

ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE MUONES EN EL LABORATORIO SUBTERRÁNEO ANDES

MUON FLUX ESTIMATION IN THE ANDES UNDERGROUND LABORATORY

C. Pérez Bertolli^{*1}, C. Sarmiento-Cano¹ y H. Asorey^{1,2}

¹*Instituto de Tecnología en Detección y Astropartículas (ITeDA) – CONICET/CNEA/UNSAM, Av. Gral Paz 1499 - San Martín - Pcia. de Buenos Aires - Argentina.*

²*Departamento de física médica, Centro Atómico Bariloche, CONICET/CNEA, Av. E. Bustillo 9500 - Bariloche - Pcia. de Río Negro - Argentina.*

Recibido: 01/03/2021 ; Aceptado: 12/11/2021

El Laboratorio Subterráneo ANDES está siendo planificado y diseñado para ser uno de los laboratorios más grandes y con mayor cobertura de roca en el Hemisferio Sur, el cual estará ubicado en la Cordillera de los Andes, en la zona del actual Paso Agua Negra que conecta las provincias de San Juan (Argentina) y Elqui (Chile). La diversidad de experimentos que se están planificando, entre ellos experimentos de búsqueda directa e indirecta de materia oscura y física de precisión de neutrinos, requieren de un conocimiento preciso del flujo esperado de muones atmosféricos de alta energía dentro del laboratorio. Estos son producidos durante la interacción con la atmósfera terrestre de astropartículas de alta y ultra alta energía, con energías entre 10^{12} y 10^{18} eV. En la componente de alta energía pueden encontrarse muones con energías de decenas de TeV, capaces de atravesar miles de metro de roca. Estimaciones previas realizadas a partir de suposiciones razonables sobre el tipo de roca esperada en la zona, mostraron que el flujo de muones esperado era compatible con el de otros laboratorios a una profundidad equivalente. En este trabajo, se realizaron simulaciones de flujo de lluvias atmosféricas extendidas en el sitio del laboratorio. A continuación, se seleccionaron aquellos muones con energía suficiente para alcanzar al laboratorio en base a su ángulo de incidencia y a la altura a la que ingresan en la montaña. Luego se modeló una función de transferencia utilizando los nuevos estudios geológicos disponibles actualmente que permiten disponer un modelo detallado de la distribución de roca en el interior de la montaña. Finalmente, se calculó numéricamente la interacción de estos muones con los diferentes tipos de roca a lo largo de su recorrido hacia el laboratorio utilizando el modelo de desaceleración continua, obteniéndose así que el flujo de muones esperado dentro del laboratorio es de $1,47 \pm 0,02 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$.

Palabras Clave: ANDES, muones, blindaje.

The ANDES Underground Laboratory is being planned and designed to be one of the largest and most shielded laboratories in the Southern Hemisphere, which will be located in the Andes Range, in the area of the current Paso Agua Negra that connects the provinces of San Juan (Argentina) and Elqui (Chile). The diversity of experiments that are being planned, including experiments for the direct and indirect search of dark matter and neutrino precision physics, requires a precise knowledge of the flux of high-energy atmospheric muons within the laboratory. These are produced during the interaction of astroparticles with energies between 10^{12} and 10^{18} eV denominated of high and ultra-high energy with the Earth's atmosphere. In the high-energy component, muons with energies of tens of TeV can be found, capable of passing through thousands of meters of rock. Previous estimates made from reasonable assumptions about the type of rock expected in the area showed that the expected muon flux was compatible with other underground laboratories at an equivalent depth. In this work, extensive atmospheric showers flux simulations were performed at the laboratory site. Afterwards, there was a selection of those muons with sufficient energy to reach the laboratory based on their angle of incidence and the height at which they enter the mountain. Then a transfer function was modeled using the new geological studies currently available that allow us to have a detailed model of the rock distribution inside the mountain. Finally, the interaction of these muons with the different types of rock was calculated numerically along their way to the laboratory using the continuous slow down approximation, thus obtaining that the expected muon flux within the laboratory is $1,47 \pm 0,02 \text{ day}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$.

Keywords: ANDES, muons, shielding.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2021.32.4.106>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Luego de su propagación en el espacio intergaláctico, gran cantidad de astropartículas atraviesan los campos magnéticos en la heliósfera y la magnetósfera terrestre. Estas finalmente arriban a la atmósfera terrestre e interactúan con

los núcleos de la materia que la componen. En estas interacciones, pueden generarse hasta miles de millones de partículas secundarias, que continúan interactuando y decayendo, resultando en una “cascada” o “lluvia” de secundarios. A estas se las denominan genéricamente como EAS (por sus siglas en inglés de *Extensive Air Showers*). Muchos de estos secundarios arriban a la superficie terrestre y son una com-

* carmina.perez@iteda.cnea.gov.ar

ponente importante de la radiación natural de nuestro ambiente. Experimentos orientados a la búsqueda de materia oscura o al estudio de la física de neutrinos, requieren de un blindaje para reducir el ruido intrínseco producido por esta radiación de origen extraterrestre. Hoy en día se encuentran en funcionamiento más de una docena de laboratorios subterráneos, todos ellos en el hemisferio norte, construidos para albergar experimentos que deben ser realizados en ambientes con bajos niveles de radiación.

ANDES [1] (por sus siglas en inglés de *Agua Negra Deep Experiment Site*) es un proyecto propuesto por un grupo de científicos latinoamericanos en 2012 y se trata de la construcción de un laboratorio subterráneo para albergar experimentos de materia oscura y detección de neutrinos además de estudios en otras áreas como biología y geología. Este laboratorio será instalado dentro del túnel de Agua Negra en los Andes a una profundidad de 1700 m bajo roca y albergará experimentos de colaboraciones de todo el mundo de diversas disciplinas como física, geología, sismología y estudios del medio ambiente. En el caso de ANDES, además de su profundidad, cuenta con el beneficio de su ubicación en el hemisferio sur, la cual es valiosa por diversos motivos, por ejemplo, en búsquedas indirectas de materia oscura ayudaría a eliminar el ruido de fondo estacional observado anualmente en modulaciones de experimentos en el hemisferio norte [2]. Por lo tanto, es necesario estimar con precisión el fondo esperado de muones presente en el interior del laboratorio subterráneo ANDES.

Una estimación previa de este flujo fue realizada por miembros de la colaboración a cargo del proyecto ANDES. En ese estudio se concluyó que el flujo esperado sería de $\approx 2 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ [3]. Sin embargo, al momento de realizar esta estimación el equipo de ANDES aún no contaba con los estudios estructurales ni geológicos de la composición y distribución de roca de la montaña que albergará a ANDES y que resultan necesarios para una estimación más precisa.

El objetivo de este trabajo es actualizar, refinar los modelos y perfeccionar los métodos de cálculo utilizados para realizar una mejor estimación del fondo de muones en ANDES. El laboratorio se encontrará ubicado dentro de la formación geológica denominada Grupo Choyoi, compuesta en su mayoría por riolitas porfídicas y dacita, ambas rocas volcánicas formadas esencialmente por cuarzo, plagioclasas, feldespata y biotita. Esta información fue aportada por un estudio geológico preliminar de la estructura de la montaña [4] a partir del cual se planteó el modelo de caminos en la roca que se muestra en la Fig. 1.

II. MÉTODOS

Haciendo uso de los software de simulación CORSIKA [5] y ARTI [6] (ampliamente validados para este tipo de estudios [7]) se realizaron simulaciones de flujo de secundarios a dos alturas diferentes, el pico y la base de la montaña.

Luego, a partir de la definición de opacidad de la roca:

$$\kappa = \int_{l_0}^{l_f} \rho(l) dl, \quad (1)$$

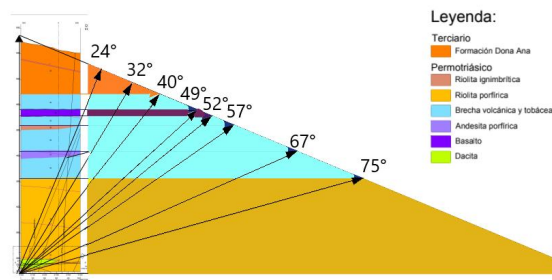


FIG. 1: Modelo aproximado de la distribución de densidades en la montaña y caminos y ángulos de incidencia para el flujo de muones. Figura adaptada del estudio geológico preliminar [4].

se utilizó esta magnitud para estimar la atenuación del flujo de secundarios de muy alta energía, con especial énfasis en los muones. Para esto se estudió su propagación en las direcciones indicadas en la Fig. 1 dentro de la montaña. Asimismo, se supuso simetría acimutal, y se diseñó una función de transferencia. Para esto se utilizó la aproximación de desaceleración continua [8] (CSDA por sus siglas en inglés) ampliamente utilizada en experimentos como IceCube [9]. En ella se supone que la tasa de pérdida de energía de las partículas que pasan a través de un material es igual a su poder de frenado $dE/d\kappa$. Este está definido en cada porción diferencial del material. En particular, la pérdida de energía para los muones de altas energías puede ser descripta como:

$$\left\langle \frac{dE}{d\kappa} \right\rangle = a(E) + b(E)E, \quad (2)$$

siendo $a(E)$ la pérdida de energía electrónica y $b(E)$ la contribución en escala de energías proveniente de procesos radiativos -*Bremsstrahlung*, producción de pares e interacciones fotonucleares- y E la energía total.

Simulaciones de lluvias atmosféricas extendidas

Las simulaciones del flujo de secundarios sobre el sitio de ANDES fueron realizadas con el programa basado en el método de Montecarlo CORSIKA [10] (versión 7.5600). A su vez se hizo uso de ARTI [11] que consta de un paquete completo que convierte a CORSIKA, que es hecho para simular lluvias monocromáticas, en un programa capaz de simular el flujo de fondo generado en un intervalo de tiempo. Este paquete fue creado en el marco del proyecto LAGO [12].

De esta forma, se simuló el flujo de partículas secundarias a dos alturas distintas que denominamos “pico”: a 5400 m s.n.m (metros sobre el nivel del mar) y “base”: a 3700 m s.n.m. sobre el sitio de ANDES, utilizando la correspondiente selección de parámetros, a saber: **modelo hadrónico a altas energías:** QGSJETII-04 (Quark Gluon String Model with JETs); **dirección de arribo del primario:** entre 0° y 90° para el ángulo cenital y el ángulo acimutal entre -180° y 180° ; **límites de energía del primario:** 1 TeV - 10^6 TeV; **altura del sitio:** base (4700 m s.n.m) y pico (5300 m s.n.m) de la montaña; **tiempo de flujo:** dos simulaciones equivalentes a tres meses de flujo, para cada altura con el fin de tener una buena cobertura estadística en la fracción de altas energías teniendo en cuenta la fuerte dependencia del

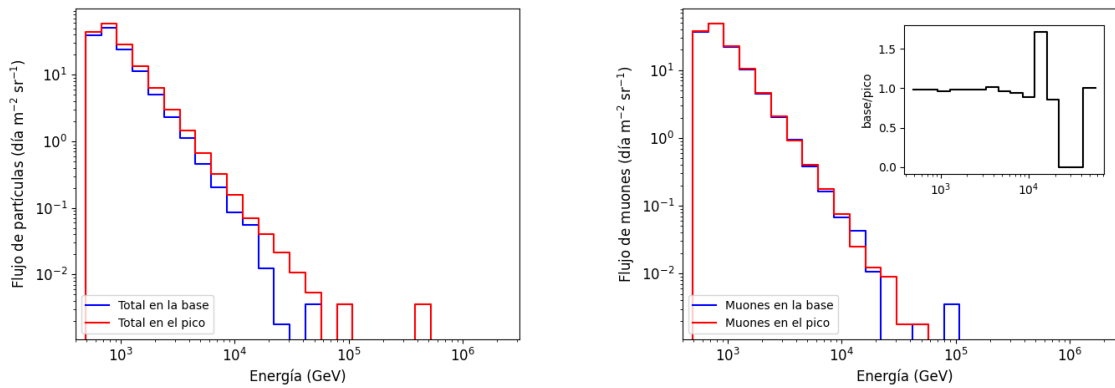


FIG. 2: Izquierda: histogramas comparativos del flujo total de partículas sobre la base (azul) y el pico (rojo), resultados de las simulaciones del flujo de secundarios sobre el sitio de ANDES. Puede observarse un mayor flujo sobre el pico que sobre la base y una fracción de aproximadamente 5×10^{-3} partículas con energías cercanas a 4×10^5 GeV. Derecha: histogramas comparativos del flujo de muones sobre la base (azul) y el pico (rojo) del sitio de ANDES. Se obtuvo un flujo de muones de aproximadamente $(128.2 \pm 0.4) \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ sobre el pico y de $(125.7 \pm 0.4) \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ sobre la base. En el panel de la esquina superior derecha se observa el cociente por cada bin de energía entre el flujo de muones en la base y en el pico. Para energías hasta aproximadamente un orden de 10^4 se puede observar que el cociente se mantiene aproximadamente en 1. Para energías mayores el cociente se encuentra aproximadamente entre 0 y 1.5.

flujo de primarios con la energía ($\sim E^{-3}$); **límite inferior de energía de secundarios:** 800 GeV a fin de optimizar el tiempo de simulación; **tipo de detector:** detector volumétrico (el flujo sigue una distribución del tipo $\sin^2(\theta)$).

En primer lugar, se integró el flujo de todos los primarios en el rango de $Z = 1$ (protones) a $Z = 26$ (hierros) en un tiempo total de 90 días y se aproximó el espectro de inyección de cada especie por una función de la forma $j(E, Z) = j_0(Z) E^{\alpha(E, Z)}$ según trabajos previos [6]. En la Fig. 2 (izquierda) puede observarse la comparativa de dos histogramas de energía que corresponden a la simulación sobre la base y sobre el pico respectivamente. A su vez, en la Fig. 2 (derecha) se encuentra la misma gráfica comparativa pero sólo para el flujo de muones sobre cada sitio. El flujo total resulta un 14.3% mayor en el pico que en la base, pero en el flujo de muones de alta energía esta diferencia decrece a un 2%, siendo igualmente mayor el flujo en el pico. Esto indica que la tasa de pérdida de energía de los muones en su recorrido a lo largo de la atmósfera resulta significativamente menor que la de la mayoría de las otras partículas que componen la lluvia [8]. En el rango de energías considerado para los secundarios, $E_s > 800$ GeV, el flujo de muones sobre el pico resultaría de aproximadamente $128.2 \pm 0.4 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ y sobre la base de $125.7 \pm 0.4 \text{ día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Además de los muones, las otras partículas que forman parte de la lluvia atmosférica extendida, por ejemplo las que conforman la componente hadrónica, también podrían resultar una fuente de señal de ruido. Sin embargo, este trabajo explora la componente muónica por ser estos los que tienen mayor probabilidad de llegar al laboratorio debido a que son las que tienen una menor tasa relativa de pérdida de energía [8]. En cuanto a otras partículas, por ejemplo, piones, podrían decaer en muones en el interior de la roca. De hecho, en la Fig. 2 de la izquierda que representa el flujo de todas las partículas, se puede ver la presencia de un flujo reducido de piones en energías cercanas a 4×10^5 GeV pero este flujo resulta 4 órdenes menor al de muones, con lo cual en este estudio no se

los considera.

Dirección de arribo de los muones

Conociendo la dirección de los muones con respecto al eje z , es decir, su ángulo cenital, se consideró como “dispersión” la diferencia entre el ángulo cenital del primario que lo generó y el del muón. Este estudio fue de importancia para el objetivo principal de este trabajo por dos motivos: en primer lugar, el ángulo de incidencia de cada muón determinaría el camino a recorrer por la partícula en el modelo de la montaña y así también su pérdida de energía. En segundo lugar, la dispersión de los muones con respecto a su partícula primaria da una idea de la capacidad de deflexión de los muones en su camino a través de la roca.

A partir de la distribución de lo que se denominó “dispersión” se calcularon el valor medio y la desviación estándar de la misma obteniendo $\bar{\theta} = 0^\circ$ y $\sigma = 0.04^\circ$. Estos valores permiten estimar que los muones altamente energéticos no se desvían en grandes ángulos con respecto a su primario, es decir que en su transcurso a través de la atmósfera mantienen una dirección aproximadamente constante.

Energía mínima de penetración y porcentaje de pérdida de energía

La distancia mínima de cobertura que presentará el laboratorio son 1700 m. A partir de este hecho y en base a los valores tabulados de poder de frenado de muones en roca [8], se estimó la energía mínima necesaria que requiere una partícula para atravesar 1700 m de roca estándar $\rho = 2,6 \text{ g cm}^{-3}$. Se encontró esta energía en un valor alrededor de los 3 TeV.

Considerando que el poder de frenado depende de la energía inicial de la partícula resultó necesario conocer esta energía mínima de penetración al laboratorio para configurar las simulaciones de EAS en CORSIKA, en particular para establecer un límite inferior para la energía de las partículas secundarias y así optimizar las simulaciones.

Además, se estudió la variación de pérdida de energía en función de la densidad del material para tres partículas de

TABLA 1: Pérdida de energía (GeV) en roca para tres partículas de distinta energía inicial: 800 GeV, 1000 GeV y 3000 GeV, estudiada sobre 100 m de roca de densidades: $1,5 \text{ g cm}^{-3}$, 2 g cm^{-3} y $2,5 \text{ g cm}^{-3}$.

Energía inicial	$1,5 \text{ g cm}^{-3}$	2 g cm^{-3}	$2,5 \text{ g cm}^{-3}$
800 GeV	83.5(10.4%)	110.2(13.8%)	136.3(17%)
1000 GeV	96.1(9.6%)	126.7(12.7%)	156.7(15.7%)
3000 GeV	222.6(7.4%)	293.6(9.9%)	363.1(12.1%)

distinta energía inicial: 800 GeV, 1000 GeV y 3000 GeV. En la Tabla 1 pueden verse los resultados de este estudio. Lo que se observa es una mayor pérdida de energía cuanto mayor es la energía inicial de la partícula, lo cual concuerda con los esperados según los estudios realizados en trabajos previos [8] para energías de estos órdenes, donde la curva de la aproximación de desaceleración continua es creciente.

Transferencia en la aproximación de desaceleración continua

Teniendo ya un modelo aproximado de la estructura montañosa que el flujo sobre la ladera debería atravesar para llegar al laboratorio se procedió a programar en lenguaje Python una función de transferencia de flujo para los muones. Los pasos del algoritmo fueron los siguientes: se tomaba un muon de las simulaciones y según su ángulo cenital se seleccionaba el camino que recorre dentro de la montaña. Luego, el muon seleccionado avanza 1 cm o 1 m según la derivada de la función del poder de frenado en la roca y se calcula su pérdida de energía. Entonces, si la energía del muon llega a 0 se lo descarta y se toma el siguiente muon, si no, avanza nuevamente. Para cada muon se repite este proceso hasta que su energía llega a 0 o hasta que alcanza la profundidad del laboratorio. Un diagrama de flujo del algoritmo explicado puede encontrarse en la Fig. 3.

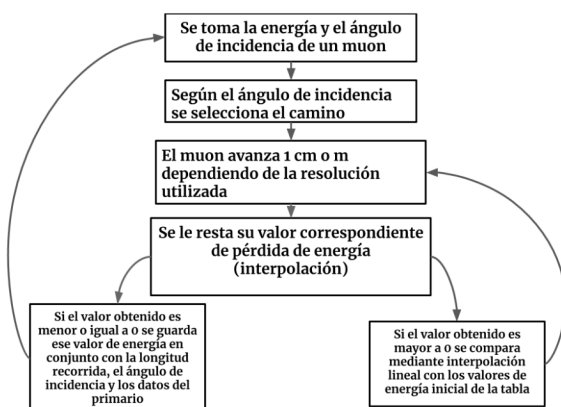


FIG. 3: Método utilizado para estimar la energía mínima necesaria para que el flujo de radiación alcance el laboratorio en base a los datos aportados por la tabla de poder de frenado [8]: mediante iteraciones se recorren todos los valores de energía inicial de la tabla de poder de frenado para roca estándar. A cada uno de estos valores de energía se le resta su poder de frenado total. Si la energía resultante es menor a cero significa que la partícula no seguirá avanzando. Si la energía resultante es mayor a cero se interpola este valor con la primera columna de la tabla y se repite el proceso.

Opacidad

A partir de la definición (1) es posible estudiar la opacidad direccional de la cobertura rocosa para así determinar la función de transferencia de los muones a lo largo de la montaña. De esta forma el flujo resultante en el laboratorio será una combinación de la opacidad de la montaña y del flujo de partículas que llegan a la superficie. Se calculó el mapa de opacidad en función del ángulo cenital de la montaña para un observador ubicado en el laboratorio, tal como se muestra en la Fig. 4.

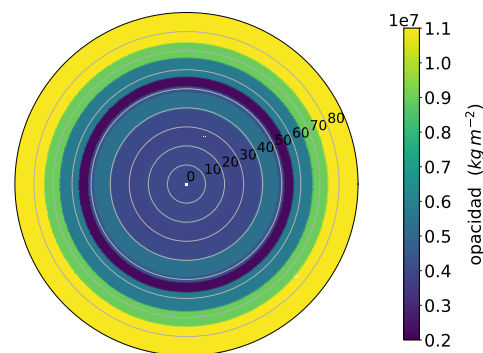


FIG. 4: Mapa de opacidad de la cobertura de roca de ANDES teniendo en cuenta la geometría de la cara con menor cobertura, la distribución rocosa interna y bajo la suposición de simetría acimutal.

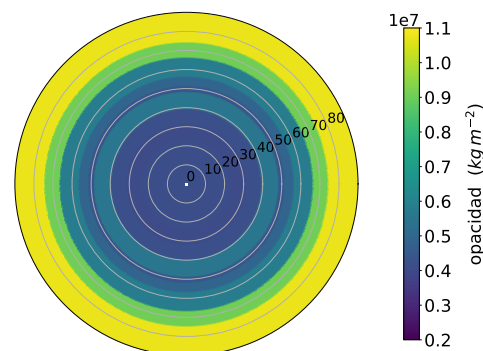


FIG. 5: Mapa de opacidad de una montaña con la misma geometría que la cobertura de ANDES pero compuesta en su totalidad por roca estándar ($\rho = 2.6 \text{ g cm}^{-3}$). Se puede ver que la menor opacidad se presenta entre los 0° y los 40° , encontrándose también una atenuación en los 50° pero no tan pronunciada como cuando se tienen en cuenta los distintos estratos de la montaña.

En este mapa puede observarse que a partir de los ángulos cercanos a la vertical la opacidad decrece hasta llegar a un mínimo en aproximadamente los 50° . A partir de este ángulo comienza a aumentar nuevamente, encontrándose en un valor máximo entre los 70° y los 90° . Además, se calculó el mapa de opacidad para una montaña con la misma geometría pero considerando que estuviera formada en su

totalidad por roca estándar ($\rho = 2.6 \text{ g cm}^{-3}$). Este estudio se realizó con el fin de caracterizar la influencia de las distintas densidades. El mapa resultante puede verse en la Fig. 5.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución Angular

A partir de la identificación de la energía y dirección de propagación de cada secundario transferido, se determinó la distribución angular del flujo de muones esperado en el laboratorio. En la Fig. 6 puede verse un histograma con los mismos intervalos angulares que se usaron para la función de transferencia. En esta figura puede observarse una mayor incidencia de partículas desde el pico cuyo flujo se atenúa a medida que aumenta el ángulo cenital.

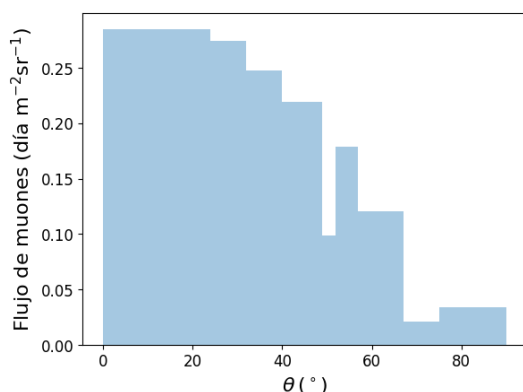


FIG. 6: Histograma del flujo de muones $\text{día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ en el interior del laboratorio en función de sus ángulos de incidencia. Puede observarse un flujo mayor ingresando desde las direcciones más verticales, lo cual concuerda con la estructura de opacidad de la montaña

Este resultado concuerda con lo esperado según el mapa de opacidad presentado en la sección anterior. Al tener en cuenta la geometría de la montaña, cuyo radio de base es mayor que el doble de su altura y que los estratos más densos se encuentran en la base de la montaña, es esperable que desde estas direcciones se observe una atenuación pronunciada del flujo de muones.

Flujo total de muones esperado en el laboratorio

Una vez realizada la transferencia en roca, se obtuvo la cantidad de partículas que ingresan al laboratorio etiquetadas cada una de ellas con su energía resultante al final de la transferencia, es decir, la energía con la que llegarían al laboratorio. Luego, a partir de estos datos se realizaron histogramas de la distribución de energías de estas partículas. En la Fig. 7 se encuentra el total del flujo, donde puede observarse que las partículas abarcan un rango de energías desde el orden de 1 GeV hasta el orden de los 1000 GeV encontrándose el valor medio para estas energías en 243 GeV.

Una vez que se normalizó el flujo total por los 90 días de simulación y por unidad de ángulo sólido, se obtuvo un flujo de (1.47 ± 0.02) muones por $\text{día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$.

Este resultado resulta relevante a la hora de evaluar la atenuación ocasionada por la montaña dentro del laboratorio, que se esperaba que fuera del orden de 10^{-7} [1]. En primer lugar, el corte de energía de los secundarios en 800 GeV y

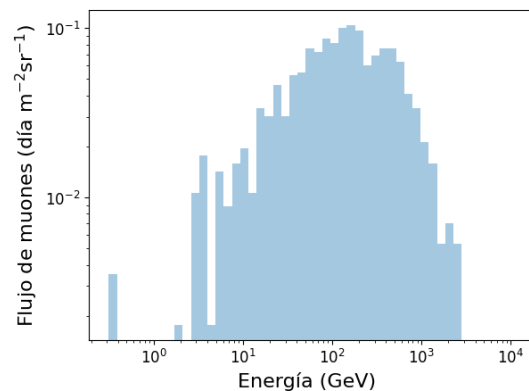


FIG. 7: Distribución total de la energía en el interior del laboratorio con un valor medio de la energía de 243 GeV y un total de (1.47 ± 0.02) por $\text{día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Este resultado concuerda con la atenuación de 10^{-7} esperada en el laboratorio [1].

el hecho de que se trabajó únicamente con muones reduce la cantidad de partículas a un orden de 10^5 , y en segundo lugar, los muones con posibilidades de alcanzar el laboratorio son del orden de 1 en 100 en total, este cálculo confirma las estimaciones iniciales.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizaron estudios acerca del blindaje de astropartículas en el laboratorio subterráneo ANDES, los cuales implicaron: dos simulaciones de tres meses de flujo cada una utilizando los Softwares CORSIKA y ARTI para los sitios designados como el pico y la base de la montaña bajo la cual se encontrará el laboratorio. Y además un análisis de la variación de la pérdida de energía de tres muones de energías iniciales de 800 GeV, 1000 GeV y 3000 GeV. Se observó que para una misma energía el efecto de la densidad sobre la pérdida de energía está entre un 3% y un 4% cada 0.5 g cm^{-3} .

Partiendo del modelo geológico de la montaña, se estimó la función de transferencia direccional del flujo de muones en su propagación por el interior de la montaña en la aproximación CSDA. De esta forma, se determinó que el flujo esperado de muones en el interior del laboratorio subterráneo ANDES será de (1.47 ± 0.02) por $\text{día}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$.

REFERENCIAS

- [1] C. O. Dib, X. Bertou, O. Civitarese, J. C. D'Olivo y D. A. J. C. *The ANDES Underground Laboratory*. (NuFact15, 2015).
- [2] C. Aalseth, P. Barbeau, J. Colaresi, J. Collar, J. Diaz Leon, J. Fast, N. Fields, T. Hossbach, A. Knecht, M. Kos, M. Marino, H. Miley, M. Miller, J. Orrell y K. Yocum. Search for An Annual Modulation in Three Years of CoGeNT Dark Matter Detector Data. arXiv:1401.3295v1 (2014).
- [3] M. Arribere, H. Asorey, X. Bertou, M. Gómez Berisso y F. Sánchez. *Expected Backgrounds at the ANDES Underground Laboratory* (3rd international workshop for the design of the ANDES underground laboratory, 2012).
- [4] Lombardi S.A and Ingenieros Consultores. *Nuevo Estudio Conceptual, ANDES (CLAF - Centro Latinoamericano de Física, 2015)*.

- [5] H. Asorey, L. A. Núñez y M. Suárez-Durán. Preliminary Results From the Latin American Giant Observatory Space Weather Simulation Chain. *Space Weather* **16**, 461-475 (2018).
- [6] R. Calderón-Ardila, A. Jaimes-Motta, J. Peña-Rodríguez, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán y A. Vásquez-Ramírez. *Modeling the LAGO's detectors response to secondary particles at ground level from the Antarctic to Mexico* (2019).
- [7] H. Asorey. *Los Detectores Cherenkov del Observatorio Pierre Auger y su Aplicación al Estudio de Fondos de Radiación* Tesis doct. (Instituto Balseiro, 2012).
- [8] D. E. Groom, N. V. Mokhov y S. I. Striganov. Muon Stopping Power and Range Tables 10 MeV–100 TeV. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **78**, 183-356 (2001).
- [9] M. Aartsen, K. Abraham, M. Ackermann, J. Adams, J. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, T. Anderson, M. Archinger y *col.* Characterization of the Atmospheric Muon Flux in IceCube. *Astropart. Phys.* **78**, 1-27 (2016).
- [10] D. Heck y T. Pierog. *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide (Version 7.5xxx from February 26, 2016)* (Karlsruher Institut Fur Technologie (KIT), 2016).
- [11] C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, R. Calderón-Ardila, A. Vásquez-Ramírez, A. Jaimes-Motta, S. Dasso, I. Sidelnik, L. A. Núñez y H. Asorey. *Performance of the LAGO Water Cherenkov Detectors to Cosmic Ray Flux* (2020).
- [12] I. Sidelnik y H. Asorey. LAGO: The Latin American giant observatory. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.* **876**, 173-175 (2017).