



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Física

Estimación del flujo de muones en el laboratorio subterráneo ANDES

Por

**Carmina Pérez Bertolli**

**Director del trabajo:** Dr. Hernán Asorey

**Colaborador:** Mg. Christian Sarmiento Cano

**Lugar de trabajo:** Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas, CAC - CNEA

**Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas**

13/04/2020



TEMA: Estimación del flujo de muones en el laboratorio subterráneo ANDES

ESTUDIANTE: Carmina Pérez Bertolli

L.U. N°: 115/16

LUGAR DE TRABAJO: Instituto de Tecnologías en Detección y Astropartículas

DIRECTORES DEL TRABAJO: Dr. Hernán Asorey

COLABORADOR: Mg. Christian Sarmiento Cano

FECHA DE INICIACIÓN: 01/10/2019

FECHA DE FINALIZACIÓN: 2/04/2020

FECHA DEL EXAMEN: 13/04/2020

INFORME FINAL APROBADO POR:

---

Autor

---

Jurado

---

Director

---

Jurado

---

Colaborador

---

Jurado

---

Profesor de Tesis de Licenciatura



# Estimación del flujo de muones en el laboratorio subterráneo ANDES

## Resumen

Provenientes de explosiones de supernovas, o de agujeros negros de millones de masas solares en el centro de galaxias lejanas y cercanas (incluso de nuestra propia galaxia), las astropartículas arriban a la Tierra en forma permanente. A nivel del suelo, unas decenas de millones de partículas subatómicas impactan cada metro cuadrado en un día. Para proteger de esta radiación a experimentos que pueden ser sensibles a ella se construyen laboratorios subterráneos a miles de metros de profundidad. Sin embargo, a pesar del alto blindaje que ofrece esta ubicación subterránea, podrían llegar a encontrarse un flujo atenuado de esta radiación.

El objetivo de este trabajo fue estimar el flujo diario de muones que podría llegar a presentarse como señal de ruido en los experimentos de detección de neutrinos y búsqueda de materia oscura que se realizarán en el laboratorio subterráneo ANDES. La importancia de esta estimación radica en que al ser experimentos de alta sensibilidad, toda señal de radiación puede perturbar las mediciones. Anteriormente ya se realizó el cálculo por parte de miembros del proyecto ANDES, mediante el cual se estimó un flujo diario de  $1 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Sin embargo, ese estudio tuvo un nivel de precisión menor al realizado en este trabajo ya que en su momento no se contaba con la información necesaria acerca de la estructura de la cobertura rocosa del laboratorio.

Con el objetivo de obtener un resultado de mayor precisión, en este trabajo se realizaron diversos estudios. En primer lugar se estudió la dispersión angular de los muones con respecto a su partícula primaria, observándose que no se presentará contaminación por muones dispersados en ángulos mayores a las dimensiones del estudio. Asimismo, se estimó de manera aproximada la energía más baja requerida por un muon para atravesar la cobertura de roca de la montaña. Esta energía mínima sirvió para establecer un corte en las energías de las partículas secundarias de las simulaciones a realizar y así optimizarlas. También se estudió la pérdida de energía de los muones bajo la aproximación de desaceleración continua. Esto se hizo calculando numéricamente cuánta energía perderían tres partículas atravesando 100 m de rocas de distintas densidades.

Para llevar a cabo estos estudios se realizaron simulaciones de flujo de lluvias atmosféricas extendidas en el sitio del laboratorio. De estas simulaciones, se seleccionaron aquellos muones con probabilidad de llegar al laboratorio en base a su ángulo de incidencia y a la altura a la que llegan. Así, se encontró que el flujo de estos muones es del orden de  $10^2$  por día  $\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ . Luego se modeló una función de transferencia acorde a la estructura de la montaña y al corte de energía mínima elegido a partir al estudio preliminar. Posteriormente el flujo de muones dentro del laboratorio resultó de  $(1,47 \pm 0,02)$  por día  $\text{m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Este resultado es mucho más preciso en comparación con el realizado anteriormente. Se realizó un estudio más minucioso de la estructura de la montaña y conformando el camino recorrido por el flujo de muones en

distintas direcciones. En la estimación anterior sólo se había tenido en cuenta la incidencia de flujo vertical y no se consideró la distribución de densidades en la montaña.



## Agradecimientos

No podría terminar nunca de mencionar a todas las personas con las que me siento profundamente agradecida por todo su apoyo, ayuda y cariño que recibí de ellos a lo largo de mi carrera, en ese sentido creo que soy una persona muy afortunada.

En primer lugar quiero darle las gracias a mi mamá que con todo su amor, su comprensión y su ayuda hizo para mí este camino posible. A mi papá, por su amor y todos sus consejos. Por enseñarme a admirar y respetar el trabajo y la perseverancia. A mis hermanos Catalina y Mateo, mis compañeros de vida y los mejores amigos que puedo pedir, porque me conocen mejor que nadie y siempre están cuando los necesito. A mis hermanitos chiquitos Guada, Antonio y Vicente por ser toda la dulzura que me hace falta y por su cariño incondicional. A mi tía Simone, por hacerme reír hasta en los peores momentos. A Eduardo por las risas, su afecto y sus asados. A mis maravillosos abuelos por mimarme y cuidarme y a toda mi numerosa, ruidosa y hermosa familia, mis tíos, mis primos, por enseñarme a compartir, a discutir, a aceptarnos como somos y querernos.

Quiero darles las gracias a mis directores Christian y Hernán, por darme la oportunidad de realizar este trabajo en un tema que me gusta y entusiasma, por su paciencia, por todo lo que me enseñaron y por su respeto y excelente trato siempre. A Brian por su ayuda durante este trabajo y por darme la oportunidad de seguir trabajando e investigando lo que me apasiona. Y a las autoridades y el personal de Iteda por aceptarme e incluirme en un grupo de trabajo tan unido y lleno de personas admirables.

Le doy las gracias a mi amigo Lucio, por estar en las buenas y en las malas y quererme. A los nuevos amigos que hice en Iteda: Belu, Ana, Gabi, Varada, Steffen, Joaquín, por la diversión, la ayuda y el apoyo. A Felix, por todo su cariño y su apoyo en esta etapa. A mis amigos de la facu: Lauti, Sebas, Cami, Joe, Jime, Chino, Dani y Mari, por ser incondicionales y críticos cuando hizo falta. A todos los chicos del Atolladero Cuántico, mis compañeros de camada que transitaron conmigo este camino. A María Paula y Carla por sus cuidados.

Y por último a los grandes profesores con quienes tuve la suerte de tomar clases.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. El proyecto ANDES	4
2.2. Perfil geológico	9
2.3. Astropartículas	12
2.4. Aproximación de desaceleración continua	16
2.5. Simulaciones de flujo de radiación en el sitio de ANDES	20
<b>3. Metodología, resultados y discusión</b>	<b>24</b>
3.1. Estudio preliminar	24
3.2. Transferencia en la aproximación de desaceleración continua	31
3.3. Opacidad	31
3.4. Distribución angular	34
3.5. Flujo total esperado de muones en el laboratorio	35
<b>4. Conclusiones</b>	<b>38</b>
<b>A. CORSIKA</b>	<b>40</b>
<b>B. Estudio geológico preliminar</b>	<b>42</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>46</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El estudio de astropartículas es de importancia en meteorología del espacio, en física de partículas, para determinar la radiación al nivel de la superficie terrestre y en muchas otras disciplinas. Las astropartículas que llegan a la Tierra interactúan con la atmósfera y generan gran cantidad de partículas secundarias. Muchas de ellas arriban a la superficie. Entonces, para proteger de esa radiación cósmica a experimentos que requieren extrema sensibilidad en las mediciones, la comunidad científica está construyendo laboratorios subterráneos miles de metros bajo tierra.

ANDES (Agua Negra Deep Experiment Site) es un proyecto propuesto por un grupo de científicos argentinos en 2012 y se trata de la construcción de un laboratorio de este tipo. 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 particular, en este trabajo se estimará el fondo de muones presente en el interior del laboratorio subterráneo ANDES, lo cual resulta de utilidad debido a los experimentos de detección antes mencionados para los cuales este fondo de muones será tratado como señal de ruido.

Una estimación previa de este flujo fue realizada por miembros de la colaboración a cargo del proyecto ANDES. En ese estudio se concluyó que en principio podría esperarse un flujo de 1 por día por  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$  [1]. Sin embargo, al momento de realizar esta estimación el equipo de ANDES aún no contaba con los estudios de estructura de la montaña necesarios para una estimación más precisa. Por esta razón esta estimación se realizó solamente para partículas incidentes desde la vertical, considerando que la roca de la montaña tendría una densidad homogénea, y simulando el flujo de secundarios únicamente a la altura del pico de la montaña. El objetivo de este trabajo fue refinar hacia un punto de mayor exactitud los modelos conformados para realizar esta estimación.

Se contó con un estudio geológico preliminar de la estructura de la montaña [2]. Y se realizaron simulaciones de flujo de secundarios a dos alturas diferentes considerando las ubicaciones del pico y la base de la montaña. Luego, para estimar la atenuación de este flujo, se estudió su propagación en varias direcciones distintas dentro de la montaña variando el ángulo cenital de incidencia y variando el modelo atmosférico utilizado para las simulaciones hacia otro más similar al del sitio de ANDES.

Para contar con una descripción detallada del flujo de secundarios sobre el sitio del laboratorio se utilizará el software de simulación CORSIKA (COsmic Ray SIMulations for KAscade) (versión 7.5600)[3], [4] ampliamente utilizado y validado en el estudio de astropartículas con apoyo del paquete ARTI, creado para la colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory)[5], para optimizar y facilitar el proceso de simulación como se describe en el capítulo 2.

También en el capítulo 2, se da una descripción de la aproximación en que nos basaremos para simular la transferencia en roca de los muones. La aproximación de desaceleración continua da una descripción de la pérdida de energía que sufren los muones a medida que atraviesan un material, que en el caso de este estudio serán rocas de distintos tipos.

Antes de realizar la transferencia en roca de las partículas diversos estudios preliminares fueron necesarios a fin de refinar lo mejor posible la estimación. Estos constaron de una comparativa entre las simulaciones a ambas alturas, un estudio de la dispersión angular de los muones con respecto a su partícula primaria ya que el ángulo de incidencia determinaría el camino a recorrer por el flujo dentro de la montaña y a fin de estimar la presencia de contaminación de muones altamente desviados. Además se realizó también una estimación de la energía más baja que necesitaría una partícula para atravesar la distancia mínima en roca de cobertura del laboratorio (1700 m) para establecer un corte en la energía de las partículas secundarias de las simulaciones a fin de optimizar el tiempo de trabajo. Y por último un estudio de la variación de la pérdida de energía para tres partículas de distintas energías iniciales que atraviesan 100 m de rocas de tres densidades diferentes. Estos estudios preliminares se encuentran detallados en el capítulo 3.

Luego de las estimaciones preliminares y en base al estudio geológico antes mencionado se conformó un modelo aproximado de la distribución de estratos de distintos tipos de roca en la montaña y en base a este modelo se trazaron los distintos posibles caminos que recorrería el flujo de muones a través de la montaña incidiendo desde distintas direcciones. A su vez, utilizando las tablas de pérdida de energía de [6] y la estructura de los caminos que se modelaron se programó en lenguaje Python una función de transferencia que tomaría como datos de entrada los archivos finales de flujo que provee ARTI y mediante iteración analizar la pérdida de energía de cada partícula (sólo muones) a través de su recorrido en el interior de la montaña, definido por su

ángulo de incidencia. Tanto el modelo del perfil geológico como una descripción más detallada del programa para la función de transferencia se encuentran en el capítulo 3.

Entonces, a partir de los estudios preliminares y de la función de transferencia modelada, se logró estimar con un nivel de precisión mayor al alcanzado anteriormente el flujo diario de muones en el interior del laboratorio, además, en el capítulo 3 se da una descripción de la distribución de energías de estos muones y de la distribución de direcciones por las que arriban al laboratorio. En el capítulo 4 están presentadas todas las conclusiones del trabajo así como también las propuestas a futuro para alcanzar un nivel de precisión aún mayor en este resultado.

Por último, en el apéndice A se da una descripción de las características básicas de CORSIKA, el software de simulación que se utilizó para estimar el flujo de partículas secundarias sobre el sitio de ANDES.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. El proyecto ANDES

ANDES es un laboratorio subterráneo propuesto para ser construido dentro del túnel del paso de Agua Negra debajo de las montañas de los Andes en la frontera entre Argentina y Chile. Será el 3<sup>er</sup> laboratorio más profundo del mundo después de CJPL (2400 m de profundidad) ubicado en la provincia de Sichuan en China y de SNOLAB(2000 m de profundidad) ubicado cerca de Ontario, Canadá y el más profundo en el hemisferio Sur, seguido por SUPL(1000 m) en Stawell, Australia, que también se encuentra en etapa previa a la construcción, ver figura(2.1). A estas profundidades sólo unas pocas partículas subatómicas son capaces de penetrar las capas rocosas, permitiendo a los científicos estudiar con interferencias del orden de 1 evento por día por  $m^{-2}$  las propiedades de partículas con interacciones tan débiles que podrían atravesar millones de kilómetros de roca sin verse afectados, como los neutrinos, o estudiar la materia oscura.

Ahora bien, la profundidad a la que se encuentran los laboratorios es una característica que da una idea del nivel de cobertura contra radiación cósmica que tendrá el interior del mismo pero también es importante en este sentido la densidad y el tipo de material que conforma la cobertura. Es por eso que es preciso definir el concepto de profundidad equivalente en metros de agua que propone calcular el equivalente a una cobertura de agua para cada laboratorio en función de la profundidad a la que se encuentran y la densidad del material sobre ellos. En la figura 2.2 puede verse una comparativa para distintos laboratorios del flujo de muones en su interior vs. su profundidad en km de agua.

En el caso particular de ANDES, además del beneficio de la profundidad una ubicación en el sur es valiosa por diversos motivos, por ejemplo, en búsqueda de materia oscura ayudaría a



Figura 2.1: Puntos naranja: ubicación de los principales laboratorios subterráneos en el hemisferio Norte siendo los más profundos CJPL (2400 m de profundidad), China y SNOLAB (2000 m de profundidad), Canadá. Estrellas rojas: sitios donde se ubicarán los laboratorios subterráneos del hemisferio Sur, ANDES en Argentina y SUPL en Australia.

eliminar el ruido de fondo estacional observado anualmente en modulaciones en experimentos en el hemisferio norte. Por ejemplo, en el experimento CoGeNT ubicado en el laboratorio subterráneo de Sudán se han hecho estudios de esta modulación con un detector de Germanio encontrando un exceso de eventos en ciertas regiones del espectro de energía [7]. Un sitio adicional en el sur (SUPL en Australia) será también valioso para estudiar cómo los neutrinos oscilan al viajar a través de la Tierra.

Otra característica especial del sitio de ANDES es el bajo ruido de fondo de neutrinos proveniente de reactores nucleares, lo cual es una gran ventaja debido a que estos neutrinos son la principal fuente de ruido de fondo en detección de geoneutrinos, y su ubicación en la corteza terrestre cerca de la subducción de las placas tectónicas del Pacífico y Continental, cuestiones que podrían ser relevantes para los estudios de geoneutrinos [8] y otros estudios geofísicos de interés.

Entonces, ANDES será lugar para experimentos de colaboraciones internacionales dentro de las

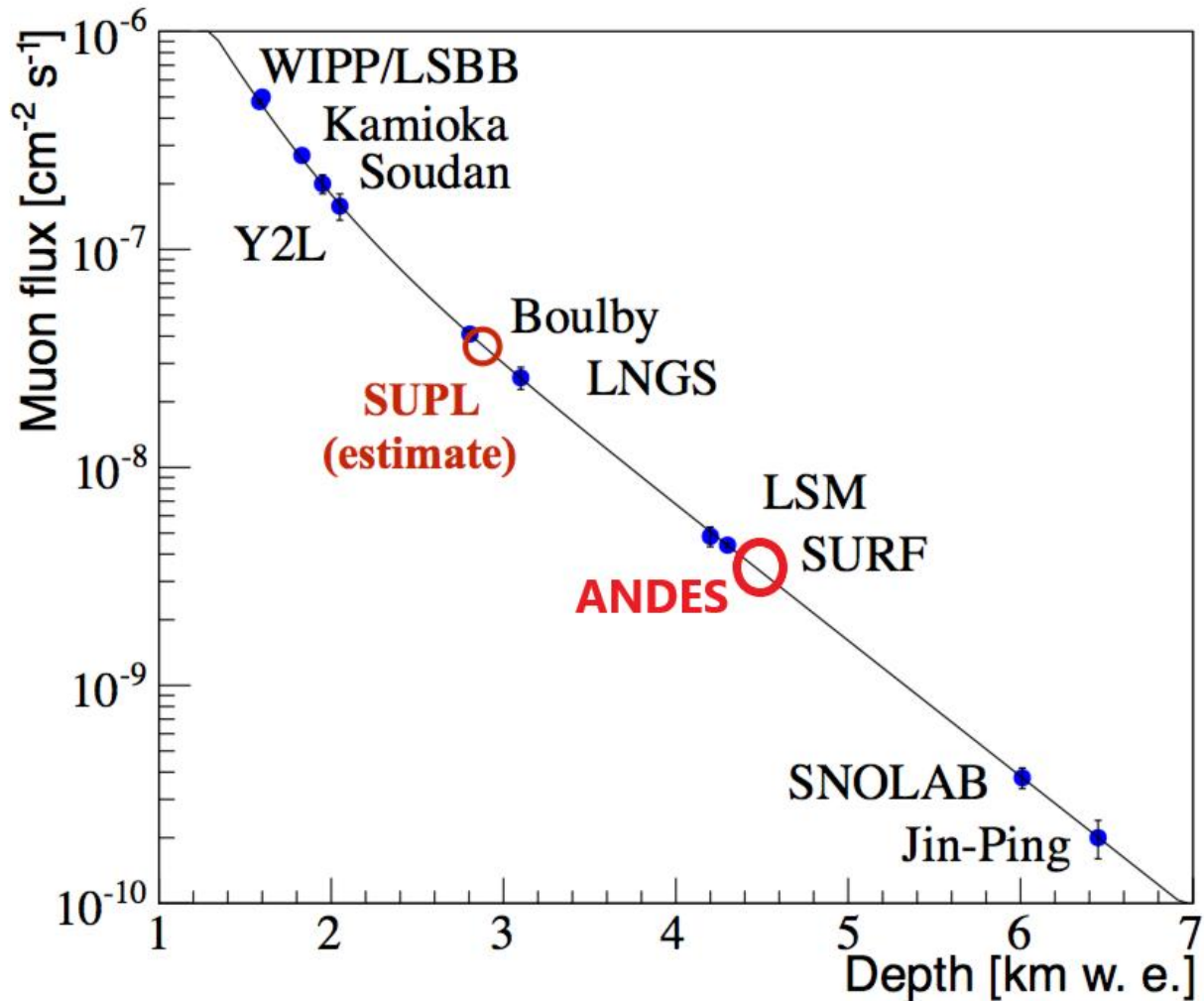


Figura 2.2: Flujo de muones vs. profundidad en km de agua para distintos laboratorios subterráneos. En rojo: ANDES y SUPL, únicos laboratorios propuestos para el hemisferio sur hasta la fecha.

áreas de física de partículas y astropartículas pero también albergará experimentos de sismología, geología, geofísica y biología [9]. La propuesta aprovecha la construcción prevista del túnel vial que conectará Argentina y Chile a través de la Cordillera de los Andes entre la provincia de San Juan (Argentina) y la región de Coquimbo (Chile) a una latitud 30.19° S y una longitud 69.82° O. Para este propósito se ha conformado el consorcio latinoamericano CLES (Consortio Latinoamericano de Estudios Subterráneos), una entidad formada por los países participantes. Los países que forman



parte de este consorcio hasta el momento son Argentina, Brasil, Chile y México.

Además, el laboratorio subterráneo estará ubicado a 4 km de la entrada de Chile, en el lado sur del límite Este del túnel, donde la cadena montañosa es más alta, proveyendo una cobertura vertical de 1750 m de roca y una cobertura omnidireccional de no menos de 1700 m (figura 2.3, izquierda) proporcionando una atenuación del orden de  $10^{-7}$  para el flujo atmosférico de muones. El paso actual se encuentra a una altura de 4870 m s.n.m y se encuentra cerrado la mayor parte del año debido a las condiciones climáticas. Será un sistema de dos túneles paralelos de 14 km de longitud con dos carriles cada uno, con una separación de casi 100 m y conectados cada 500 m con galerías para peatones y cada 1500 m para vehículos de emergencia. La entrada chilena estará a una altitud de 3600 m s.n.m y la entrada argentina a 4080 m s.n.m., proporcionando así una pendiente del 3% para Ventilación y drenaje natural. El consumo total de energía para el túnel, incluyendo ventilación de emergencia, se estima en cerca de 15 MW. En la figura 2.3 a la derecha se encuentra un plano detallado del laboratorio, y en la figura 2.4 se encuentra un mapa de parte del túnel que conducirá al laboratorio.

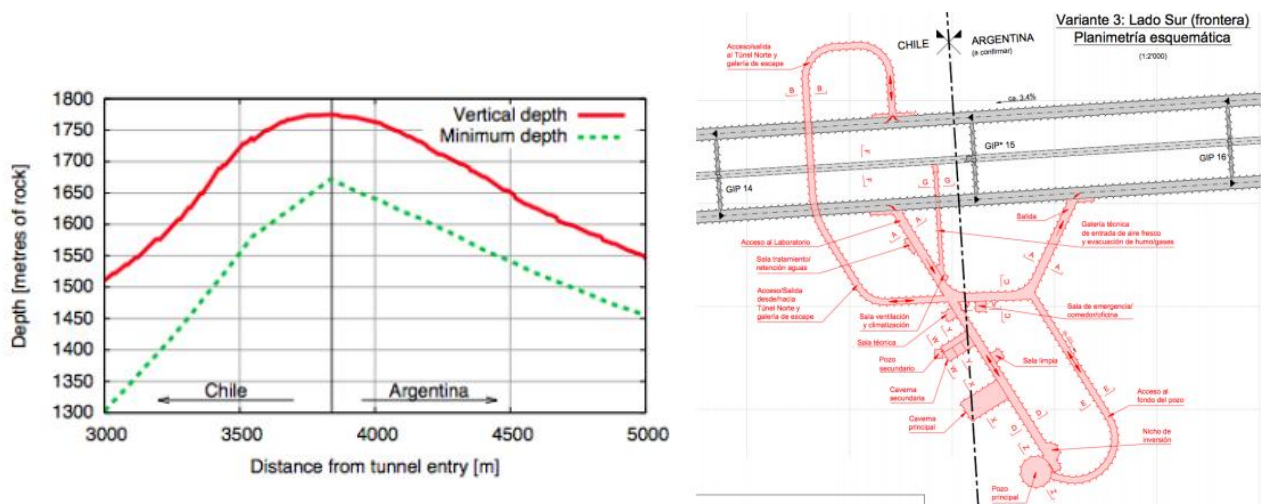


Figura 2.3: Izquierda: Cobertura vertical y omnidireccional de roca vs. la ubicación del laboratorio en metros desde la entrada de Chile. (Figura extraída de [9]). Derecha: Esquema del interior del laboratorio visto desde arriba donde se aprecian los túneles de acceso y las cámaras donde irán alojados los distintos experimentos (propuesto en [2]).

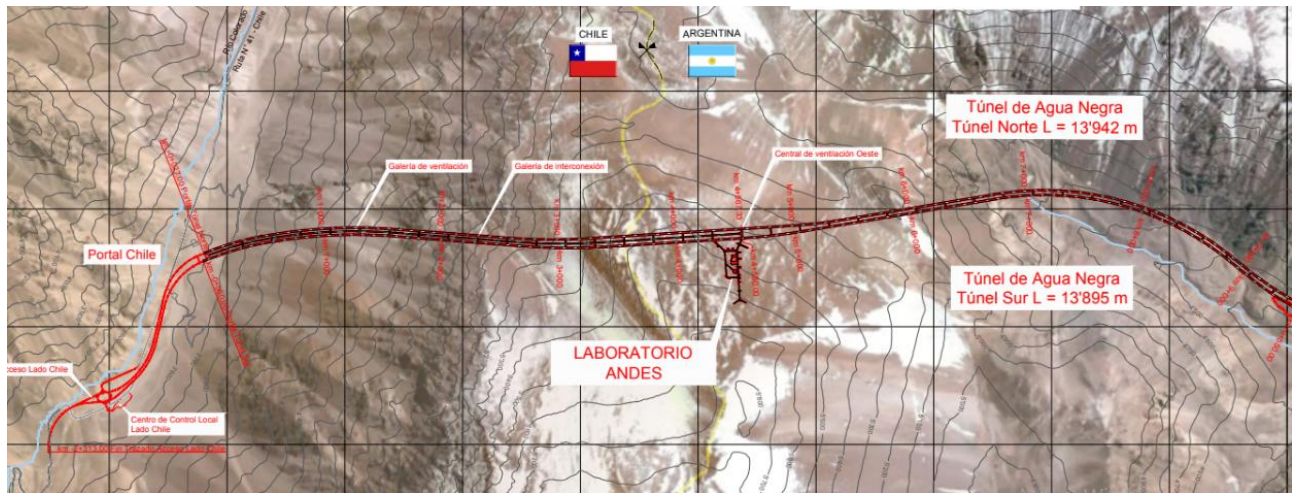


Figura 2.4: Mapa de parte del túnel en el paso de agua negra que conectará Argentina y Chile donde puede verse dónde se encontrará ubicado el laboratorio subterráneo ANDES [2]

Por último, el programa científico preliminar en ANDES considera:

**Física de neutrinos:** estos experimentos son emblemáticos en muchos laboratorios subterráneos, por ejemplo, en el laboratorio Canadiense SNOLAB se encuentran experimentos como SNO+ [10] y HALO [11] que se enmarcan en esta disciplina y que tienen la ventaja de la atenuación que ofrece la profundidad del laboratorio. En ANDES hay una propuesta para instalar un detector de neutrinos de centelleo líquido de 3 kton, para estudios de geoneutrinos y neutrinos de supernovas, entre otras fuentes. Este detector de gran tamaño estaría ubicado dentro de la caverna principal. Además, hay propuestas para instalar experimentos de desintegración nuclear doble beta sin neutrinos, la mayoría de los cuales son considerablemente más pequeños, para ubicarse en algunas de las otras cavernas [8],[9].

**Búsquedas de materia oscura:** La expansión del universo fue propuesta y observada por Le-maître y Hubble a principios del siglo pasado. La observación de la radiación de fondo de microondas, remanente del big-bang terminó de establecer a ese como el modelo cosmológico de referencia. La reciente y sorprendente evidencia sobre la aceleración en la expansión del Universo indica que su contenido de materia y energía es mayor al que se estimaba: en forma observacional sólo puede justificarse un 4.4 % de esa cantidad de materia y energía, siendo el resto (95.6 %) consideradas como materia (21 %) y energía (74 %) oscuras[12]. ¿Qué partículas componen la materia oscura en el Universo? es una de las preguntas más destacadas en

cosmología y física de astropartículas. Los candidatos más firmes propuestos son los axiones, los neutrinos estériles masivos, y los WIMPs (weakly interacting massive particles) [13], que incluyen las LSPs (lightest supersymmetric particles), cuyo candidato natural son los neutralinos. Existen ya muchas técnicas experimentales y se siguen proponiendo nuevas. Estas técnicas son sensibles a distintos rangos de masas para las hipotéticas partículas de materia oscura, por lo tanto la diversidad de técnicas es todavía necesaria. Algunos experimentos han afirmado ver señales que se modulan con un período de un año, posiblemente debido a la variación del viento de materia oscura mientras la tierra gira alrededor del Sol. Para descartar posibles ruidos de efectos estacionales, se podrían hacer detecciones similares en un sitio del Sur como ANDES[9].

**Astrofísica nuclear:** El ambiente de baja radiación de ANDES también permite estudios de física nuclear de bajas energías. Estos experimentos requieren de aceleradores de baja energía en ambientes de baja señal de ruido para estudiar reacciones nucleares de muy baja sección eficaz como los experimentos llevados a cabo en el laboratorio subterráneo Gran Sasso por la colaboración LUNA[14].

**Mediciones de baja radiación:** la instrumentación de baja señal de ruido en sitios bajo tierra tiene nuevas aplicaciones y utilidades para la industria y para medidas de trazas de indicadores y contaminantes aplicados a estudios ambientales.[9]

**Estudios biológicos y geofísicos en entornos de baja radiación:** la cordillera de los Andes es un sitio tectónicamente activo en el planeta, con gran cantidad de actividad sísmica lo que provee un entorno ideal para estudios de estos aspectos. También estudios biológicos que requieran entornos especiales de baja radiación serán albergados en el laboratorio. [9]

## 2.2. Perfil geológico

El laboratorio se encontrará dentro de la formación geológica denominada Grupo Choiyoi, compuesta en su mayoría por riolitas porfídicas y dacita, ambas rocas volcánicas formadas esencialmente por cuarzo, plagioclasas, feldespata y biotita [2].

A pesar de que en su mayoría la cobertura de roca está formada por Riolita (densidad  $\approx 2,6 \text{ g cm}^{-3}$ ), mediante un estudio geológico preliminar realizado por la empresa minera Lombardi [2], se encontraron sustratos con rocas de distintas densidades en el interior de la montaña.

Para comenzar a crear un modelo de transferencia de flujo de partículas a través de la montaña en primer lugar se consideró cuál sería el camino recorrido por un flujo de partículas que incide verticalmente sobre la montaña, es decir, desde el pico de la montaña con ángulo cenital  $0^\circ$  y atravesando todos los estratos. Y se estimó que el camino recorrido sería (se puede ver en la figura 2.6 y en el apéndice B):

- 305 m de Formación Doña Ana: compuesta en su mayoría por tobáceas e ignimbritas volcánicas, ambas con una densidad de  $\approx 2,35 \text{ g cm}^{-3}$ .
- 115 m de Tobácea volcánica.
- 49 m de Basalto: de una densidad de  $2,73 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$ .
- 124 m de tobácea.
- 57 m de riolita porfírica: con una densidad de  $2,64 \pm 0,07 \text{ g cm}^{-3}$ .
- 270 m de tobácea.
- 70 m de andesita porfírica: con una densidad de  $2,67 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$ .
- 172 m de tobácea.
- 540 m de riolita.

hasta alcanzar el laboratorio. Los valores de densidades fueron extraídos de [2].

Además se realizó un estudio del perfil montañoso general del sitio en el cual se observó que el pico bajo el cual se encontraría el observatorio presenta otros picos vecinos más altos del lado argentino del mismo, los cuales actuarían como un filtro previo del flujo de radiación en esa dirección como puede verse en la figura 2.5. Por lo tanto para la transferencia se tomó como primer modelo el corte BB' (ver el apéndice B) . Este corte corresponde a la ladera del “lado argentino” del pico pero si se considera simetría azimutal en los estratos de la montaña puede pensarse que es igual a la ladera del “lado chileno”, que es en el cual se desea realizar el análisis de transferencia.

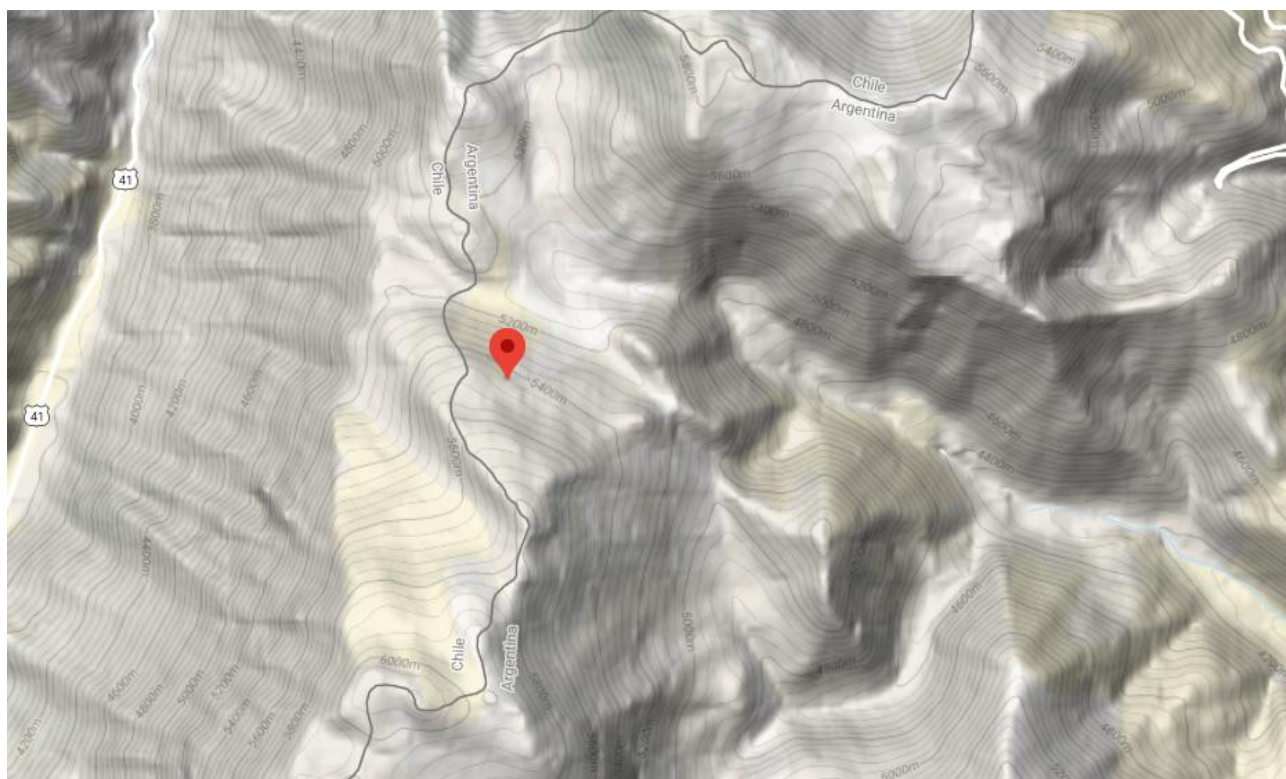


Figura 2.5: Mapa con curvas de nivel del sitio donde se encontrará el laboratorio y sus alrededores donde hemos señalado su ubicación.

Además de considerarse simetría acimutal se consideró que los distintos estratos continúan horizontalmente hasta la superficie como se muestra en la figura 2.6.

A partir de estas últimas consideraciones se trazaron 8 intervalos angulares desde el sitio donde se encontrará el laboratorio hacia la ladera del pico como puede verse en la figura 2.6. Estos intervalos determinan los distintos caminos que se utilizarán para la transferencia de radiación. La distancia recorrida en cada uno de ellos corresponde a la bisectriz del intervalo angular. Por ejemplo, si una partícula ingresara entre los  $57^\circ$  y los  $67^\circ$  atravesaría 828 m de tobácea volcánica y 1070 m de riolita porfírica.



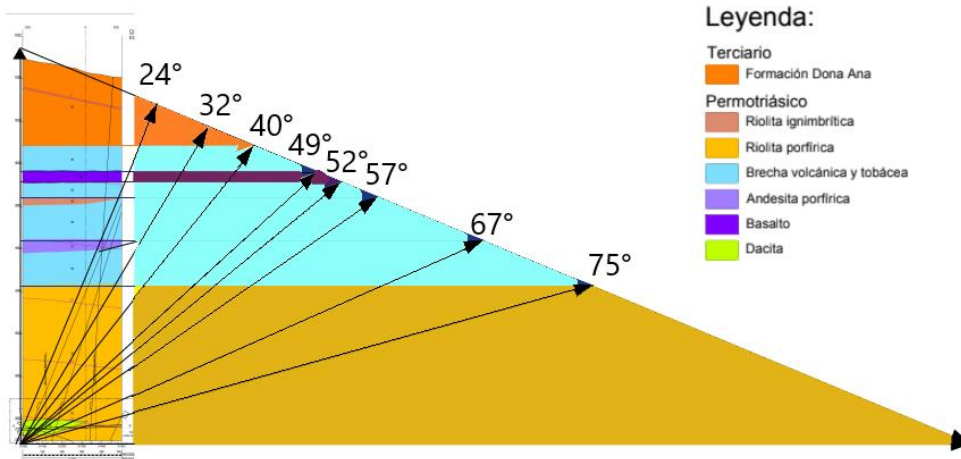


Figura 2.6: Modelo aproximado de la distribución de estratos en la montaña y caminos y ángulos de incidencia para el flujo que fueron considerados en la transferencia.

El criterio para elegir los distintos caminos que recorrerán las partículas fue el cambio en cantidad de estratos montañosos recorridos. De esta manera se consiguió modelar de forma aproximada el recorrido de las partículas que alcanzan la superficie de la montaña cuando atraviesan la roca para poder calcular el flujo que llega al laboratorio, la energía con la que llegan y sus respectivas especies, siendo estas en su mayoría muones. A la hora de realizar aproximaciones se consideró siempre el “peor” caso posible, es decir, el escenario en que el flujo en el laboratorio podría ser mayor (aproximando magnitudes como distancias, densidades de rocas, etc.)

Como se verá más adelante en este capítulo, la pérdida de energía de las partículas y eventualmente su frenado dependen de la especie y energía inicial de la partícula y también de las características del material en el cual se propagan, más específicamente, su densidad y la longitud que recorre la partícula dentro del mismo.

### 2.3. Astropartículas

Se define como Astropartículas a las partículas que se originan fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano.

En este trabajo, denominaremos a esas partículas primarios y la energía del primario se nota como  $E_p$ .

## El espectro de astropartículas

Se llama espectro de astropartículas al flujo de partículas como función de su energía  $E_p$ , y presenta ciertas características peculiares con respecto a los cambios de pendiente que presenta la curva a medida que la energía aumenta.

En el rango de las energías más bajas,  $E_p \leq 10^{10}$  eV, el espectro de energía está completamente dominado por el viento solar, y los campos magnéticos en la heliósfera y en la magnetósfera. Más aún, las variaciones locales del campo magnético heliosférico son capaces de introducir modulaciones en el flujo hasta energías de decenas de GeV, llegándose a observar una anticorrelación entre el flujo observado y el ciclo de actividad solar de 11 años de duración: durante un período de mucha actividad solar el flujo observado hasta energías de 1 GeV se ve reducido hasta en un orden de magnitud.

A energías más altas, es un hecho notable que el espectro diferencial de energía pueda ser ajustado en todo ese rango mediante una simple ley de potencia de la forma:

$$\left(\frac{dN}{dE_p}\right) \propto E_p^\alpha \quad (2.3.1)$$

donde  $\alpha$  es el índice espectral, y es aproximadamente igual a -3, o lo que es igual, el flujo cae 3 órdenes de magnitud por cada década de energía de primario: desde  $1 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  a  $E_p = 100 \text{ MeV}$  cae hasta  $<1 \text{ km}^{-2}\text{siglo}^{-1}$  a  $E_p = 100 \text{ EeV}$ .

En el espectro se evidencian tres regiones en las que se produce un cambio en el valor del índice espectral. A estas regiones, en orden de energía creciente, se las denomina respectivamente rodilla, segunda rodilla, tobillo y supresión.

Cada una de las características observadas tienen diversas explicaciones, relacionadas con los mecanismos de aceleración, con la composición química de las astropartículas o bien con interacciones durante la propagación en el medio intergaláctico o interestelar.

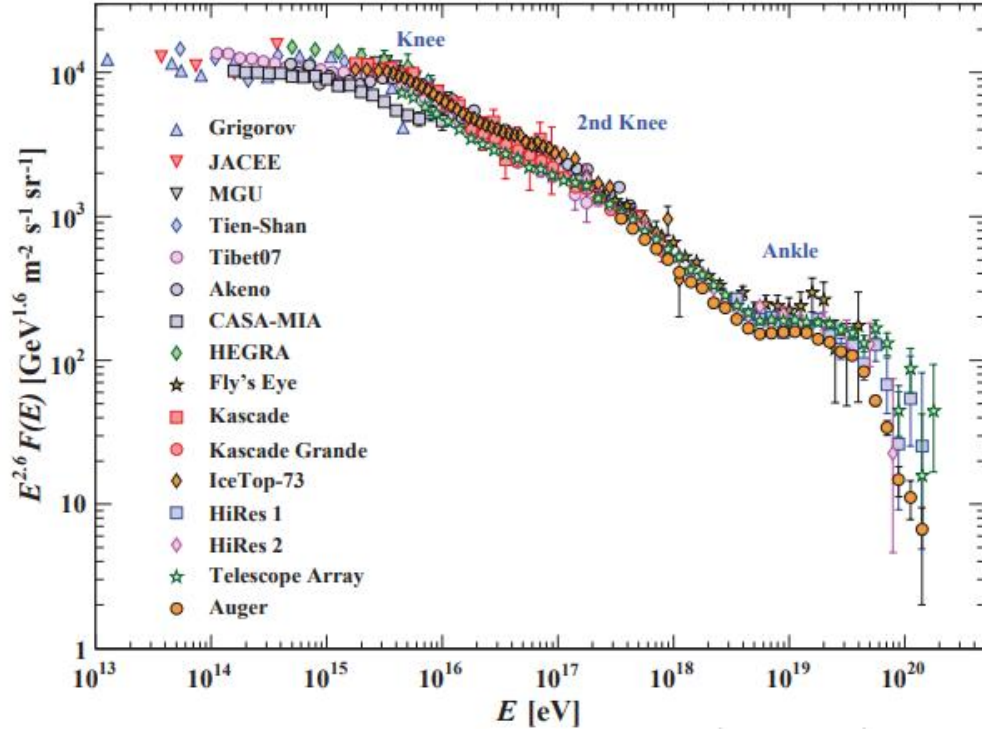


Figura 2.7: Espectro del flujo de rayos cósmicos en función de su energía. Para enfatizar los alejamientos del valor medio del índice espectral  $\alpha \approx -3$  se multiplicó el flujo observado por  $E_p^{2.6}$ . Las tres regiones donde se observa un cambio significativo del valor de  $\alpha$  se indican en azul. (Figura extraída de [15])

## Lluvias atmosféricas extendidas

Una vez en el entorno del sistema solar, una nueva serie de fenómenos se ponen de manifiesto. En primer lugar, el campo magnético medio se incrementa en la región de transición del espacio interestelar con la heliósfera, y esto, junto con el transporte heliosférico modifican la trayectoria de las astropartículas de baja energía.

Luego, los primarios interactúan con la atmósfera terrestre produciendo billones de partículas secundarias, o simplemente secundarios, que se generan a partir de esa interacción.

Se define lluvia atmosférica extendida (EAS por sus siglas en inglés para Extensive Air Showers) a la cascada de partículas producida por la interacción de un primario con un núcleo de un elemento constituyente de la atmósfera.

Como en todo proceso de interacción con un medio, lo que importa no es tanto la longitud



recorrida a lo largo de la dirección de movimiento, si no más bien la cantidad de materia atravesada, que por construcción tiene incorporada la densidad del medio. En el caso particular del aire como medio, debe tenerse presente la variación de la densidad con la altura sobre el nivel del mar.

Se define eje de la lluvia como la recta cuya dirección coincide con la dirección de propagación que hubiera tenido el primario si no hubiera interactuado con la atmósfera, y cuyos ángulos directores se denominan:

- ángulo cenital  $\theta$  es el ángulo que forma el eje con la vertical;
- ángulo acimutal  $\phi$  es el ángulo formado por la proyección del eje sobre el suelo y el Este, en el sentido contrario a los agujas del reloj.

El eje de la lluvia indica entonces la dirección del desarrollo longitudinal.

A partir de aquí se define como posición de impacto o posición del core al punto de intersección entre el eje de la lluvia y el suelo.

Las cascadas poseen tres componentes principales: la llamada cascada electromagnética (EM), formada por fotones, electrones y positrones, son la principal componente de la lluvia, dado que por cada interacción hadrónica, aproximadamente la tercera parte de la energía involucrada va directamente al canal electromagnético, haciendo que en promedio, cerca del 99 % de las partículas producidas con hasta el 90 % de la energía total del primario sea dentro de esta componente. La cascada muónica, consistente en muones de alta energía provenientes del decaimiento de piones y kaones de la cascada hadrónica, que forman la tercera componente de la lluvia. Esta constituye el núcleo de la misma, y se alimenta de las interacciones QCD de la parte más energética de la lluvia. El presente estudio se realiza, como ya se mencionó anteriormente, dentro del marco del proyecto ANDES [9], y partiendo desde el marco teórico de la física de astropartículas, específicamente el comportamiento de los llamados muones *prompt* que resultan ser los más energéticos de la componente muónica de las lluvias atmosféricas extendidas.

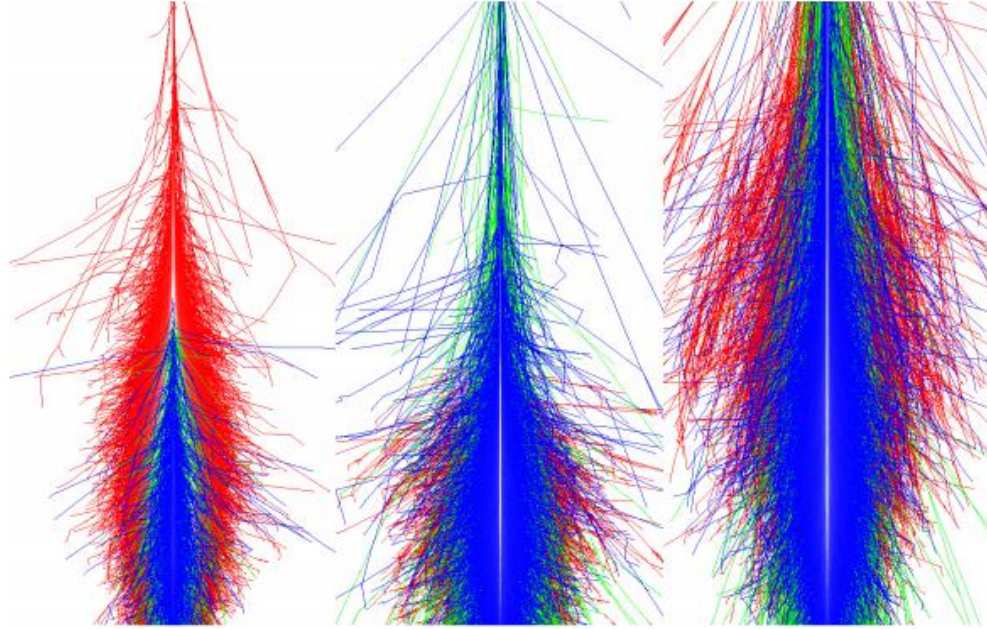


Figura 2.8: Desarrollo longitudinal y lateral de tres lluvias atmosféricas extendidas iniciadas por un fotón (izquierda), un protón (centro) y un hierro (derecha), todos verticales y con  $E_p = 5 \times 10^{14}$  eV. Los diferentes colores identifican las tres cascadas principales: electromagnética (rojo), muónica (verde) y hadrónica (azul). Las diferencias son evidentes: mientras que la componente EM domina la lluvia iniciada por un fotón, la hadrónica se hace más importante al aumentar el número de nucleones. (Figura extraída de [16])

Para una cascada particular, el desarrollo de la misma dependerá de muchos factores: la energía del primario es un factor preponderante, junto con la especie de la astropartícula: la evolución no será igual si se trata de un fotón, donde las interacciones dominantes de la cascada serán electromagnéticas, o si es un protón o un núcleo, dominados por interacciones hadrónicas [16].

## 2.4. Aproximación de desaceleración continua

### Opacidad

Antes de hablar de la aproximación de desaceleración continua es importante definir un concepto fundamental dentro de este desarrollo conocido como opacidad. Esta se define como la medida de capacidad de blindaje de un material frente a la radiación, ya sea electromagnética o de cualquier

otro tipo. En transferencia radiativa describe la absorción y dispersión de la radiación en un medio, ya sea plasma, dieléctrico, material usado como aislante, vidrio, etc. Esta magnitud, a la cual notaremos  $\kappa$ , puede ser definida como la integral de la densidad del material en la distancia recorrida, es decir:

$$\kappa = \int_{l_o}^{l_f} \rho(l) dl \quad (2.4.1)$$

Donde  $\rho(l)$  es la densidad del material en función de la distancia y los límites definen la longitud que se está considerando para calcular la opacidad del material.

La pérdida de energía de una partícula que atraviesa un material está dada por las interacciones que sufre con las demás partículas que componen el medio. Bajo este punto de vista, resulta razonable suponer que mientras más denso sea el material la partícula realizará más interacciones en su camino, y a su vez, cuanto mayor sea la distancia recorrida, más probabilidades tendrá de interactuar [6]. Es por esto que para este trabajo se considera que la opacidad del material en las distintas direcciones puede proporcionar una idea del blindaje que da el mismo frente a flujos de radiación.

## Poder de frenado y CSDA

Considerando que en este trajo debemos analizar la atenuación del flujo de muones desde la superficie de la montaña del sitio de ANDES hasta el interior del laboratorio, es conveniente elegir un modelo a partir del cual simular el comportamiento de este flujo en su camino a través de la montaña.

Para este propósito se ha decidido utilizar la aproximación de desaceleración continua (CSDA por sus siglas en inglés de Continuous Slowing Down Aproximation), en la cual se supone que la tasa de pérdida de energía de las partículas a lo largo de su trayecto a través de un material es igual a su poder de frenado  $dE/dx$  en cada porción diferencial del material[6]. El poder de frenado se define como la pérdida de energía o por unidad de opacidad que sufren las partículas cargadas a medida que atraviesan un material, esta pérdida estará definida por los distintos tipos de interacciones que sufren las partículas a medida que atraviesan el medio y dependerá de su carga, del tipo de partícula y de las propiedades del material [17]. A su vez se define como el rango CSDA a la cantidad de material en unidades de opacidad que las partículas pueden llegar a atravesar antes de perder toda su energía.

Entonces, como en este trabajo se ha decidido enfocar los estudios en el flujo de muones, se trabajará con CSDA aplicada a este tipo de partículas. El promedio dado por la CSDA de pérdida

de energía para los muones de altas energías en materia puede ser descripto por:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = a(E) + b(E)E \quad (2.4.2)$$

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

Entonces:

$$b(E) \equiv b_{brem} + b_{pair} + b_{nucl} \quad (2.4.3)$$

Esta notación es conveniente ya que  $a(E)$  y  $b(E)$  son funciones que varían lentamente con la energía a altas energías donde las pérdidas radiativas son mayores. El término  $b(E)E$  es menos del 1% de  $a(E)$  para  $E \leq 100$  GeV para la mayoría de los materiales.

El rango de aproximación de desaceleración continua se obtiene entonces de la integral:

$$R(E) = \int_{E_o}^E [a(E') + b(E')E']^{-1} dE' \quad (2.4.4)$$

donde  $E_o$  es lo suficientemente pequeño como para no afectar el resultado. A energías muy altas, donde  $a$  y  $b$  son (esencialmente) constantes,

$$R(E) \approx \left(\frac{1}{b}\right) \ln \left(1 + \frac{E}{E_{\mu c}}\right) \quad (2.4.5)$$

donde  $E_{\mu c} = \frac{a}{b}$  es la energía crítica de los muones. La energía crítica puede definirse más precisamente como la energía en la que las pérdidas electrónicas resultan iguales a las pérdidas radiativas. Se obtiene encontrando  $E_{\mu c}$  tal que:

$$a(E_{\mu c}) = E_{\mu c} b(E_{\mu c}) \quad (2.4.6)$$

A modo de ejemplo, en la figura 2.9 se puede observar la curva del poder de frenado de muones positivos en cobre, es decir su pérdida de energía en por unidades de área por masa en función de su momento lineal.

Por último, cabe mencionar que en [6] se dan tablas de estas contribuciones a la pérdida de energía así como rangos de aproximación de desaceleración continua para una selección de elementos, componentes, mezclas y material biológico, para energías cinéticas incidentes en el rango de los 10 MeV a los 100 TeV. Y fue en estas tablas en que se basó la función de transferencia

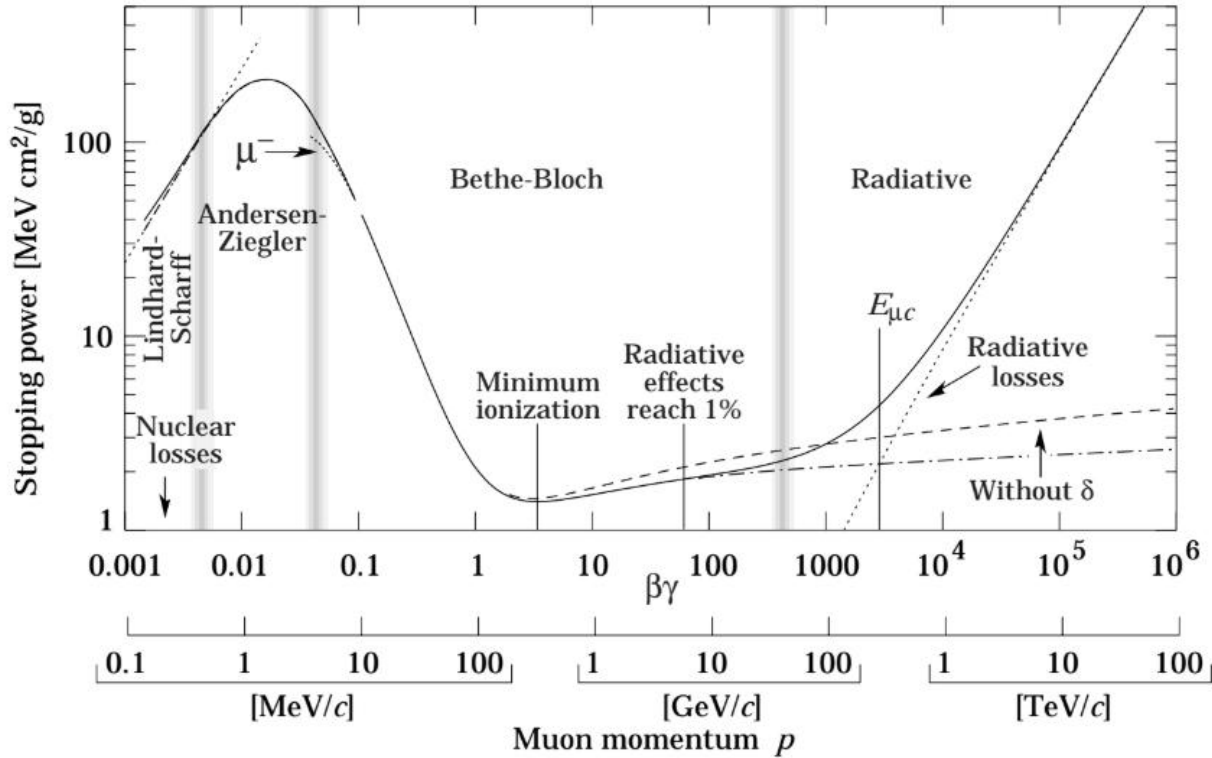


Figura 2.9: A modo de ejemplo se da la curva de poder de frenado ( $= \langle \frac{dE}{dx} \rangle$ ) para muones positivos en cobre en función de su momento lineal  $p = M\beta c\gamma$  (en un rango de 9 órdenes de magnitud). Las líneas sólidas representan el poder de frenado total. Las bandas grises verticales indican los límites entre las distintas aproximaciones teóricas o procesos físicos dominantes. (Figura extraída de [6])

modelada en este trabajo para calcular el flujo de muones que llegan al interior del laboratorio. En particular, en la página 328, tabla VI-6 de [6] se encuentra la tabla utilizada para el poder de frenado en roca estándar. El poder de frenado vs. la energía de los muones representados en esa tabla se encuentran en la figura 2.10

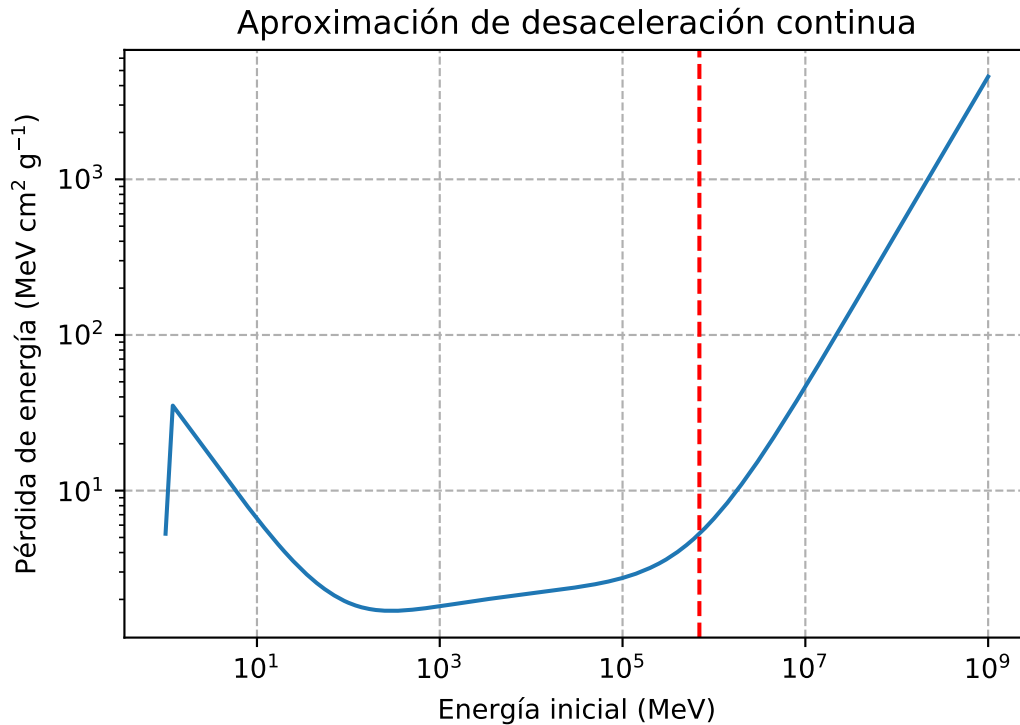


Figura 2.10: Curva de aproximación de desaceleración continua para muones en roca estándar, la línea punteada roja representa la energía crítica (693000 MeV)

## 2.5. Simulaciones de flujo de radiación en el sitio de ANDES

Las simulaciones del flujo de secundarios sobre el sitio de ANDES fueron realizadas con el programa basado en el método de Montecarlo CORSIKA (versión 7.5600) cuyas características básicas se encuentran en el apéndice A, pero considerando la complejidad del uso de este programa y a fin de optimizar el tiempo de trabajo en las simulaciones se hizo uso de ARTI [18] que consta de un paquete completo para facilitar el uso de CORSIKA en el marco del proyecto LAGO, y anteriormente conocido bajo el nombre de CrkTools. Se compone de una serie de códigos escritos principalmente en bash y perl que integran el espectro de astropartículas en los rangos de energía y ángulos de interés automatizando el lanzamiento, control y análisis de las simulaciones de CORSIKA. El paquete incluye además códigos de análisis de los datos simulados escritos en Fortran y C/C++. Por construcción, estos códigos se encadenan mutuamente siguiendo una estructura jerárquica: en el primer nivel se encuentran aquellos que automatizan los cálculos y análisis, y en

el último nivel se encuentran aquellos que lanzan las simulaciones. De esta forma, los del primer nivel crean códigos que a su vez crean otros códigos que a su vez lanzan las simulaciones.[5]

Además de automatizar las simulaciones, ARTI se ocupa de realizar un análisis de los datos obtenidos a partir de las mismas devolviendo como salida archivos de distintos tipos: *inject* que son aquellos que dan un detalle de los primarios inyectados para generar las lluvias, *shower* que nos da un detalle del momento lineal y la especie de los secundarios como también la energía, la especie y el ángulo de incidencia de su primario correspondiente, y dos archivos que componen histogramas de energía y de distancia al eje principal de la lluvia.

En primer lugar debían simularse las lluvias atmosféricas sobre el sitio donde se encontrará el laboratorio, para esto se utilizó el programa de simulaciones de lluvias atmosféricas extendidas CORSIKA ajustando debidamente los parámetros correspondientes de acuerdo a las características del sitio y a las aproximaciones necesarias para este estudio en particular.

- **Modelo Hadrónico a altas energías: QGSJET-II-04**

QGSJET (Quark Gluon String Model with JETs) [19], junto con el modelo EPOS, resulta uno de los más óptimos en términos de tiempo de cálculo para simular una EAS, de ahí el hecho de que fuera elegido para realizar estas simulaciones. Una comparación detallada de todos los modelos puede encontrarse en [20].

- **Modelo hadrónico a bajas energías: GHEISHA-2002 (Gamma Hadron Electron Interaction SHower code).**

El paquete GHEISHA es recomendado para el tratamiento de interacciones hadrónicas de baja energía.

Las rutinas de GHEISHA tratan a los neutrones de baja energía de manera muy consistente.

Debe notarse, que en GHEISHA sólo los elementos H, Al, Cu y Pb están tabulados como materiales de blanco y que la sección eficaz de los elementos de blanco N, O y Ar que componen la atmósfera deben ser detenidos por interpolación, con una pérdida de exactitud. Sin embargo, el modelo elegido a bajas energías cualquier defecto que el mismo pudiera tener no afecta a la simulaciones realizadas en este trabajo ya que se estudiaron secundarios de altas energías ( $> 800$  GeV).



- **Dirección de arribo del primario**

Tanto los ángulos acimutales como cenital se seleccionaron los rangos entre los  $0^\circ$  y  $90^\circ$  para el ángulo cenital que se mide entre el vector de momento de la partícula y el eje z negativo y el ángulo acimutal entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ . Se eligió el rango de ángulos de este modo ya que era necesario estudiar la incidencia de flujo desde todas las direcciones de la semiesfera ya que este flujo resulta uniforme en ángulo sólido.

- **Límites de energía del primario**

Si se observa la curva de la figura 2.7 puede verse que el flujo de primarios a energías a  $10^6$  TeV (cerca de la región del tobillo) es muy bajo lo que hace la llegada de este tipo de partículas poco probable. Además, como se explicará en el siguiente capítulo, se deseaba estudiar partículas secundarias con energías mayores o iguales a 1 TeV. Entonces se estableció un rango de 1 TeV hasta  $10^6$  TeV para la energía de los primarios. Este límite fue elegido a fin de optimizar el tiempo de simulación.

- **Modelo Atmosférico**

Como modelo atmosférico del sitio se trabajó con el número 19 del manual de CORSIKA [4] que corresponde al sitio de Malargüe en el mes de febrero. Estos modelos están confeccionados según cálculos de CSDA descritos en la sección 2.4 de este capítulo. Y fue seleccionado por ser el más similar, de los disponibles en CORSIKA, en cuanto a condiciones climáticas. En estos modelos se supone que la atmósfera es una mezcla de tres gases:  $N_2$  (78,1%),  $O_2$  (21%) y Ar (0,9%), cuya densidad, expresada en términos de la opacidad, varía en forma exponencial con la altura  $h$  siguiendo el modelo de Linsley (ver el apéndice A).

- **Altura del sitio**

Teniendo en cuenta que el flujo de secundarios depende entre otras variables de la altura del sitio se decidió seleccionar como sitios de estudio de flujo la base (que se encuentra a 4700 m s.n.m) y el pico (5300 m s.n.m) de la montaña. Para el estudio de la transferencia en roca se utilizó el flujo sobre el pico para la mitad superior de la montaña y el flujo sobre la base para la mitad inferior.

- **Tiempo de flujo**

Se realizaron 6 simulaciones de un mes de duración, 3 para cada sitio, las cuales fueron luego concatenadas para obtener dos simulaciones de tres meses cada una, una para el pico y otra



para la base. Esta cantidad de tiempo de flujo es estadísticamente conveniente y permite realizar un estudio amplio del flujo en el laboratorio.

- **Límite de energía del secundario**

Se configuraron las simulaciones para eliminar aquellos secundarios cuya energía fuera menor a 800 GeV, a pesar de que estas partículas ya de por sí en base al estudio preliminar que se explicará en el capítulo 3 serían eliminadas al realizar la transferencia del flujo en la montaña, se eligió este valor a fin de contar con mayor margen de error en el estudio.

- **Tipo de detector:** Se utilizó la opción de detector volumétrico con la cual la distribución de intensidades de los primarios está en función del ángulo cenital como:

$$I \propto \sin \theta \quad (2.5.1)$$

respecto sólo de los elementos de ángulo sólido de la esfera celeste. Esta opción es apropiada para detectores de geometría esférica. Y de hecho para obtener el flujo por día por  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$  se aproximó la cámara del laboratorio por una esfera de sección transversal  $1 \text{ m}^2$  por lo que la selección de este tipo de detector para las simulaciones resultó el más adecuado.

- **Campo magnético:** correspondiente a la posición del sitio de ANDES ( $30^{\circ}24'S$ ,  $69^{\circ}88'W$ )  $B_N=19848 \text{ nT}$ ,  $B_z = -11976 \text{ nT}$ .

Bajo esta selección de parámetros se integró el flujo de todos los primarios en el rango  $Z=1$  (que corresponde a los protones) a  $Z=26$  (núcleos de hierro) donde se aproximó el espectro de inyección de cada especie por una función de la forma  $j(E, Z) = j_o(Z) E^{\alpha(E, Z)}$  según [21]. En el rango de energías en que se trabajó, la presencia de otras especies de primarios, como fotones, resulta despreciable.

# Capítulo 3

## Metodología, resultados y discusión

### 3.1. Estudio preliminar

#### Resultados de las simulaciones de flujo de radiación sobre el sitio de ANDES

De las simulaciones realizadas con ARTI y CORSIKA para estimar el flujo de radiación en los sitios denominados “pico” (5400 m s.n.m) y “base” (3700 m s.n.m) se utilizaron los archivos del tipo *shower* mencionados en el capítulo 2 para graficar la distribución de energías tanto para las simulaciones realizadas a la altura de la base como las del pico. En la figura 3.1 (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 figura 3.1 (derecha) se encuentra la misma gráfica comparativa pero sólo para el flujo de muones sobre cada sitio.

El flujo total resulta de un 14,3 % mayor en el pico que en la base, pero en el flujo de muones, esta diferencia decrece a un 2,02 %, siendo todavía mayor el flujo en el pico, lo cual da una evidencia de el comportamiento de estas partículas en cuanto a nivel de interacción y de decaimiento, si bien el flujo proviene desde todas las direcciones de la atmósfera que componen una media esfera, aquellas partículas que llegan a la base desde las direcciones más verticales atraviesan 1700 m más de atmósfera que aquellas que llegan al pico y esto representa una diferencia significativa para el total del flujo pero no afecta en gran medida a los muones. Como se verá más adelante en este capítulo, de estas simulaciones no pueden hacerse suposiciones a priori acerca de la radiación de fondo en el laboratorio y por ello es necesario realizar la transferencia en roca de las partículas resultantes explicada anteriormente.

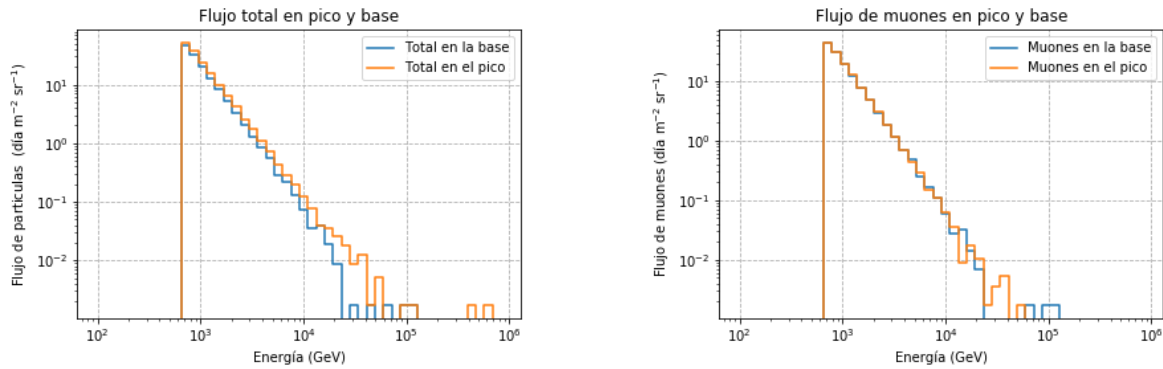


Figura 3.1: Izquierda: histogramas comparativos del flujo total de partículas sobre la base (azul) y el pico (naranja) del sitio de ANDES. Derecha: histogramas comparativos del flujo de muones sobre la base (azul) y el pico (naranja) del sitio de ANDES. Las simulaciones fueron realizadas con un corte inferior de energía para los secundarios de 800 GeV.

En el rango de energías considerado  $E_s > 800$  GeV, el flujo de muones sobre el pico resultaría de aproximadamente  $(128,2 \pm 0,4)$  por día por  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$  y sobre la base de  $(125,7 \pm 0,4)$  por día por  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ , los cuales, sin el filtro que ofrece la cobertura de la montaña sobre el laboratorio aportarían una fuente de ruido en la detección de neutrinos que se planea realizar en el laboratorio.

Además de los muones, las otras partículas que forman parte de la lluvia atmosférica extendida también podrían resultar una fuente de señal de ruido pero este trabajo estará centrado en la componente muónica por resultar las más probables porque son las que tienen una menor tasa relativa de pérdida de energía[6]. En cuanto a otras partículas de la componente más energética, por ejemplo, piones, podría suceder que decaigan en muones en el interior de la roca, de hecho, en la figura 3.1 de la izquierda que representa el flujo de todas las partículas, se puede ver la presencia de un flujo reducido de piones en energías del orden de  $10^6$  pero este flujo resulta menor a  $10^{-2}$  por día  $\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ , con lo cual no enfocaremos este estudio en ese tipo de partículas.

## Dispersión de muones con respecto a las partículas primarias

Cuando una partícula primaria ingresa a la atmósfera y comienza a interactuar con los demás núcleos presentes en la misma. La lluvia atmosférica extendida que se produce como resultado de estas interacciones presenta una geometría como la que se ve en la figura 2.8 en el capítulo 2, es decir que los secundarios presentes en la lluvia viajan en direcciones que difieren de la dirección de incidencia del primario.

Considerando que en este trabajo resulta de importancia conocer el ángulo de incidencia de los

secundarios sobre la superficie de la montaña para poder estimar si alcanzarán o no el laboratorio, se realizó un análisis de la dispersión de los secundarios obtenidos en las simulaciones con respecto a los primarios cuyo ángulo de incidencia conocemos.

Así, conociendo las coordenadas de momento lineal de los muones en los tres ejes cartesianos se calculó su dirección de propagación con respecto al eje z, es decir su ángulo cenital, y se consideró como “dispersión” la diferencia entre el ángulo cenital del primario y del muon con respecto al eje de la lluvia. Graficando estas diferencias en un histograma se obtuvo el gráfico de la Figura 3.2.

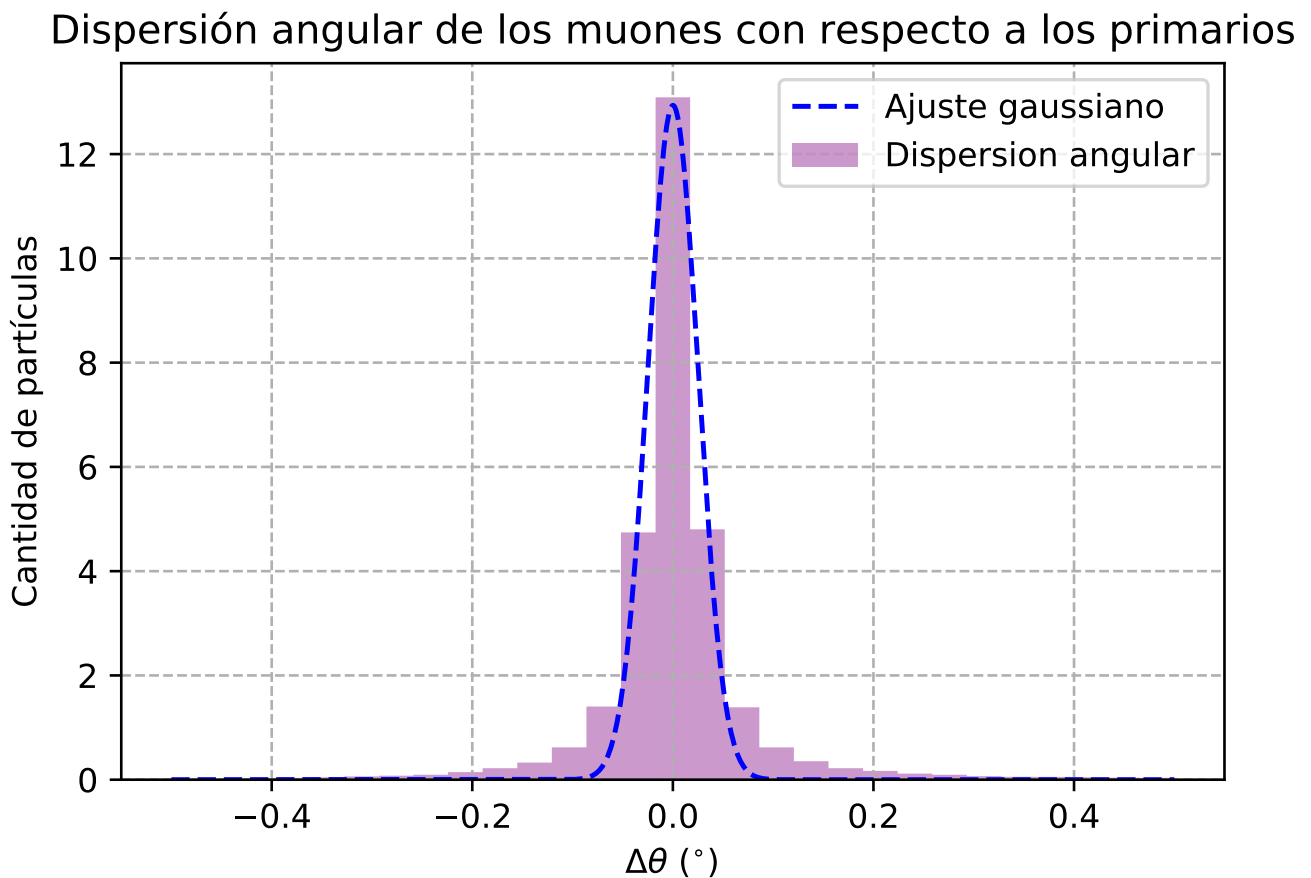


Figura 3.2: Distribución de la dispersión angular de los muones con respecto a los primarios. Se realizó un ajuste gaussiano que presenta una desviación estándar  $\sigma=0,04^\circ$  y un valor medio  $\bar{\theta}=0^\circ$

Sobre esta distribución se realizó un ajuste gaussiano que presenta una desviación estándar de  $\sigma=0,04^\circ$  y un valor medio  $\bar{\theta}=0^\circ$ . Los datos utilizados son los de la simulación sobre la base. Como se verá más adelante en este capítulo, los caminos dentro de la montaña que se modelaron

para estudiar la atenuación del flujo presentan una distancia entre ellos del orden de los  $10^\circ$ , es decir, dos órdenes de magnitud mayor que la desviación estándar de los muones con respecto a sus primarios lo que nos garantiza que en nuestro estudio no tendremos contaminación de muones dispersados a grandes ángulos con respecto al primario.

Por otro lado resultó de importancia observar la distribución de ángulos de incidencia de los secundarios, teniendo en cuenta que ya que se trabaja en unidades de flujo para un detector volumétrico como se explicó en el capítulo 2 es natural que se presente un mayor flujo desde las regiones mas horizontales ya que a medida que crece el ángulo cenital hay más ángulo sólido de ingreso para las lluvias, esto puede observarse en la figura 3.3, donde se presenta un histograma de los ángulos de incidencia de las partículas para la simulación de la base en un día de flujo.

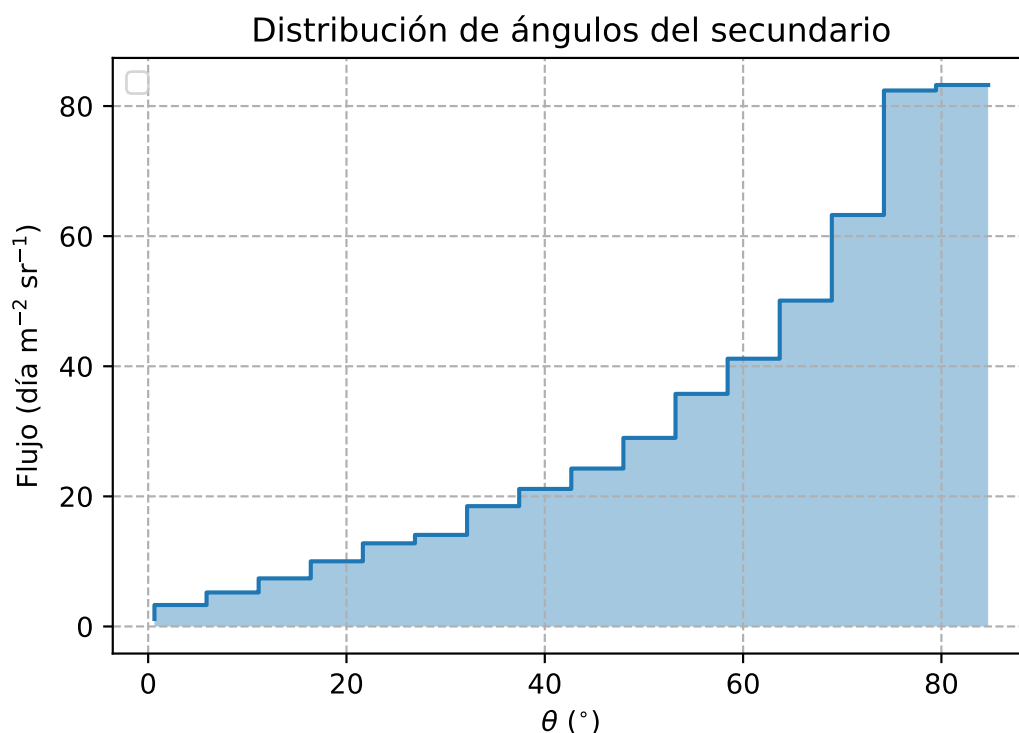


Figura 3.3: Distribución de los ángulos de incidencia de las partículas secundarias en un día de flujo sobre el sitio de la base.

En la figura 3.3 se puede ver que se presenta un ingreso mayor de partículas desde la base debido a que las simulación se realizaron para todo el ángulo sólido de la atmósfera y para un detector esférico volumétrico para el cual la intensidad del flujo crece como el seno del ángulo cenital como se mencionó en el capítulo 2.

## Energía mínima de penetración en roca

A pesar del alto blindaje que ofrece la cobertura de roca con la que contará el laboratorio, se considera que podría producirse flujo de radiación dentro del observatorio proveniente de las EAS que alcanzan el sitio donde será instalando.

Por lo tanto con bases en los cálculos de aproximación de desaceleración continua realizados por Groom et al [6], se estimó la energía mínima necesaria que requiere una partícula para atravesar 1700 m de roca estándar. Se encontró esta energía en un valor alrededor de los 3 TeV. La elección de distancia recorrida en 1700 m proviene del hecho de que esta es la distancia mínima entre el laboratorio y la superficie como se mencionó en la primera sección del capítulo 2.

Considerando que el poder de frenado depende de la energía inicial de la partícula resultaba necesario conocer esta energía mínima de penetración al observatorio para configurar las simulaciones de EAS en Corsika (ver capítulo 2), en particular en lo que refiere a un límite inferior para la energía de las partículas secundarias.

En base a los datos proporcionados por la tabla de poder de frenado en roca estándar de [6] se desarrolló en lenguaje Python un código de análisis basado en iteraciones cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 3.4. Este código se realizó con el fin de calcular la energía mínima inicial que necesita un muon para atravesar 1700 m de roca estándar pero también con el propósito de tener un prototipo de función de transferencia que se utilizaría luego para calcular la atenuación del flujo a través de la montaña.

Para cada valor de energía de energía inicial de la tabla se realiza el proceso de restarle el valor correspondiente de poder de frenado, es decir, multiplicado por la densidad de la roca <sup>1</sup>. Luego de restar este valor se compara mediante interpolación lineal con el resto de los valores de energía inicial de la tabla, y cuando se encuentra el valor más cercano se vuelve a realizar la resta. El número de iteraciones se guarda en un contador cuyo valor al final equivale a la longitud, en cm, recorrida por la partícula. Este proceso se repite hasta que la energía del muon alcanza un valor menor o igual que cero.

En la figura 3.5 puede verse un gráfico de Longitud de penetración en roca vs. Energía inicial y en el mismo se encuentran señalados los valores mínimos de interés para este trabajo.

Como puede verse, el valor que se corresponde con aproximadamente 1700 m corresponde a una energía de aproximadamente 3 TeV como ya se mencionó al inicio de esta sección.

El valor obtenido fue de utilidad para estimar un límite inferior de energía del secundario para

---

<sup>1</sup>Cabe aclarar que la densidad usada en esta tabla ( $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ ) se corresponde con un promedio de los valores esperados de densidad de las roca Riolita y Andesita que son las que componen en su mayoría el Grupo Choiyoi, que se encontraría rodeando el observatorio, por lo que podría considerarse una buena primera aproximación.

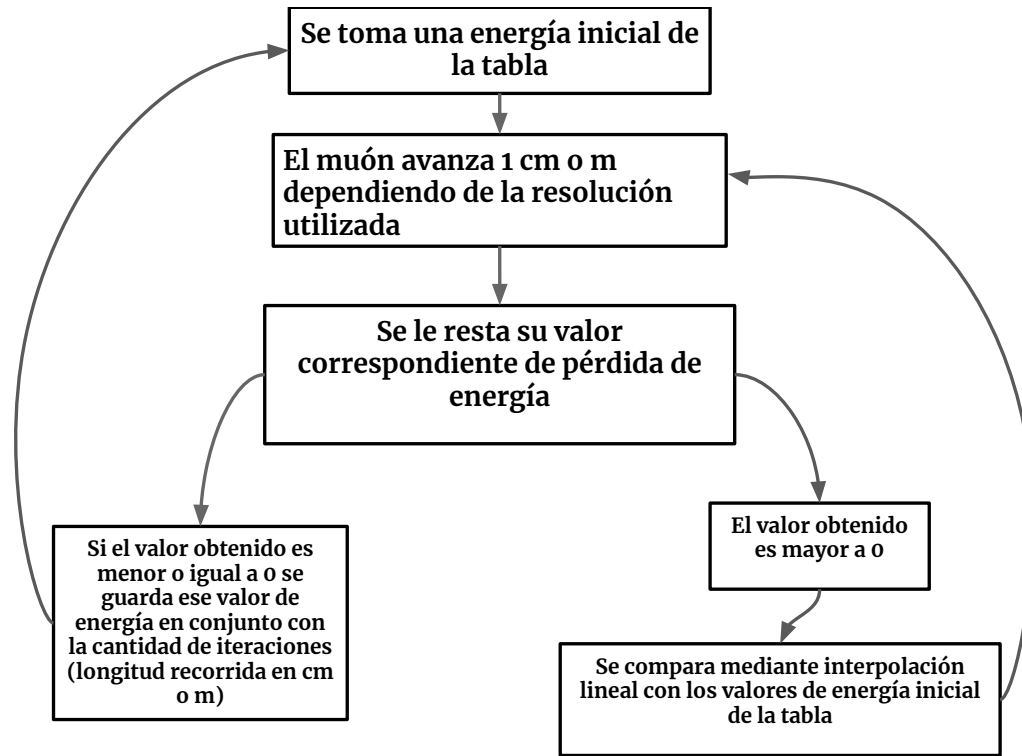


Figura 3.4: Método utilizado para estimar la energía mínima necesaria para que el flujo de radiación alcance el laboratorio en base a los datos aportados por la tabla de poder de frenado que se encuentran en [6]: mediante iteraciones se recorren todos los valores de energía inicial de la tabla de poder 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 alcanzó su rango CSDA y se detuvo. Si la energía resultante es mayor a cero se interpola este valor con la primera columna de la tabla y se repite el proceso.

las simulaciones de flujo, se colocó este corte en 800 GeV para todas las componentes de la lluvia (hadrónica, muónica, electrónica y fotones) a fin de optimizar el tiempo de simulación. La elección de este límite estuvo basada en que si bien resultaba un valor más bajo que el estimado en los cálculos de energía mínima, daba una franja amplia de error ya que las partículas de energía muy baja serían luego eliminadas mediante la función de transferencia a realizar teniendo en cuenta los distintos estratos de la montaña y el ángulo de incidencia de las partículas.

### Pérdida de energía de muones en función de la densidad del material

Por otro lado, también como estudio preliminar se buscó la variación de pérdida de energía en función de la densidad del material para tres partículas de distinta energía inicial: 800 GeV,

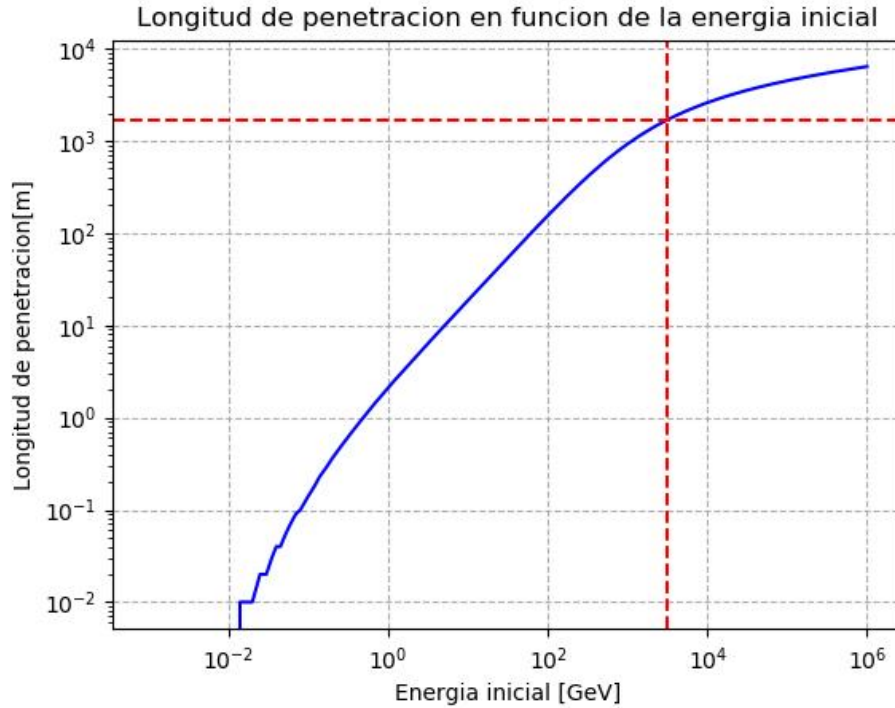


Figura 3.5: Longitud de penetración de muones en roca estándar ( $2,6 \text{ g cm}^{-3}$ ) en función de la energía con la que inciden en la roca

1000 GeV y 3000 GeV. Este estudio se realizó simulando la transferencia de estas tres partículas a través de 100 m de rocas de distintas densidades:  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $2 \text{ g cm}^{-3}$  y  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ . En la Tabla 3.1 se detallan las pérdidas de energía para estas partículas.

Energía inicial	Densidades		
	$1.5 \text{ g cm}^{-3}$	$2 \text{ g cm}^{-3}$	$2.5 \text{ g cm}^{-3}$
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 %)

Cuadro 3.1: 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:  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $2 \text{ g cm}^{-3}$  y  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ .

Lo que se observa es una mayor pérdida de energía cuanto mayor es la energía inicial de la partícula, lo cual concuerda con lo esperado según los estudios realizados por Groom et al [6]



para energías de estos órdenes, donde la curva de la aproximación de desaceleración continua es creciente.

## 3.2. 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 observatorio se procedió a programar en lenguaje Python una función de transferencia de flujo para muones según la información que provee ARTI.

En primer lugar se concatenaron las tres simulaciones de un mes en el pico y lo mismo se hizo con las simulaciones de la base. De los dos archivos resultantes se extrajeron las líneas correspondientes a muones y anti-muones en un nuevo archivo haciendo uso de la identificación de partículas que provee el manual de CORSIKA. Luego se consideró que las partículas que llegan al pico de la montaña serían consideradas con la posibilidad de alcanzar el laboratorio si llegan a la superficie con un ángulo cenital menor que  $57^\circ$  (aproximadamente la mitad de la ladera de la montaña), por lo tanto se extrajeron las partículas que habían ingresado con un ángulo menor al mencionado y se hizo lo contrario con el archivo de la simulación para la base. Por lo tanto, los datos a analizar resultaron dos archivos (uno para el pico y otro para la base) que constaban sólo de muones y anti-muones y aquellos que ingresaban con un ángulo de propagación menor a  $57^\circ$  para el pico y ángulos mayores a este para la base.

El procedimiento para calcular la transferencia de flujo fue similar al descrito antes en este mismo capítulo para calcular la energía mínima de penetración. La diferencia fue que se introdujo una función que tiene como variables el ángulo de entrada de la partícula (proporcionado en el archivo de salida de Arti) y la distancia recorrida por la misma.

A su vez, a fin de optimizar el programa se consideró una resolución de metros en las zonas de la curva de desaceleración continua (figura 3.6) donde la pendiente resultaba menos pronunciada (entre 200 MeV y 300000 MeV) ya que el cambio no resulta tan abrupto.

## 3.3. Opacidad

Para aportar una imagen descriptiva del entorno del laboratorio, se graficó un mapa de opacidad en función del ángulo cenital.

En la figura 3.7 puede verse el mapa antes mencionado. Debido a que se consideró simetría

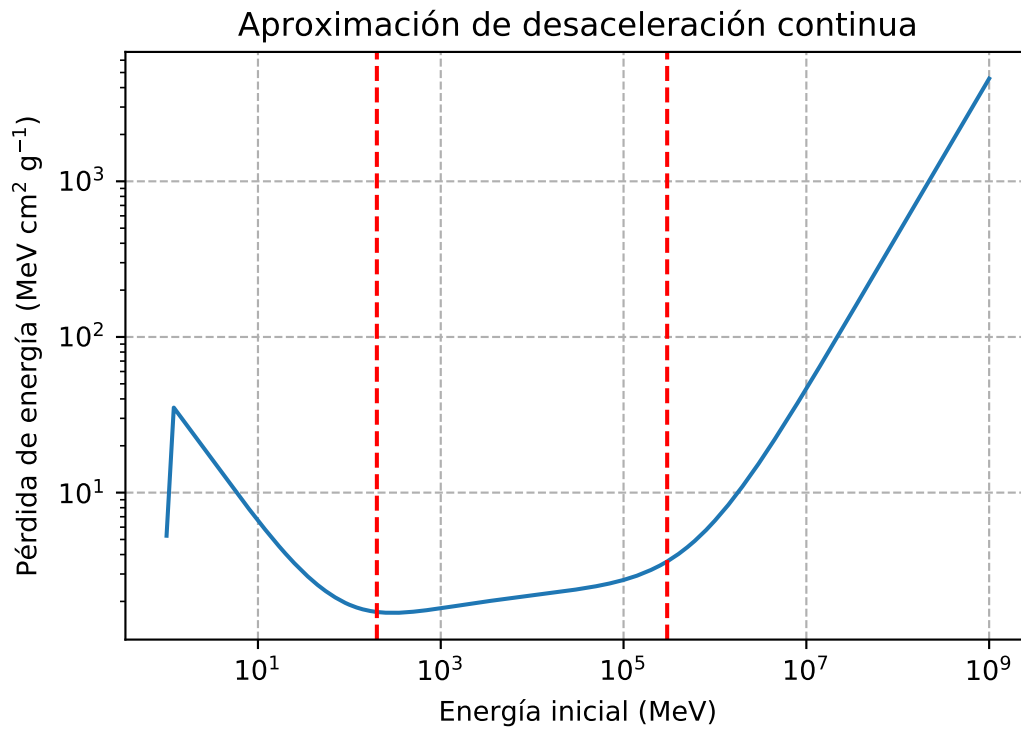


Figura 3.6: Curva de aproximación de desaceleración continua. Para las partículas con una energía entre las líneas punteadas, ya sea como energía inicial o energía a la que llegan por pérdida durante la transferencia, se usó una resolución de metros y para las demás energías una resolución de centímetros.

azimutal en la distribución de estratos en la montaña, resultó presentar una distribución cenital de opacidad.

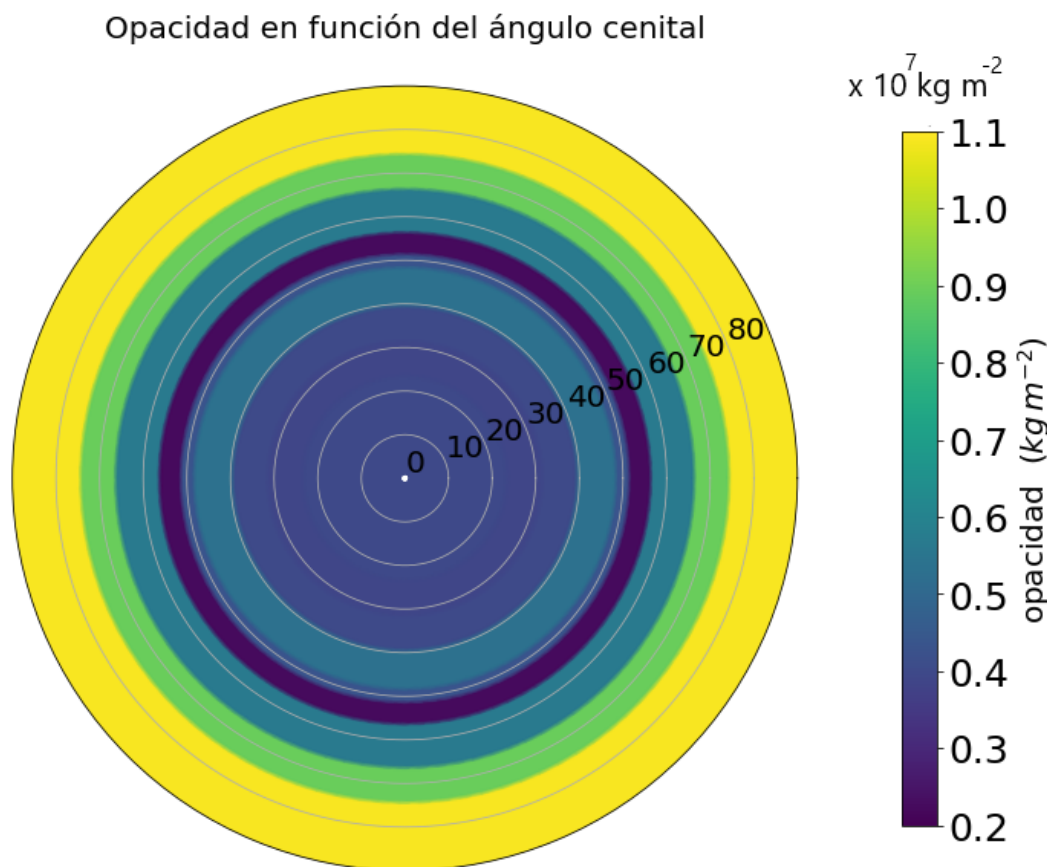


Figura 3.7: Mapa de opacidad de la cobertura de roca del sitio de ANDES en función del ángulo cenital observando desde la cámara del laboratorio subterráneo. Se puede observar que desde el centro de la montaña la opacidad decrece radialmente hasta alcanzar un mínimo en aproximadamente  $50^\circ$  desde donde vuelve a crecer hasta su máximo en los ángulos mayores

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  $50^\circ$  desde donde comienza a aumentar nuevamente, encontrándose en un valor máximo entre los  $70^\circ$  y los  $90^\circ$ . Esta distribución de opacidad concuerda con lo esperado a partir del estudio geológico realizado por [2] y la geometría acimutal que se asumió de la montaña, y da una idea preliminar de como será el comportamiento del flujo de muones que atraviesan la montaña. Sin embargo, algo importante a tener en cuenta es que aunque el máximo de opacidad, que es de aproximadamente  $10^7 \text{ kg m}^{-2}$ , se encuentra entre los  $70^\circ$  y  $80^\circ$  en este trabajo, previamente se observó que debido a que el ángulo sólido resulta mayor para partículas que provienen desde las direcciones más horizontales, el flujo resulta mayor desde estas direcciones.

A su vez, este mismo mapa se hizo para una montaña con la misma geometría con la que se trabajó pero considerando que estuviera formada en su totalidad por roca estándar. Este mapa puede verse en la figura 3.8 (derecha).

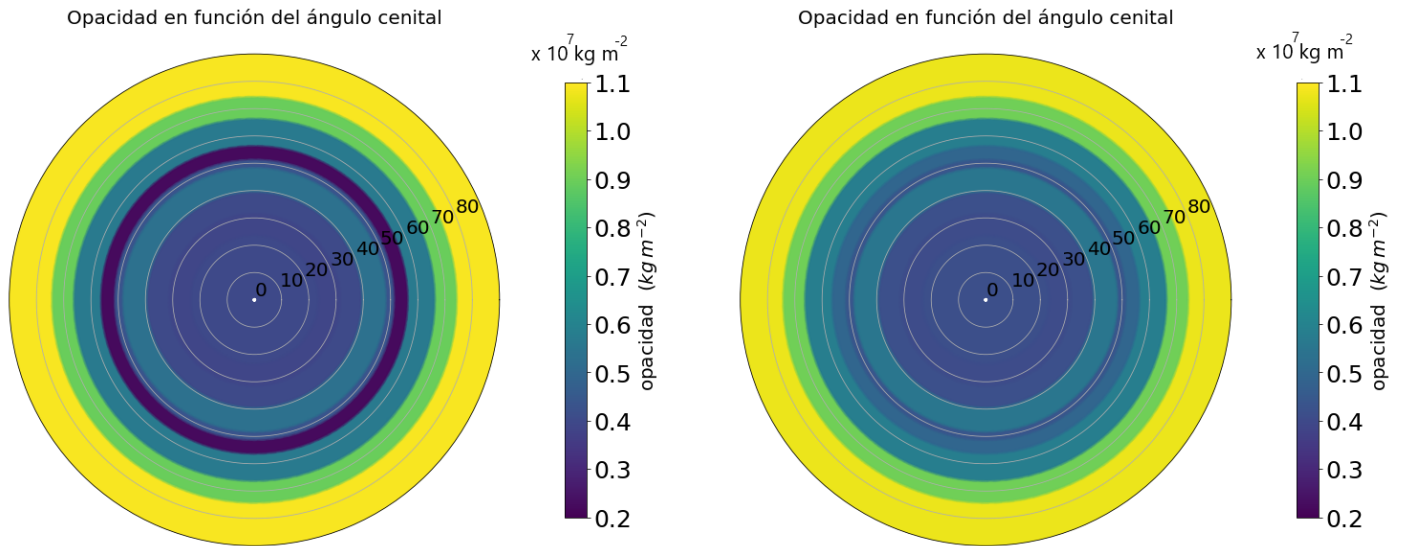


Figura 3.8: Izquierda: Mapa de opacidad de la cobertura de roca de ANDES. Derecha: Mapa de opacidad de una montaña con la misma geometría que la cobertura de ANDES pero compuesta en su totalidad por roca estándar. A diferencia de la figura 3.7 se puede ver que la menor opacidad se presenta entre lo 0° 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.

### 3.4. Distribución angular

Como cada partícula, luego de la transferencia en roca tiene como etiquetas su energía final y su ángulo de incidencia (además de otras magnitudes), fue posible estudiar la diferencia de flujo en las distintas direcciones de incidencia. En la figura 3.9 puede verse un histograma en el que se usó para los bins los mismos intervalos angulares que en los caminos de transferencia.

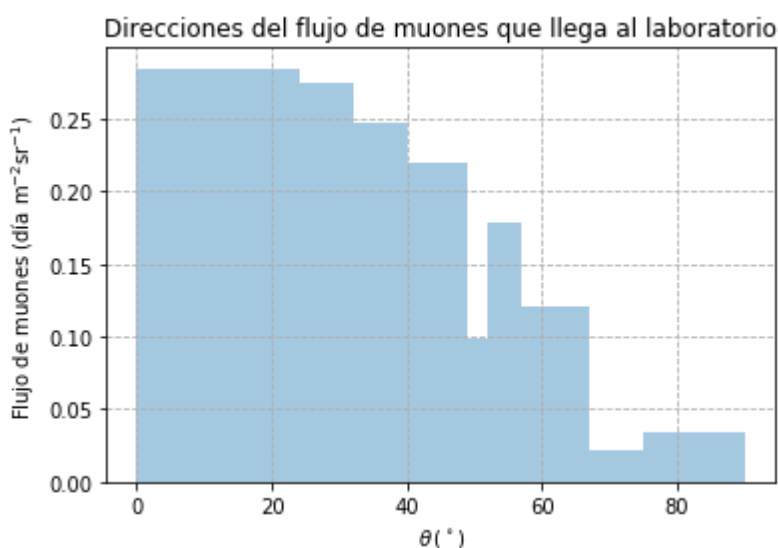


Figura 3.9: Histograma del flujo de partículas en función del ángulo de incidencia de las mismas.

Se puede observar que el flujo es mayor desde las direcciones cenitales más próximas a la vertical. Esto concuerda con el mapa de opacidad de la montaña mostrado en la figura 3.7 dado que en los mapas de opacidad se ha observado que los valores máximos de esta magnitud se presentan a mayores ángulos cenitales. A su vez, entre los  $50^{\circ}$  y los  $60^{\circ}$  se puede observar un máximo local que corresponde al mínimo de opacidad observado en la figura 3.7.

### 3.5. Flujo total esperado de muones en el laboratorio

Una vez realizada la transferencia en roca, se obtuvieron 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 llegan al laboratorio y a partir de estos datos se realizaron histogramas de la distribución de energías de estas partículas. En las figuras 3.5(izquierda) y 3.5(derecha) se encuentran por separado los histogramas de las partículas que ingresan al laboratorio desde la base y desde el pico respectivamente.

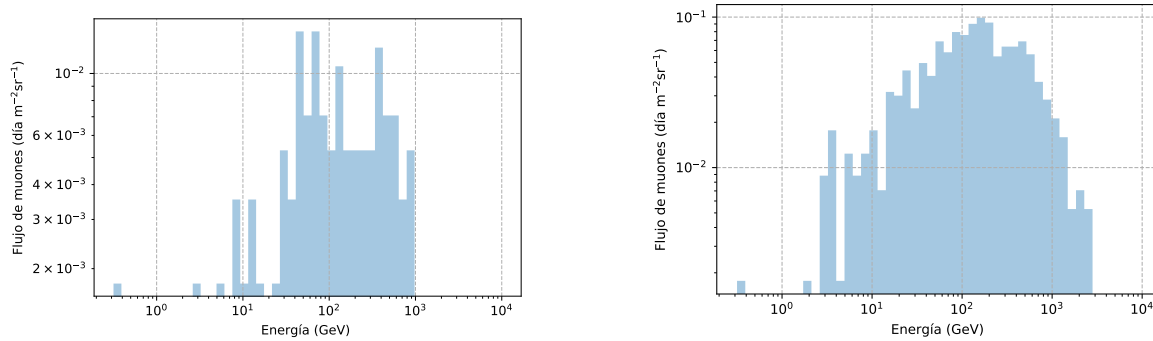


Figura 3.10: Izquierda: distribución de energía de las partículas que alcanzan el laboratorio por día por  $m^{-2}sr^{-1}$  desde la base con un valor medio de energía de 167 GeV y un flujo total de  $(0,18 \pm 0,02)$  por día  $m^{-2}sr^{-1}$ . Derecha: distribución de energía de las partículas que alcanzan el laboratorio por día  $m^{-2}sr^{-1}$  desde el pico con un valor medio de energía de 253 GeV y un total de 1,3 eventos. Este último es el calculo realizado en el anterior estudio realizado por miembros del proyecto ANDES [1], la estimación resulta más precisa que la anterior debido a que se tuvieron en cuenta los distintos estratos de la montaña.

Por otro lado, en la Figura 3.11 se encuentra el total del flujo, resultado de concatenar ambas simulaciones donde puede observarse que las partículas abarcan un rango de energías desde en orden de 1 GeV hasta el orden de los 1000 GeV encontrándose el valor medio para estas energías en 243 GeV.

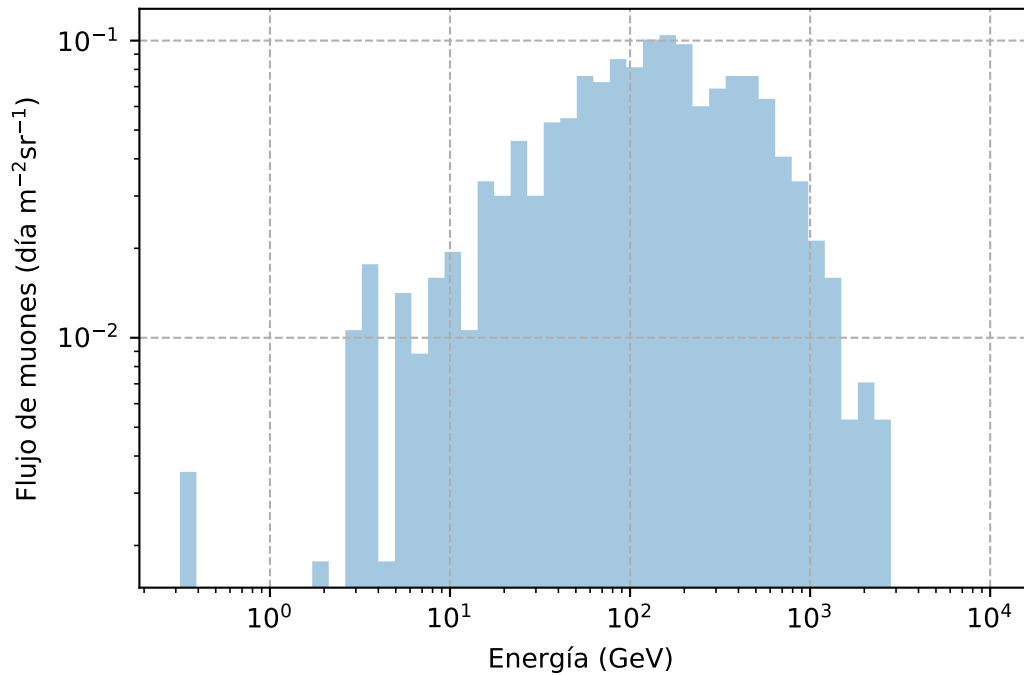


Figura 3.11: Distribución total de la energía en el interior del laboratorio con un valor medio de la energía de 243 GeV y un total de  $(1,47 \pm 0,02)$  por día por  $m^{-2}sr^{-1}$ .

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  $(1,47 \pm 0,02)$  muones por día por  $m^{-2}sr^{-1}$ .

Este resultado resulta relevante a la hora de evaluar la atenuación ocasionada por la montaña dentro del laboratorio, que, como se menciona en [9], se esperaba que fuera del orden de  $10^{-7}$  [9]. Considerando que el límite de energía impuesto a los secundarios es 800 GeV y el trabajar únicamente con muones que tienen posibilidad de alcanzar el laboratorio elimina de antemano un factor del orden de  $10^5$  partículas, y que además, como se mencionó en el capítulo 3, en el estudio preliminar de las simulaciones, los muones con posibilidades de alcanzar el laboratorio son del orden de 100 en total, este cálculo confirma las estimaciones iniciales.

# Capítulo 4

## 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 el Software CORSIKA/ARTI para los sitios designados como el pico y la base de la montaña bajo la cual se encontrará el laboratorio. Estas simulaciones contaban con un rango de energía de los primarios de  $10^3$  GeV a  $10^9$  GeV en la energía de las partículas primarias y un corte inferior de 800 GeV para las partículas secundarias.
- Un estudio de la dispersión angular de los muones con respecto a su partícula primaria. Debido a la geometría del problema resulta de importancia conocer el ángulo de incidencia de los muones. Por lo tanto se estudió la dispersión en ángulo de los muones con respecto a su primario encontrando un valor medio de  $\bar{\theta} = 0^\circ$  con una desviación estándar de  $\sigma = 0,04^\circ$ . Lo que demostró con este resultado es que los muones llegan al laboratorio manteniendo la dirección del primario.
- Un análisis de la variación de la pérdida de energía de tres muones de energías iniciales de 800 GeV, 1000 GeV y 3000 GeV. Este análisis se realizó para 100 m de material con valores de densidad de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $2 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$  (ver cuadro 3.1). Se observó que para una misma energía el efecto de la densidad está entre un 3 % y un 4 % cada  $0,5 \text{ g cm}^{-3}$ .

En base a estos estudios se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se logró, a partir del modelo conformado de la montaña calcular la opacidad en función del ángulo cenital para un observador dentro de la cámara del laboratorio.



- Con los resultados de las simulaciones realizadas y el cálculo de la función de transferencia se encontró que el flujo de muones resulta de  $(1,47 \pm 0,02)$  por día  $\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ .

Como trabajo a futuro para hacer este estudio y este modelo más preciso recomendaría un seguimiento de los estudios geológicos realizados en el sitio a fin de aproximar cada vez mejor el modelo del interior de la montaña a la realidad. Y además resulta recomendable también modelar la transferencia en la montaña para otras partículas altamente energéticas que puedan encontrarse en las simulaciones de lluvias atmosféricas extendidas y que en su interacción con la roca pueden decaer en muones.

# Apéndice A

## CORSIKA

CORSIKA es un programa detallado basado en el método de Monte Carlo para estudiar la evolución de lluvias atmosféricas extendidas iniciadas por fotones, protones, núcleos u otras partículas. Sus aplicaciones van desde experimentos con telescopios Cherenkov ( $E_p \approx 10^{12}$  eV) hasta las energías más altas observadas ( $E_p > 10^{20}$  eV). Por ejemplo, los estudios realizados para la colaboración LAGO (Latin American Giant Observatory) para estimar la influencia de la actividad solar en el flujo de secundarios en la atmósfera[21], o para modelar la respuesta de los detectores de esta misma colaboración [18].

Con este programa se han realizado muchos cálculos con  $p$ ,  $\alpha$ ,  $O$ ,  $Fe$  y  $\gamma$  primarios en un rango de energía de  $10^{11}$  eV  $\leq E_o \leq 10^{16}$  eV por el grupo KASCADE [22]. Además varios laboratorios alrededor del mundo usan CORSIKA para interpretar y entender sus experimentos de detección de astropartículas.

A continuación, se dará una breve descripción de las principales características de este programa y del manejo de sus parámetros[4].

### ■ Partículas

Las partículas en el programa están completamente definidas por su identificación, su factor de Lorentz, el ángulo cenital y acimutal de su trayectoria, el tiempo desde la primera interacción del primario y las tres coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$  y  $z$  del eje de la lluvia. Las masas nucleares se toman como la suma de las masas de los nucleones ignorando las energías de ligadura.

### ■ Sistema de coordenadas

Las coordenadas en CORSIKA se definen con respecto a un sistema de coordenadas cartesiano con el eje  $x$  positivo en dirección al norte magnético, el eje  $y$  positivo al oeste y el eje  $z$  hacia arriba. Esta definición es necesaria porque el campo magnético terrestre se tiene en cuenta.

### ■ Atmósfera

La variación de densidad de la atmósfera en función de la altura está modelada por 5 capas. El límite de la atmósfera en este sistema se define con la altura. En la más baja de las capas la densidad sigue una dependencia exponencial con la altura llevando a una relación entre la opacidad  $\kappa(h)$  de la atmósfera y la altura  $h$  de la forma:

$$\kappa(h) = a_i + b_i e^{\frac{-h}{c_i}} \quad i = 1, \dots, 4 \quad (\text{A.0.1})$$

En la quinta capa la masa por unidad de área decrece linealmente como:

$$\kappa(h) = a_5 - b_5 \left( \frac{h}{c_5} \right) \quad (\text{A.0.2})$$

donde la masa por unidad de área  $\kappa(h)$  se desvanece a la altura  $h = 112,8$  km. Los parámetros  $a_i$ ,  $b_i$  y  $c_i$  se seleccionan de manera que la función  $\kappa(h)$  es continua en los límites de las capas y también es continua su derivada.

### ■ Generador de números aleatorios

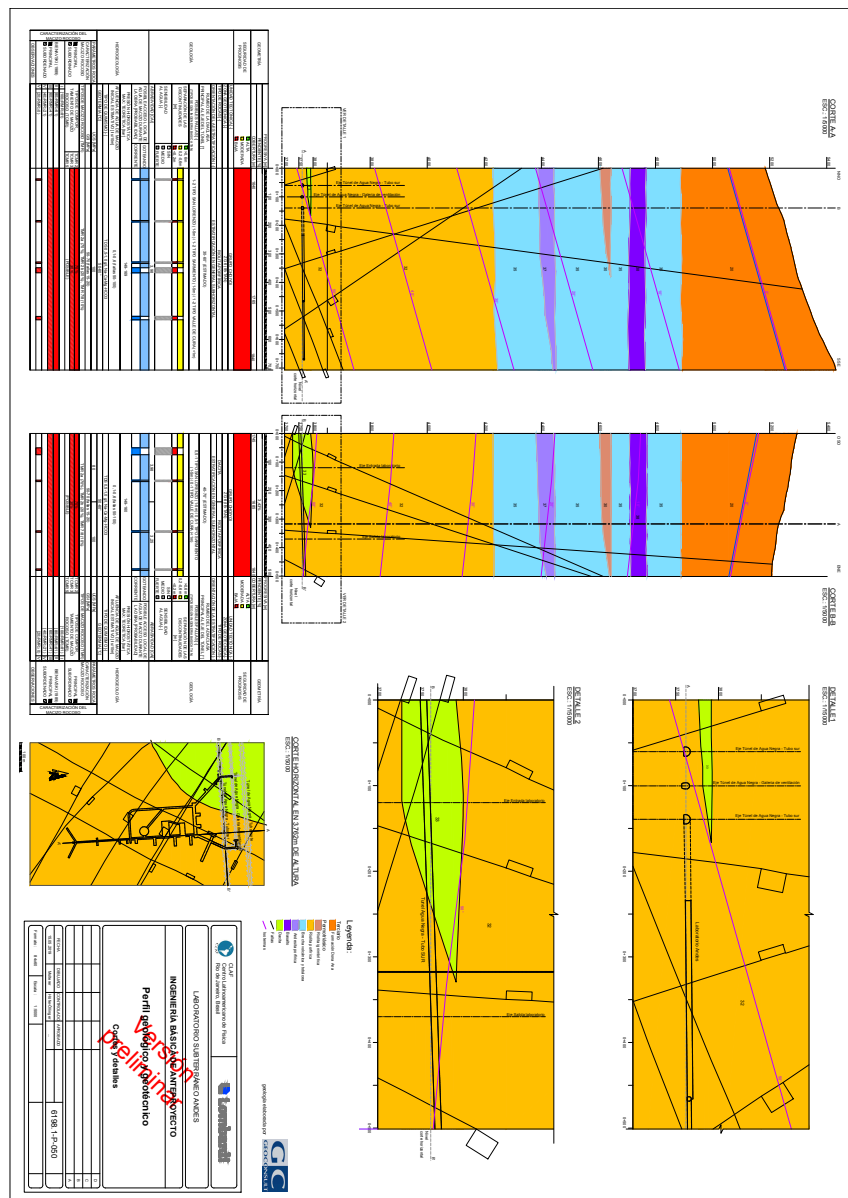
El método de Monte Carlo está basado esencialmente en números aleatorios y, por lo tanto, un generador de números aleatorios compatible con los largos y complejos cálculos de hoy en día es indispensable. CORSIKA opera con el generador de números aleatorios RANMAR en su versión implementada por la librería de programación del CERN. Es un generador de números pseudo aleatorios que produce números distribuidos de manera aleatoria. Este código satisface pruebas rigurosas de aleatoriedad y uniformidad y es lo suficientemente rápido.

En este anexo se dio una descripción de las características más básicas de CORSIKA, para mayor detalle se recomienda la Guía de física de CORSIKA [3] y el Manual de usuario de CORSIKA [4].



# Apéndice B

## Estudio geológico preliminar



Este es un esquema más detallado del estudio preliminar realizado por la empresa Lombardi S.A [2]. Es una aproximación de la estructura geológica de la montaña donde se muestra un corte transversal y un corte perpendicular al laboratorio (en este trabajo se utilizó el corte perpendicular y se consideró simetría acimutal). Los colores indican los distintos tipos de roca, cuyas densidades están dadas en [2].



# Bibliografía

- [1] Arribere et al. *Expected backgrounds at the ANDES underground laboratory*. 3<sup>rd</sup> international workshop for the design of the ANDES underground laboratory., 2012.
- [2] Lombardi S.A and Ingenieros Consultores. *Nuevo Estudio Conceptual*. ANDES, CLAF, 2015.
- [3] D. Heck, J. Knapp, J.N Capdevielle, G.Schatz, and T. Thouwn. *CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1998.
- [4] D. Heck and 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.
- [5] LAGO collaboration. <http://wiki.lagoproject.net/index.php/ARTI>. Lago.net, 2019.
- [6] Donald E. Groom, Nikolai V. Mokhov, and Sergei I. Striganov. *Muon Stopping Power and range tables 10 MeV–100 TeV*. Atomic Data and Nuclear Data tables, 2001.
- [7] C. E. Aalseth et al. *Search for An Annual Modulation in Three Years of CoGeNT Dark Matter Detector Data*. Cornell University, 2014.
- [8] P. A. N. Machado, T. Muhlbeier, H. Nunokawa, and R. Zukanovich Funchal. *Potential of a Neutrino Detector in the ANDES Underground Laboratory for Geophysics and Astrophysics of Neutrinos*. Physics Review D, 2012.
- [9] Dib Claudio O., Bertou Xavier, Civitarese Osvaldo, D'Olivo Juan Carlos, and Dos Anjos Joao C. *The ANDES Underground Laboratory*. NuFact15, 2015.
- [10] C. Kraus for the SNO+ collaboration. *SNO with liquid scintillator: SNO+*. Progress in particle and nuclear physics, 2006.



- 
- [11] C. A Duba et al. *HALO: the helium and lead observatory for supernova neutrinos*. Journal of physics: conference series, 2008.
- [12] Neta A. Bahcall. *Dark Matter Universe*. PNAS, 2015.
- [13] G. Bertone. *The moment of truth for WIMP dark matter*. Nature, 2010.
- [14] LUNA collaboration. *First measurement of the  $d(p,\gamma)^3\text{He}$  cross section down to the solar Gamow peak*. Nuclear Physics A, 2002.
- [15] M. Tanabashi et al. *Particle data group*. Physics Review, 2018.
- [16] H. Asorey. *Tesis carrera de doctorado en física: Los detectores Cherenkov del observatorio Pierre Auger y su aplicación al estudio de fondos de radiación*. Instituto Balseiro, 2012.
- [17] N. J Carron. *An Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter*. Taylor & Francis, 2006.
- [18] R. Calderón-Ardila, A. Jaimes-Motta, C. Sarmiento-Cano, M. Suárez-Durán, A. Vásquez-Ramírez, and for the LAGO Collaboration. *Modeling the LAGO's detectors response to secondary particles at ground level from the Antarctic to Mexico*. Proceedings of science, 2019.
- [19] S. Ostapchenko. *Air Shower calculations with QGSJET-II: effects of Pomeron loops*. Nuclear Physics B, 2009.
- [20] J. Knapp, D. Heck, and G. Schatz. *Comparison of Hadronic Interaction Models Used in EAS Simulations*. Nuclear Physics B, 1997.
- [21] H. Asorey, L. A. Núñez, and M. Suárez-Durán. *Preliminary Results From the Latin American Giant Observatory Space Weather Simulation Chain*. Advanced Earth and Space Science, 2018.
- [22] KASCADE Collaboration. *The Cascade Experiment*. Nuclear Physics B, 1998.