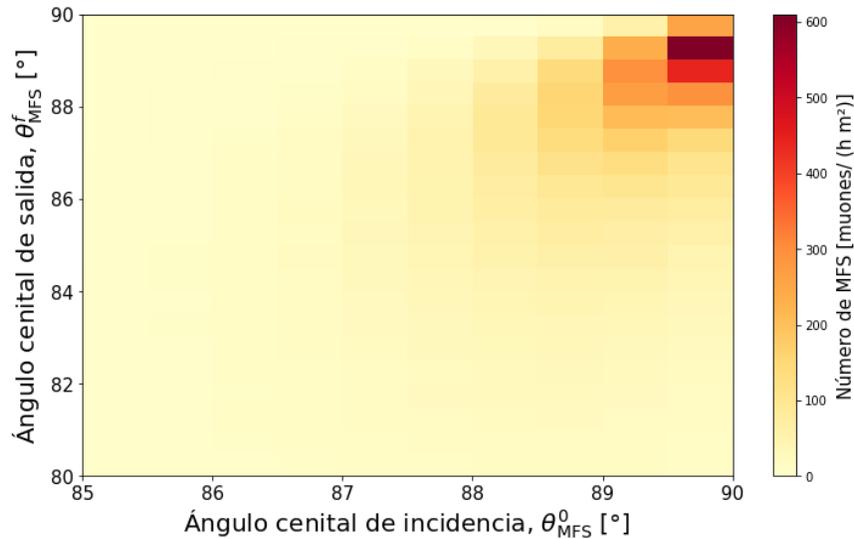


Figura 27. Ángulo cenital final vs inicial para muones atmosféricos dispersados por MFS. Aquí, θ_0 está entre $20,5^\circ$ y $30,5^\circ$, con $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$.

coincidiría con la definición de MFS. Es entonces razonable esperar que la distribución en la figura 28 tenga esa forma. En esta figura, se evidencia que el 69,52% de los casos de MFS se ubican en $-5^\circ \leq \Delta\theta \leq 5^\circ$. Mientras tanto, para el rango $-2^\circ \leq \Delta\theta \leq 2^\circ$ tenemos al 46,72% de todos los casos de MFS.

La figura 29 compara la diferencia en el ángulo cenital que hallamos en nuestro trabajo (figura 28) con los resultados obtenidos por (Gómez y col., 2017). Aquí, hemos definido a $\Delta\theta' = \theta_{MFS}^{f'} - \theta_{MFS}^0$, donde $\theta_{MFS}^{f'} = 180^\circ - \theta_{MFS}^f$ para que coincidieran con las deficiones de ángulos que se manejan en (Gómez y col., 2017). Las distribuciones de casos de MFS son similares en ambas gráficas, con lo que observamos que nuestros resultados son coherentes con los hallados por (Gómez y col., 2017).

Como punto final, estimamos la deflexión en el *ángulo acimutal* de los muones en función

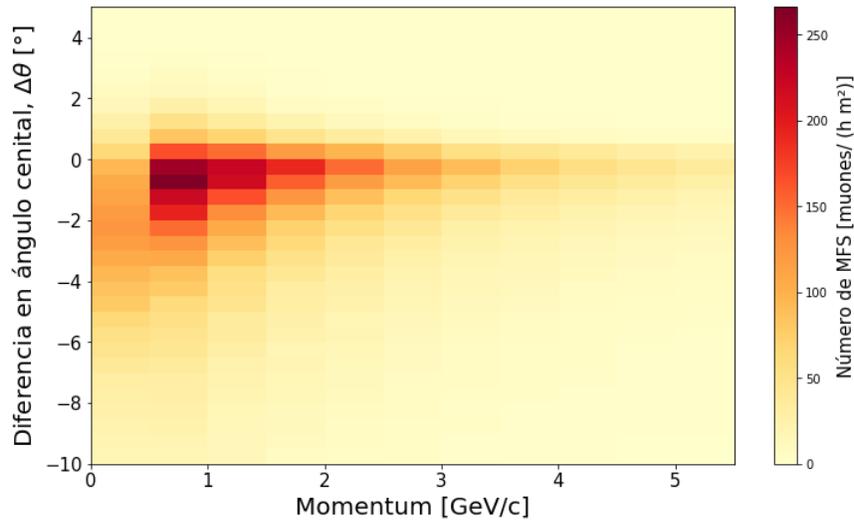


Figura 28. Deflexión en el ángulo cenital de los muones atmosféricos tras dispersarse por MFS, $\Delta\theta$, en función de su momentum. $\Delta\theta$ se define como $\Delta\theta = \theta_{\text{MFS}}^f - \theta_{\text{MFS}}^0$ (definidos en la figura 24). Aquí, $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$.

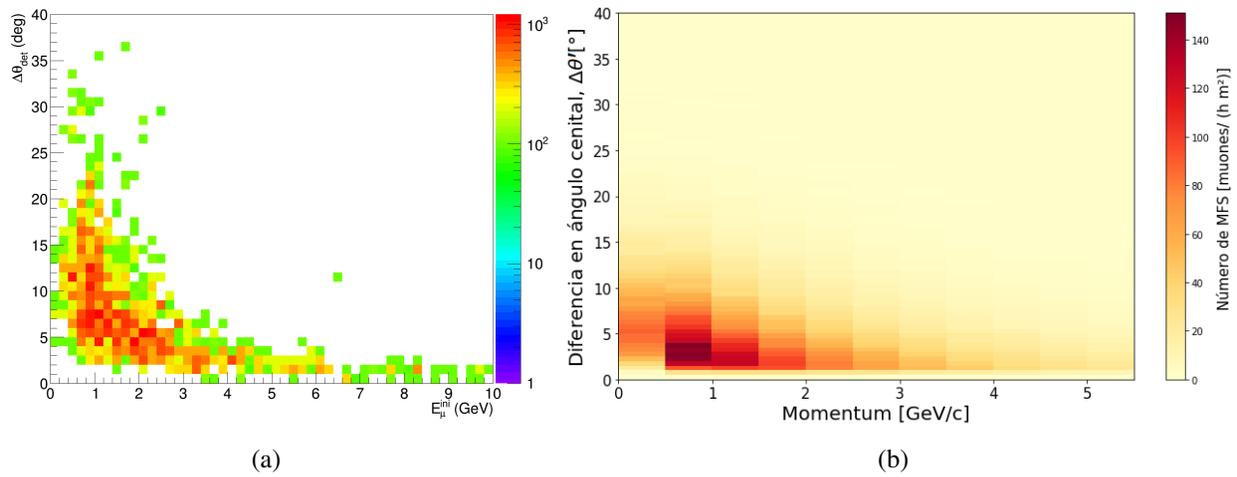


Figura 29. Deflexión en el ángulo cenital de los muones atmosféricos tras dispersarse por MFS, $\Delta\theta'$, en función de su momentum. Aquí comparamos nuestros resultados (subfigura (b)) con los obtenidos por (Gómez y col., 2017) (subfigura (a)). Aquí, definimos a $\Delta\theta' = \theta_{\text{MFS}}^{f'} - \theta_{\text{MFS}}^0$, con $\theta_{\text{MFS}}^{f'} = 180^\circ - \theta_{\text{MFS}}^f$ para que coincidan con las definiciones de ángulos que maneja (Gómez y col., 2017).

de su momentum. Estos resultados se muestran en la figura 30, donde los comparamos con los resultados obtenidos por (Gómez y col., 2017). Una diferencia importante entre la deflexión en ángulo cenital (figura 28) y en el ángulo acimutal es que esta última presenta una distribución simétrica (respecto de $\Delta\phi = 0$). Esta distribución concuerda con la hallada en (Gómez y col., 2017). La mayoría de casos de MFS se ubican en un $\Delta\phi$ cercano a 0, disminuyendo en número a medida que nos alejamos de este valor; en el rango de $-5^\circ \leq \Delta\phi \leq 5^\circ$ se ubica el 67,16% de los casos de MFS. Estas desviaciones angulares también fueron halladas por los autores de (Gómez y col., 2017), quienes concluyen, en cuanto al ángulo acimutal, que la mayoría de las desviaciones se encuentra por debajo de los 5° . Es importante mencionar, tanto para el ángulo cenital como para el acimutal, que una desviación de 5° , aunque parezca insignificante, puede ser relevante a largas distancias: a una distancia de, por ejemplo, 100 m del punto en donde los muones se dispersan, un ángulo de 5° es equivalente a $(100 \text{ m})(\tan 5^\circ) = 8,74 \text{ m}$.

En este capítulo hemos estudiado las condiciones bajo las cuales el fenómeno de MFS ocurre. De forma general, determinamos la importancia de la energía y el ángulo cenital de los muones a la hora de estimar su probabilidad de presentar MFS, hemos visto como se compara esta dispersión con el flujo total de muones atmosféricos en Cerro Machín y hemos estudiado cómo este fenómeno altera las trayectorias de los muones, particularmente en sus ángulos cenitales y acimutales. Todos estos resultados que hemos obtenido en este trabajo, como fruto de una cadena de simulaciones, son consistentes y complementarios con los de varios otros estudios que se enfocan en el ruido en muografía causado por dispersión de muones, como (Athanasas y col., 2020; Gómez y col., 2017; Oláh y col., 2019; Oláh y col., 2018). El denominador común en los resultados de estos

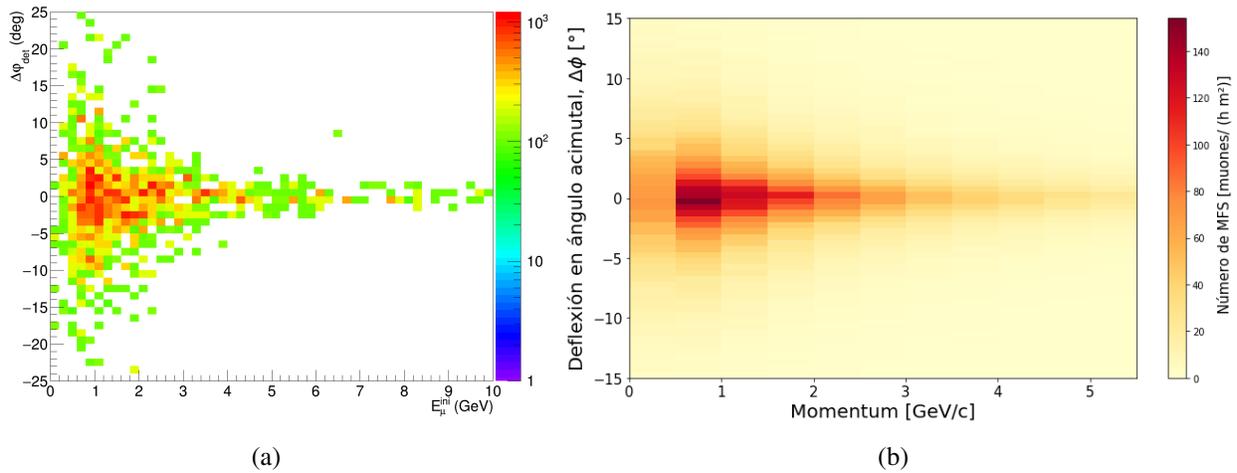


Figura 30. Deflexión en el ángulo acimutal, $\Delta\phi$, de los muones atmosféricos que presentan MFS. (a) muestra los resultados obtenidos por (Gómez y col., 2017). (b) muestra los resultados que obtuvimos nosotros en este trabajo. Nuevamente usamos $59,5^{\circ} \leq \alpha < 60^{\circ}$.

trabajos está en las condiciones bajo las cuales incrementan las ocurrencias de dispersión (muones de bajas energías y ángulos cercanos a la tangente de la superficie). Dicho esto, nuestro trabajo aporta algo nuevo a estos estudios al incluir la sección de la cadena de simulaciones relacionada con la estimación de las EAS, con el propósito de estudiar estos fenómenos de dispersión con un espectro de muones tan realista como fue posible. Al estimar este espectro de muones atmosféricos, obtuvimos hallazgos con los que no contaron los trabajos previos, como (Gómez y col., 2017); mientras que en esta referencia, los autores decidieron utilizar un espectro de muones uniforme en todos los ángulos y energías, nosotros hallamos que el espectro de muones atmosféricos es diferente para distintos valores de ángulo cenital, lo cual significa que el número de casos de MFS disminuye para ángulos acimutales cercanos a la horizontal debido al bajo flujo de muones atmosféricos horizontales (mientras que el máximo lo hallamos alrededor de los $30,5^{\circ}$). Encontramos que el

espectro de muones también varía en función del momentum, lo cual nos permitió descartar a los muones por encima de 5,5 GeV/c, debido a su bajo flujo respecto de muones menos energéticos, combinado con su baja probabilidad de dispersarse por MFS.

La incorporación de las rutinas computacionales de CORSIKA (junto con GDASTool) y MAGNETOCOSMICS nos brindó un punto de apoyo imprescindible en este trabajo y nos permitió aportar algo novedoso en este ámbito. En el apéndice 1 discutimos brevemente la implementación y la importancia de las herramientas computacionales que hemos utilizado. Por su parte, en el capítulo final de conclusiones mostramos un resumen de los resultados más importantes que obtuvimos en este trabajo así como sus implicaciones más grandes para la colaboración MuTe y el panorama de la muografía en general.

4. Conclusiones

De los resultados de nuestros estudios preliminares del *Muon Forward Scattering* (MFS) concluimos que la probabilidad de MFS aumenta con el ángulo cenital de incidencia de los muones sobre el suelo (figuras 19 y 21). Asimismo, la probabilidad de MFS aumenta inversamente con el momentum de los muones (figuras 20 y 21). Si los muones atmosféricos inciden sobre una superficie inclinada, concluimos que el número de casos de MFS aumenta con esta pendiente (figura 26). Como el pico de muones atmosféricos llega con ángulo acimutal de $30^\circ - 30,5^\circ$ (figura 16), concluimos que el máximo número de MFS se da para una superficie con pendiente de $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ (por la fórmula 10). El número máximo de MFS en esta inclinación es ~ 3565 veces mayor al MFS en el caso de un suelo horizontal.

Al estudiar el caso en el que el número de MFS resulta máximo, hallamos que el 88,87% del MFS ocurre con muones de menos de 5,5 GeV/c y con un ángulo de incidencia mayor o igual a 85° respecto de la *normal de la superficie inclinada* (figura 26(a)). Para una superficie inclinada de $59,5^\circ \leq \alpha < 60^\circ$, el número de MFS corresponde al 22,70% del fondo de muones en este rango mencionado. En el caso de una superficie de inclinación $\alpha=0^\circ$ el número de MFS es tres órdenes de magnitud menor al caso anterior (figura 26(b)).

Concluimos también que los muones que se dispersan por MFS experimentan deflexiones en sus ángulos cenital y acimutal después de interactuar con la superficie. La diferencia entre el ángulo cenital de salida y el ángulo cenital de incidencia de los muones se encontró en el rango de $-5^\circ \leq \Delta\theta \leq 5^\circ$ en el 69,52% de los casos de MFS (figura 28), mientras que la deflexión en el

ángulo cenital se encontró en $-5^\circ \leq \Delta\phi \leq 5^\circ$ en el 67,16% de los casos de MFS (figura 30(b)).

Hallamos que los resultados obtenidos con esta cadena de simulaciones son consistentes y coherentes con el estudio de (Gómez y col., 2017) (figuras 29 y 30), con lo que concluimos que nuestra cadena de simulaciones es una herramienta apropiada y conveniente para el estudio de fenómenos relacionados con EAS y muografía, y que esta podrá ser integrada al repositorio de simulaciones de LAGO para estudios posteriores.

Referencias Bibliográficas

- Agafonova, N., Anokhina, A., Aoki, S., Ariga, A., Ariga, T., Autiero, D., Badertscher, A., Bagulya, A., Bertolin, A., Besnier, M. y col. (2010). Measurement of the atmospheric muon charge ratio with the OPERA detector. *The European Physical Journal C*, 67(1), 25-37.
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. a., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G. 2. y col. (2003). GEANT4a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250-303.
- Altameemi, R., Abdul Hamid, N. S., Wan Mohd Kamil, W. M. A. & Saleh Ahmed, S. M. (2019). Determination of muon absorption coefficients in heavy metal elements. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 12(1), 281-288.
- Asorey, H., Núñez, L. & Suárez-Durán, M. (2018). Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain. *Space Weather*, 16(5), 461-475.
- Athanassas, C., Kitsaki, C., Alexopoulos, T., Gika, V. & Maltezos, S. (2020). Simulation of a muographic analysis of a volcanic dome in Geant4. *HNPS Advances in Nuclear Physics*, 27, 37-47.
- Blong, R. (1984). *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*. Elsevier.
- CERN. (s.f.). *Cosmic rays: particles from outer space*. <https://home.cern/science/physics/cosmic-rays-particles-outer-space> (Consultado: 25 de agosto de 2021)
- Cunningham, G. (2019). *High Energy Physics*. Scientific e-Resources.

- D'Alessandro, R., Ambrosino, F., Baccani, G., Bonechi, L., Bongi, M., Caputo, A., Ciaranfi, R., Cimmino, L., Ciulli, V., D'Errico, M. y col. (2019). Volcanoes in Italy and the role of muon radiography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137), 20180050.
- Denton, R. (s.f.). *Database of Input Parameters for Tsyganenko Magnetic Field Models*. <https://rdenton.host.dartmouth.edu/magpar/index.html> (Consultado: 28 de abril de 2021)
- Desorgher, L. (2006). *MAGNETOCOSMICS Software User Manual*. Physikalisches Institut.
- Gómez, H., Gibert, D., Goy, C., Jourde, K., Karyotakis, Y., Katsanevas, S., Marteau, J., Rosas-Carbajal, M. & Tonazzo, A. (2017). Forward scattering effects on muon imaging. *Journal of Instrumentation*, 12(12), P12018.
- Grieder, P. (2010). *Extensive Air Showers: High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects-A Tutorial, Reference Manual and Data Book*. Springer Science & Business Media.
- Griffiths, D. (2020). *Introduction to elementary particles*. John Wiley & Sons.
- Grisales-Casadiegos, J. (2020). *Caracterización de perfiles atmosféricos para la cadena de simulación de la colaboración LAGO*.
- Grisales-Casadiegos, J., Sarmiento-Cano, C. & Núñez, L. (2020). Impact of Global Data Assimilation System atmospheric models on astroparticle showers. *arXiv preprint arXiv:2006.01224*.
- Groom, D., Mokhov, N. & Striganov, S. (2001). Muon stopping power and range tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2), 183-356.
- Heck, D., Schatz, G., Knapp, J., Thouw, T. & Capdevielle, J. (1998). *CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers* (inf. téc.).

- Jaimes-Motta, A. (2018). *Estimación de la respuesta de un detector Cherenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 M S.N.M)*.
- Jelley, J. (1955). Cerenkov radiation and its applications. *British Journal of Applied Physics*, 6(7), 227.
- Kaiser, R. (2019). Muography: overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137), 20180049.
- Kivelson, M., Kivelson, M. & Russell, C. (1995). *Introduction to space physics*. Cambridge university press.
- Lesparre, N., Gibert, D., Marteau, J., Déclais, Y., Carbone, D. & Galichet, E. (2010). Geophysical muon imaging: feasibility and limits. *Geophysical Journal International*, 183(3), 1348-1361.
- McKetty, M. (1998). The AAPM/RSNA physics tutorial for residents. X-ray attenuation. *RadioGraphics*, 18(1), 151-163.
- Menon, M. & Murthy, P. (1967). Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics. *JG Wilson, ed, 9*.
- Moldwin, M. (2008). *An introduction to space weather*. Cambridge University Press.
- NOAA. (s.f.). *Magnetic Field Calculators*. <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm> (Consultado: 26 de abril de 2021)
- NOAA. (2012). *Global Data Assimilation System (GDAS)*. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-data-assimilation-system-gdas> (Consultado: 20 de abril de 2021)

- Oláh, L., Tanaka, H. K., Hamar, G. & Varga, D. (2019). Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt Sakurajima. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137), 20180135.
- Oláh, L., Tanaka, H. K., Ohminato, T. & Varga, D. (2018). High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors. *Scientific reports*, 8(1), 1-13.
- Peña-Rodríguez, J. y col. (2019). Calibration and first measurements of MuTe: a hybrid Muon Telescope for geological structures. *PoS (ICRC2019)*, 381.
- Peña-Rodríguez, J., de León-Barrios, R., Ramirez-Muñoz, A., Villabona-Ardila, D., Suárez-Durán, M., Vásquez-Ramrez, A., Asorey, H. & Núñez, L. (2021). Muography background sources: simulation, characterization, and machine-learning rejection. *PoS (ICRC2021)* 400.
- Peña-Rodríguez, J., Núñez, L. & Asorey, H. (2021). Characterization of the muography background using the Muon Telescope (MuTe). *arXiv preprint arXiv:2102.11483*.
- Peña-Rodríguez, J., Pisco-Guabave, J., Sierra-Porta, D., Suárez-Durán, M., Arenas-Flórez, M., Pérez-Archila, L., Sanabria-Gómez, J., Asorey, H. & Núñez, L. (2020). Design and construction of MuTe: a hybrid muon telescope to study colombian volcanoes. *Journal of Instrumentation*, 15(09), P09006.
- SGC. (2021). *Generalidades Volcán Cerro Machín*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanCerroMachin/Paginas/generalidades-volcan-cerro-machin.aspx> (Consultado: 21 de enero de 2020)
- Stern, D. (1994). The art of mapping the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A9), 17169-17198.

Störmer, C. (1955). *The polar aurora*. Clarendon Press.

Suárez-Durán, M. (2015). *Modulación de Rayos Cósmicos Secundarios a Nivel del Suelo por Cambios en el Campo Geomagnético* (Tesis de Maestría). Universidad Industrial de Santander.

Suárez-Durán, M. (2019). *Variaciones del flujo de radiación cósmica en distintos escenarios geofísicos* (Tesis). Universidad Industrial de Santander.

Tanabashi, M., Hagiwara, K., Hikasa, K., Nakamura, K., Sumino, Y., Takahashi, F., Tanaka, J., Agashe, K., Aielli, G., Amsler, C., Antonelli, M., Asner, D. M., Baer, H., Banerjee, S., Barnett, R. M., Basaglia, T., Bauer, C. W., Beatty, J. J., Belousov, V. I., . . . Schaffner, P. (2018). Review of Particle Physics. *Phys. Rev. D*, 98, 030001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>

Tanaka, H. (2019). Japanese volcanoes visualized with muography. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 377(2137), 20180142.

Thébault, E., Finlay, C. C., Beggan, C. D., Alken, P., Aubert, J., Barrois, O., Bertrand, F., Bondar, T., Boness, A., Brocco, L. y col. (2015). International geomagnetic reference field: the 12th generation. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-19.

Vásquez-Ramírez, A. (2019). *Estimación de la respuesta generada por el detector MuTe al paso de partículas cargadas* (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Física.

Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., Sánchez-Villafrades, J., Sanabria-Gómez, J., Asorey, H. & Núñez, L. (2020). Simulated response of MuTe, a hybrid muon telescope. *Journal of Instrumentation*, 15(08), P08004.

Vesga-Ramírez, A. (2018). *Inversión Geofísica A Partir De Datos De Muongrafía Volcánica Para Proyecto MuTe*. (Tesis de maestría). Universidad Industrial de Santander, Escuela de Física.

Vesga-Ramírez, A., Sierra-Porta, D., Peña-Rodriguez, J., Sanabria-Gómez, J. D., Valencia-Otero, M., Sarmiento-Cano, C., Suárez-Durán, M., Asorey, H. & Núñez, L. A. (2017). Muon Tomography sites for Colombian volcanoes. *arXiv preprint arXiv:1705.09884*.

Apéndices

Apéndice A. Códigos computacionales y repositorio de GitHub

A lo largo de este trabajo hemos hecho uso extensivo de rutinas computacionales y simulaciones Monte Carlo para modelar procesos como las creaciones de EAS y la interacción de muones con el suelo. Consideramos importante resaltar que la exploración de todas estas distintas rutinas computacionales fue un gran motivante para el desarrollo de este trabajo. Nuestro objetivo inicial fue hacer uso de una cadena de simulaciones completa que iniciara con la creación de perfiles atmosféricos mediante GDAS, para ser usados en CORSIKA e integrara el uso del *software* MAGNETOCOSMICS para corrección por campo geomagnético, partiendo del trabajo de (Asorey y col., 2018). Asimismo, terminamos integrando un ambiente de Geant4 editado de forma específica que nos facilitara las simulaciones Monte Carlo del MFS.

Este trabajo nos ha servido a modo de prueba de concepto para explorar el uso encadenado de estos paquetes de *software* y códigos independientes y ver que, efectivamente, esta cadena de simulaciones es útil y válida de ser implementada en un contexto científico real, como lo fue nuestro estudio del fenómeno del MFS. Teniendo en cuenta la importancia de la divulgación científica y la acción de compartir herramientas, hemos creado un repositorio en GitHub que contiene los códigos diseñados y editados por nosotros que hicieron parte de esta cadena de simulaciones. El enlace del repositorio es https://github.com/ricardo-de-leon-barrios/Tesis_RicardoDeLeon. Este es público y los códigos ahí presentes pueden ser usados por cualquiera que lo requiera. En este capítulo explicaremos brevemente los códigos que hemos diseñado y cómo deben usarse en el contexto de

la cadena de simulaciones completa. Para una información más detallada, se pueden consultar los archivos README y *notebooks* de Jupyter debidamente documentados en el repositorio.

El repositorio está dividido en dos: una primera sección para simulación de EAS, presente en la carpeta titulada *CORSIKA_MAGNETOCOSMICS* y una segunda sección con nuestro ambiente de Geant4 para el estudio del MFS, en el directorio *Geant4/G4_Muon_Scattering*.

CORSIKA_MAGNETOCOSMICS

Para el modelado de EAS hemos desarrollado dos códigos de Python, escritos y documentados en un *notebook* de Jupyter que facilitaran al usuario dos etapas importantes en la cadena de simulaciones: la generación de perfiles atmosféricos mensuales mediante GDAS (Grisales-Casadiegos y col., 2020) y la corrección del espectro de secundarios por efectos geomagnéticos (Suárez-Durán, 2015, 2019). El enfoque que hemos seguido ha sido el de partir de los códigos creados en las referencias y diseñar nuestros *notebooks* con el objetivo de facilitar y simplificar su uso.

GDAS_atmosphere_Persephone

Este subdirectorio contiene el *notebook* **Persephone.ipynb** el cual ayuda al usuario a crear un perfil atmosférico mensual mediante GDASTool. En el mismo directorio, hay un subdirectorio llamado *scripts* que contiene los archivos necesarios para correr correctamente el *notebook*, incluyendo el script de Python *gdastool*. Este *notebook* parte del trabajo de (Grisales-Casadiegos y col., 2020). Los requisitos básicos para poder correrlo son contar con Python 3.6 o más reciente y con

una construcción de Root del CERN²⁰. El *notebook* debe ser corrido desde un sistema con Ubuntu.

El funcionamiento básico del *notebook* es el siguiente: Al correr el *notebook* por completo, este le pide al usuario ingresar parámetros relevantes como las coordenadas del lugar de simulación y una fecha (mes y año) para obtener los datos de GDAS. El *notebook* usa estos parámetros y el script de *gdastool* para crear dos perfiles atmosféricos diarios durante el mes escogido. Una vez hecho esto, el *notebook* corre automáticamente un par de scripts de C++ (*primera_parte.C* y *segunda_parte.C*) que se encargan de juntar todos esos perfiles diarios en un solo perfil mensual promedio. Ese perfil mensual promedio se puede usar directamente como input a la hora de realizar simulaciones en CORSIKA.

Persephone

PLEASE READ THIS NOTEBOOK IN ITS ENTIRETY BEFORE RUNNING

This notebook facilitates the creation of a *gdastool* type of atmospheric profile for being used in CORSIKA simulations. Instead of just running *gdastool* to obtain a single atmospheric profile for a specific time and date, this code creates an **average** monthly profile.

It consists of **2 blocks** as follows:

- **Block 1** uses *gdastool* to create atmospheric profiles throughout the month chosen by the user, two profiles per day.
- **Block 2** uses all the profiles created on block 1 and creates an average atmospheric profile for the given month. This profile is a **.dat** file that can be input in a CORSIKA simulation.

Requisites

For this code to work, the user must download the directory called **scripts**, where the scripts used to create the atmospheric profile are found. These are:

- **gdastool**, a *Python* program normally included with newer versions of CORSIKA, specifically designed to create CORSIKA atmospheric profiles based on data from the **Global Data Assimilation System**.
- **primera_parte.C** and **segunda_parte.C** are *root* based scripts that will create one single monthly-average atmospheric profile using all the individual profiles previously created throughout the chosen month.

The computer where this notebook is to be run must have **CERN's ROOT** built in it, since the *.C* scripts need it to work. Check out the official web page to learn how to download and build ROOT: <https://root.cern.ch/building-root>. The environment must be correctly setup before running this notebook. To do this, follow the instructions given on the web page, on the *Quick Start* section.

Figura 31. Extracto del *notebook* Persephone.ipynb para crear perfiles atmosféricos mensuales promedio por GDAStool.

²⁰ Puede ser descargado gratis desde https://root.cern/install/build_from_source/

MAGCO_Merovingian

Nuestro enfoque fue similar al del código anterior, esta vez basado en el trabajo de (Suárez-Durán, 2015, 2019). El *notebook The Merovingian.ipynb* usa los archivos ubicados en el subdirectorio *scripts* para crear un archivo MACRO que se usa de entrada para MAGNETOCOSMICS, con el objetivo de calcular valores de rigidez de corte para rayos cósmicos primarios que entran a la atmósfera. Nuevamente, los requisitos básicos son Python 3.6 y un sistema con Ubuntu.

Este *notebook* le pide al usuario los parámetros importantes para correr MAGNETOCOSMICS, entre ellos las coordenadas del lugar de simulación así como una fecha y hora específicas para extraer datos del archivo *wghour.d*, una base de datos para el modelo TSY01 de campo magnético externo. El *notebook* crea automáticamente un archivo macro de extensión *.g4mac* que se debe usar de input en MAGNETOCOSMICS para realizar el cálculo de la rigidez de corte. Las instrucciones más específicas y detalladas se encuentran en el *notebook*. Debido al enorme tiempo y gasto computacional que supone correr MAGNETOCOSMICS, recomendamos hacerlo en un cluster o servidor remoto similar que cuente con ese *software*. Al acabar de correr MAGNETOCOSMICS, se creará un archivo de texto con todos los valores de rigidez de corte calculados. Para realizar el filtrado de rayos cósmicos del CORSIKA por campo geomagnético mediante este archivo de texto se debe contar con el kit de CrkTools.

Geant4/G4_Muon_Scattering

Este directorio contiene una *build* de Geant4 para el estudio del MFS mediante simulaciones Monte Carlo de la interacción entre muones y un volumen sólido de roca estándar. Este ambiente de

The Merovingian

This Notebook is meant as a visual aid for users who wish to use the MAGNETOCOSMICS software to calculate Rigidity Cutoff values for primary cosmic rays. This Notebook makes use of *scripts* developed by Mauricio Suárez Durán for his investigation works. This is *not* meant to replace those codes, but rather make their use easier for people who wish to employ them. The requirements are as follows:

- Python 3.6 or later
- Ubuntu OS
- The folder included in the GitHub page called *scripts*. This folder contains three files:
 - *wghour.d*, a data file containing all data for the Tsyganenko model for external geomagnetic field used.
 - *table-base.g4mac*, a simple text file containing the format used as an input for MAGNETOCOSMICS.
 - *maketable-magcos.sh*, an executable script that will create the macro input file for MAGCO using the parameters provided by the user.

It's important that the *scripts* folder be in the same location as this Notebook. Before running, we recommend that you read the Notebook in its **entirety**. To run, click *Cell* and *Run All*.

Brief explanation of what this code does

The way we use MAGNETOCOSMICS in this work is meant to help us filter a list of primary cosmic rays from the CORSIKA software by the calculated values of Cutoff Rigidity (R_C). We use MAGNETOCOSMICS to calculate R_C for multiple proton-like cosmic rays entering the upper atmosphere from multiple directions. For this, MAGNETOCOSMICS uses a MACRO file as an input where all the parameters desired by the user are found.

This Notebook will help the user to easily create said macro file, used as a MAGCO input, with all the desired parameters.

Figura 32. Extracto del *notebook* The Merovingian.ipynb para crear un archivo MACRO de entrada para MAGNETOCOSMICS.

Geant4 está basado en el usado por la colaboración LAGO²¹ e implementado por (Vásquez-Ramírez, 2019; Vásquez-Ramírez y col., 2020) para simular el detector MuTe, con ediciones menores para facilitarnos el estudio del MFS. Los cambios que realizamos fueron:

- Eliminar el WCD presente en el código, pues solo nos interesó ver la interacción de los muones con el suelo de roca estándar.
- Descartar del output las partículas diferentes a los muones para ahorrar espacio y poder computacional.
- Añadir la opción de cambiar el nombre del archivo de histogramas de salida en el archivo `input_vem.in`.

²¹ http://wiki.lagoproject.net/index.php/Main_Page

En este directorio hay incluido un archivo README con instrucciones básicas de cómo correr. Los requisitos son contar con Root y con una instalación de Geant4 compatible (nosotros usamos la versión de Geant4-10.06). Mientras que es posible usar este ambiente de G4 en un computador personal, la mejor opción es usarlo en un cluster o servidor remoto debido al gran costo computacional que puede llegar a tener.

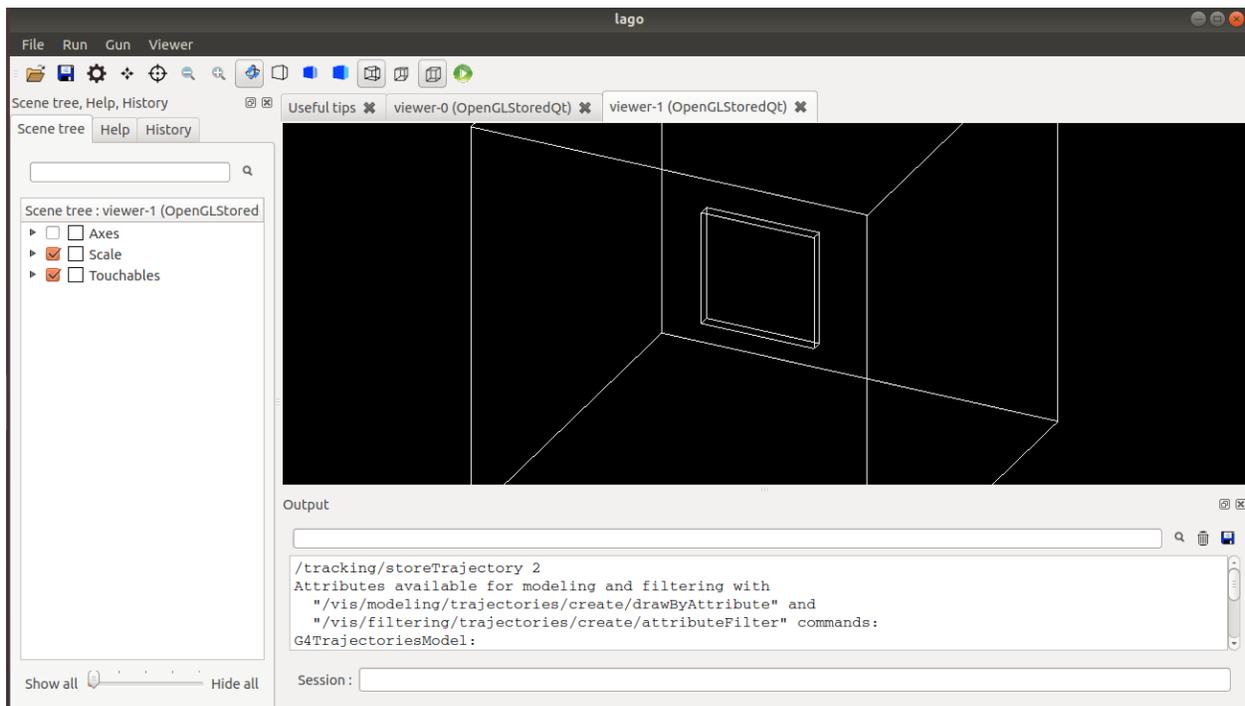


Figura 33. Pantallazo de la GUI de Geant4 para el código de LAGO usado, con vista cenital del ambiente. El pequeño volumen rectangular al interior del cubo es el suelo de roca estándar, mientras que el cubo define los límites del laboratorio.