

Caracterización de perfiles atmosféricos para la cadena de simulación de la colaboración LAGO

Jennifer Grisales Casadiegos

Trabajo de Grado para optar al título de Física

Director

Luis A. Núñez

Doctorado en Ciencias

Co-Director

Christian Sarmiento Cano

Maestría en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2020

¿En perseguirme, mundo, qué interesas?

¿En qué te ofendo, cuando sólo intento

poner bellezas en mi entendimiento

y no mi entendimiento en las bellezas?

Yo no estimo tesoros ni riquezas,

y así, siempre me causa más contento

poner riquezas en mi entendimiento

que no mi entendimiento en las riquezas.

Y no estimo hermosura que vencida

es despojo civil de las edades

ni riqueza me agrada fementida,

teniendo por mejor en mis verdades

consumir vanidades de la vida

que consumir la vida en vanidades.

“Quéjase de la suerte” por Juana Inés de Asbaje.

Este trabajo va dedicado a todas las mujeres que han defendido nuestro derecho al conocimiento.

Agradecimientos

Son muchas las personas que, sabiéndolo o no, fueron contribuciones significativas, en una combinación lineal que determinó el camino de mi formación como Física. A todos y todas, gracias. Fuertemente en mis recuerdos mis compañeros de aprendizaje Edwin Florez, Genderson Rueda y Yerson Barragán, con quienes pese a las dificultades, disfrutamos esta etapa universitaria formando no solo nuestro pensamiento científico, sino también construyendo una necesaria conciencia de clase que orientará nuestro quehacer académico y político por siempre. Debo agradecer a mi madre y mi padre, porque debido a su formación, desde mi infancia nació el sueño de vivir la ciencia. Personas como José Quintero que me alentaron a seguir adelante y sacar valentía de donde no había, gracias. También a Jesús Sánchez por abrirme las puertas de su casa, y su familia, gracias por todo el afecto y el apoyo incondicional. A mi mejor amiga Luz Marina Cabrera por ser mi confidente y por jugar conmigo a dibujarnos mutuamente alas para volar y soñar.

Gracias a Luis Núñez por inspirarme siempre y mostrarme que la ciencia es el camino. Gracias Christian Sarmiento por creer en mí y por su tiempo que valoré infinitamente. También gracias a Yeinzon Rodríguez porque me demostró que es posible seguir viendo la física con curiosidad y pasión.

Finalmente quiero agradecer a Jesús Peña haber sido mi apoyo emocional en todo este proceso. Por ser mi ejemplo e inspiración de esfuerzo, perseverancia, trabajo duro y amor genuino por la ciencia. Gracias por tanto amor.

Tabla de Contenido

Introducción	13
1. Astropartículas y cascadas aéreas extensas	16
1.1. La atmósfera como medio de interacción	23
1.2. Simulaciones de Cascadas Aéreas Extensas	28
2. Estimación del flujo de fondo de secundarios	35
2.1. Flujo de fondo a nivel de Bucaramanga	36
2.2. El sistema global de asimilación de datos, GDAS	40
2.3. Creación y comparación de perfiles atmosféricos mensuales	42
2.4. Validación de los perfiles para la atmósfera de Malargüe	47
3. Influencia de la atmósfera en el flujo de secundarios	51
4. Conclusiones	59
Referencias Bibliográficas	62
Apéndices	66

Lista de Figuras

Figura 1.	Espectro diferencial de rayos cósmicos como función de la energía	18
Figura 2.	Simulación del desarrollo de una EAS generada por un protón de $10^{14}eV$.	23
Figura 3.	Esquema del desarrollo de una EAS iniciada por un hadrón.	24
Figura 4.	Presión atmosférica y densidad del aire en función de la altitud.	26
Figura 5.	Temperatura promedio para las capas inferiores de la atmósfera.	27
Figura 6.	Presión atmosférica vs la altura para Estados Unidos y Stuttgart.	34
Figura 7.	Flujo de astropartículas como función de su energía.	37
Figura 8.	Representación del método de asimilación de datos.	41
Figura 9.	Esquema de GDASTOOL	43
Figura 10.	Secuencia lógica para obtener los perfiles mensuales usando GDASTOOL.	44
Figura 11.	Promedio de la densidad atmosférica para la ciudad de Bucaramanga en enero.	45
Figura 12.	Promedios mensuales vs perfiles tropical y subtropical de CORSIKA.	46
Figura 13.	Diferencias entre datos de radiosonda y GDAS en función de la altura.	48
Figura 14.	Distribución longitudinal de secundarios sobre Malargüe.	50
Figura 15.	Flujo de secundarios en función de la energía a la altura de Bucaramanga.	51
Figura 16.	Espectro de energía de secundarios a la altura de Bucaramanga	53
Figura 17.	Comparación del flujo, atmósferas mensuales vs perfil predeterminado.	54

Figura 18.	Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^6 GeV$.	56
Figura 19.	Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^6 GeV$.	57
Figura 20.	Distribución longitudinal de un átomo de hierro de $1 \cdot 10^6 GeV$.	57
Figura 21.	Ecuación de Bethe-Bloch para los muones.	69
Figura 22.	Flujo de energía para hadrones de alta energía	73
Figura 23.	Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^3 GeV$.	78
Figura 24.	Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^8 GeV$.	79
Figura 25.	Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^3 GeV$.	79
Figura 26.	Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^6 GeV$.	80
Figura 27.	Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^8 GeV$.	80
Figura 28.	Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^3 GeV$.	81
Figura 29.	Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^6 GeV$.	81
Figura 30.	Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^8 GeV$.	82

Lista de Tablas

Tabla 1.	Composición estándar de la atmósfera.	25
Tabla 2.	Distribución de primarios en un tiempo de 120 segundos.	38
Tabla 3.	Xmax para protones, hierros y fotones de 1E3, 1E6 y 1E8 GeV con y sin GDAS.	58
Tabla 4.	Parámetros atmosféricos Enero.	74
Tabla 5.	Parámetros atmosféricos Febrero.	74
Tabla 6.	Parámetros atmosféricos Marzo.	74
Tabla 7.	Parámetros atmosféricos Abril.	75
Tabla 8.	Parámetros atmosféricos Mayo.	75
Tabla 9.	Parámetros atmosféricos Junio.	75
Tabla 10.	Parámetros atmosféricos Julio.	76
Tabla 11.	Parámetros atmosféricos Agosto.	76
Tabla 12.	Parámetros atmosféricos Septiembre.	76
Tabla 13.	Parámetros atmosféricos Octubre.	77
Tabla 14.	Parámetros atmosféricos Noviembre.	77
Tabla 15.	Parámetros atmosféricos Diciembre.	77

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Simulación de las interacciones electromagnéticas y hadrónicas en CORSIKA	66
Apéndice B. Parámetros de los nuevos perfiles atmosféricos construidos con GDAS.	74
Apéndice C. Distribuciones longitudinales de primarios individuales	78

Resumen

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN DE PERFILES ATMOSFÉRICOS PARA LA CADENA DE SIMULACIÓN DE LA COLABORACIÓN LAGO *

AUTORA: Jennifer Grisales Casadiegos **

PALABRAS CLAVES: Astropartículas, flujo de secundarios, atmósfera, simulaciones, cascadas aéreas extensas.

DESCRIPCIÓN:

Uno de los objetivos del programa de clima espacial del *Latin American Giant Observatory* (LAGO), es estudiar la influencia de la actividad solar en las variaciones del flujo de partículas secundarias, producidas durante la interacción de las astropartículas con la atmósfera. Con este fin, se realiza una cadena de simulaciones, que estima de forma detallada, el desarrollo del primario desde su ingreso a la atmósfera terrestre, hasta la respuesta en los detectores Cherenkov de agua. El presente trabajo, completa esta cadena de simulaciones, concentrándose en el estudio del efecto que tiene la atmósfera en el flujo de fondo de secundarios. Para ello, se desarrolló una metodología que permite la creación y uso de perfiles atmosféricos mensuales, para cualquier ubicación geográfica, en las simulaciones de EAS dentro del código CORSIKA. Además se demostró la pertinencia de reemplazar los modelos atmosféricos predeterminados por nuevos perfiles, basados Sistema Global de Asimilación de datos (GDAS), comprobando, que los nuevos modelos atmosféricos mensuales, son capaces de reproducir, en el flujo de secundarios, el efecto de los cambios de temperatura a lo largo del año, y permitiendo refinar las estimaciones realizadas.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Luis A. Núñez. Codirector: Christian Sarmiento.

Abstract

TITLE: CHARACTERIZATION OF ATMOSPHERIC PROFILES FOR THE LAGO SIMULATION CHAIN *

AUTHOR: Jennifer Grisales Casadiegos. **

KEYWORDS: Astroparticle, particle flux, atmosphere, simulation, extensive air shower.

DESCRIPTION: One of the main objectives of the Space Weather program of the Latin American Giant Observatory (LAGO), is to study the influence of the solar activity on the secondary particle flux variations, produced during the interaction between astroparticles with atmosphere. To this end, a chain of simulations is carried out, which estimates in detail, the Primary's development, from its entry into the Earth's atmosphere, to the Water Cherenkov Detector response. This work, complete the simulation chain, focusing their interest in to study the atmospheric effect on the secondary particle flux. To do this it developed a methodology that allows the creation and use of monthly atmospheric profiles, for any localization, in the EAS simulations within the CORSIKA code. Furthermore, the relevance to using the new monthly profiles it was checked, because they are able to reproduce in the secondary particle flux, the effect of the temperature changes along the year. This allows refine the estimates made.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Luis A. Núñez. Codirector: Christian Sarmiento.

Introducción

Para el año 1912, el físico Victor Hess, mediante experimentos con globos aerostáticos y electrómetros, pudo evidenciar, que la ionización atmosférica aumenta proporcionalmente con la altitud. Había encontrado que el fondo de radiación presente, tenía un aporte significativo del espacio exterior, descubriendo así las astropartículas. Desde entonces, se han desarrollado decenas de experimentos alrededor del mundo, tanto en Tierra, como en el espacio, que intentan comprender a profundidad su origen, además de obtener información de fenómenos astrofísicos como explosiones de supernovas, kilonovas, entre otros. Adicionalmente, también se han desarrollado diversas aplicaciones en Tierra, que aprovechan la existencia de esta radiación por ejemplo, el detector MuRay (Ambrosino y col., 2014), el proyecto MuTe (Vásquez-Ramírez y col., 2019), entre otros.

En esencia, el flujo de radiación medido en la superficie de la Tierra, es consecuencia principalmente, de partículas provenientes del espacio que llegan a la atmósfera e interactúan con ella. Este fenómeno está determinado por fenómenos físicos de dispersión, decaimientos y absorción. Además, para energías por debajo de 10^{15} eV, está modulado por el viento solar. La influencia de la actividad solar en el campo geomagnético y su relación con el funcionamiento de muchos dispositivos tecnológicos de la vida diaria, hacen que el transporte de partículas a través de la heliósfera sea un tema de gran interés en la física espacial.

Por tal razón, el *Latin American Giant Observatory* (LAGO), ha desarrollado el programa

de Clima Espacial, que busca entender la influencia del viento solar en el flujo de astropartículas, a partir de detectores de superficie. Dichos detectores pueden registrar partículas primarias de baja energía de forma indirecta, permitiendo obtener información de la actividad solar, complementando las observaciones que se realizan desde el espacio.

Con base en lo anterior, una de las tareas fundamentales que se propone el programa de clima espacial de LAGO es estimar de forma precisa el flujo de partículas que llegan a nivel del suelo. Para tal fin, se ha desarrollado una secuencia de simulaciones, que tienen en cuenta el transporte de primarios en la heliosfera, el flujo de primarios a través de la magnetosfera, la llegada de primarios a la atmósfera, la formación de lluvias de secundarios o cascadas aéreas extensas (EAS), y la llegada de estos a los detectores de la colaboración.

En la actualidad, para el estudio de las EAS y su propagación a través de la atmósfera, LAGO hace uso de perfiles atmosféricos predefinidos en software CORSIKA. Para el caso de Bucaramanga, usa el perfil subtropical que corresponde a la región del globo en la que se ubica la ciudad. Sin embargo, se debe realizar un estudio más detallado que permita determinar la pertinencia de estos perfiles y la sensibilidad que tienen a variaciones en el flujo estimado.

Por lo anterior, el presente trabajo se concentra en el estudio del efecto que tiene la atmósfera en el flujo. Para esto, se ha desarrollado una metodología que permite la creación y uso de perfiles atmosféricos mensuales, para cualquier ubicación geográfica, dentro del código CORSIKA. En el

capítulo 1, se realiza una breve revisión de los conceptos relacionados con las astropartículas y las cascadas aéreas extensas. Además, se describen algunos detalles relevantes de la estructura del código CORSIKA, tanto en los procesos de interacción como en las características de la atmósfera, y su modelado.

A continuación, en el capítulo 2, se presenta la forma como se estima el flujo de fondo de secundarios, y se introduce la metodología para crear perfiles atmosféricos mensuales, usando el Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS). En éste capítulo, se muestran los resultados de comparar el perfil atmosférico que actualmente se usa para la ciudad de Bucaramanga, contra los perfiles atmosféricos que fueron construidos para este trabajo.

Finalmente, en el capítulo 3, se realiza un estudio detallado, de los efectos sobre el flujo de partículas, de las variaciones de densidad estimadas que fueron observadas mes a mes, y cómo estos efectos se relacionan con los cambios de temperatura, a lo largo del año. Además, se muestran las diferencias observadas en las estimaciones del flujo entre el perfil atmosférico subtropical, y los nuevos perfiles atmosféricos que fueron construidos. Esperando con esto poder confirmar la importancia del uso de perfiles atmosféricos en cada sitio de la colaboración y completar la cadena de simulaciones de la colaboración LAGO.

1. Astropartículas y cascadas aéreas extensas

Las astropartículas son fotones, electrones, núcleos atómicos y cualquier otra partícula de origen astrofísico. Estas viajan por el espacio interestelar a velocidades cercanas a las de la luz y pueden llegar a penetrar en la atmósfera terrestre. Fueron descubiertas en el año 1912 por el Físico Víctor Hess quien a través de experimentos con globos aerostáticos, encontró evidencia de radiación que provenía del espacio. Estas partículas incidentes son llamadas primarias, cuyo rango de energía se encuentra desde los 10^5 eV, que corresponde al viento solar y fuentes provenientes de la galaxia, hasta más allá de 10^{20} eV, relacionadas con fuentes extragalácticas (Aab y col., 2014).

La detección de rayos cósmicos se realiza directa o indirectamente dependiendo del rango de energía de los primarios. En la figura 1, se puede observar el flujo de primarios como función de la energía. A éste se ajusta a una ley de potencias de la forma:

$$\Phi(E) \approx E^{-\alpha} \frac{\text{partículas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV}}, \quad (1)$$

donde Φ corresponde al número de astropartículas que llegan a con una energía determinada dE en un ángulo sólido $d\Omega$, llamado también flujo diferencial, y α el índice espectral. Este flujo diferencial puede estar determinado en general, por la expresión:

$$\Phi(E) \equiv \frac{dN}{A \cdot T \cdot d\Omega \cdot dE} \left[\frac{\text{partículas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{GeV}} \right], \quad (2)$$

que permite caracterizar, el flujo de primarios que llegan a la Tierra. Las mediciones de los observatorios para diferentes rangos de energía mostrados en la figura 1, evidencian tres cambios en este índice, α . A las zonas donde el valor de α cambia, se les llama rodilla ($10^{15}eV$), tobillo $10^{18}eV$ y corte $10^{19}eV$. (Patrignani, 2016) El cambio en el índice espectral sugiere diferencias en la procedencia de las fuentes que las producen, su naturaleza y sus mecanismos de aceleración.

La detección directa de los primarios se puede realizar en la región de bajas energías hasta $\approx 10^{14}eV$ (Spurio, 2015). Aquí detectores en satélites pueden identificar partículas individuales, separar diferentes isótopos del mismo elemento y discernir entre energía, carga y masa. Por encima de los $10^{14}eV$ el flujo de partículas primarias está por debajo de decenas de partículas por metro cuadrado al año, lo que disminuye la probabilidad de detectarlas directamente.

Sin embargo, los primarios al llegar a la atmósfera, interactúan con los núcleos del aire, y producen otras partículas con menos energía, llamadas secundarias. Este fenómeno se produce en cadena desde el punto más alto de la atmósfera hasta que, finalmente, llegan a la superficie de la Tierra partículas menos energéticas como electrones, fotones y muones. Así, la detección directa puede ser reemplazada por instrumentos a nivel del suelo que registran el rastro que deja las cascadas (Asorey y col., 2015).

A este fenómeno de producción en cadena se le denomina cascada aérea extensa o EAS por sus siglas en inglés. El comportamiento de una EAS, depende de la energía, el ángulo cenital de

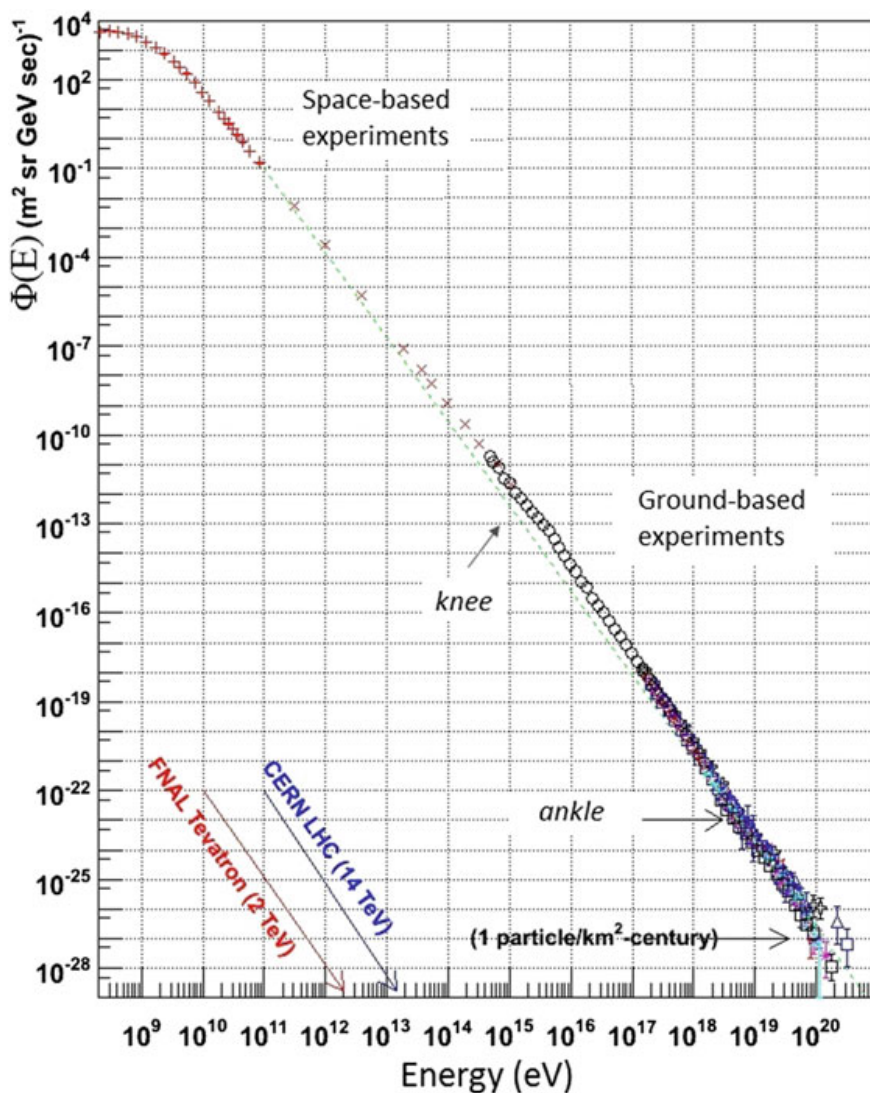


Figura 1. Espectro diferencial de rayos cósmicos como función de la energía (Spurio, 2015). Se ha elevado a la potencia 2.6 para hacer más notables los cambios en la pendiente del espectro. Se distinguen entonces la rodilla (10^{15} eV), tobillo (10^{18} eV) y corte (10^{19} eV). La gráfica es construida a partir de diferentes observatorios que miden directa o indirectamente en un rango de energías específico. Las grandes barras de error entre 10^{18} a 10^{20} eV se debe a que la incidencia de partículas en estos rangos de energía tiene mucha menor ocurrencia.

incidencia y el tipo de primario, además de la cantidad de atmósfera atravesada, también llamada profundidad atmosférica X .

La profundidad atmosférica X , es un parámetro que permite estimar la cantidad de materia con la que ha interactuado el primario al penetrar en la atmósfera. La expresión:

$$X_v = \int_h^{\infty} \rho(h') dh', \quad (3)$$

permite cuantificar la cantidad de materia que atraviesa el primario en su viaje por la atmósfera desde el punto más alto hasta el nivel del mar (Spurio, 2015). La dependencia de la densidad con la altura, puede ser determinada analizando la atmósfera como un gas ideal. Así, la presión a una profundidad atmosférica determinada es:

$$P = \frac{mg}{s} = \frac{g}{s} \int_h^{\infty} \rho(h') S dh' = gX_v. \quad (4)$$

Además, con base en la ecuación (3) se tiene que la densidad puede ser expresada de la forma:

$$\rho = -\frac{dX_v}{dh}, \quad (5)$$

donde el signo negativo representa el hecho de que la densidad disminuye a medida que h se incrementa. Además, la ecuación del gas ideal,

$$T = \frac{MP}{k\rho}, \quad (6)$$

relaciona la temperatura T con la presión P y la densidad del gas. Reemplazando las expresiones (4) y (5) se tiene:

$$T(h) = -\frac{M}{k} \frac{gX_v}{dX_v/dh}. \quad (7)$$

Donde k es la constante de Boltzman y M la masa molecular promedio, que se construye a partir de los porcentajes de cada uno de sus componentes y tiene un valor de $A = 14,5g/mol$. Una primera aproximación para encontrar una expresión para la profundidad atmosférica en base al gas ideal, considerar una temperatura constante (Spurio, 2015). Para ello tomemos en la escala en altitud, para la atmósfera, que corresponderá al incremento en la altitud para el cual la presión atmosférica decrece en un factor de e . Y está representado por la expresión:

$$h_0 = \frac{kT}{Mg}; \quad (8)$$

Usando el valor de M para la superficie de la Tierra, y una temperatura aproximada de $290K$, $h_0 = 8,4km$. En la región donde las astropartículas interactúan, la temperatura está entre $210K - 240K$ y $h_0 = 6km - 7km$. Por lo anterior, podemos encontrar el valor de la profundidad atmosférica como:

$$X_v = X_v^{atm} e^{-h/h_0}; \quad (9)$$

Con $X_v^{atm} = 1030g/cm^2$. Considerando la curvatura terrestre y un ángulo cenital θ de incidencia

del primario, la relación entre h y la dirección de propagación l en la atmósfera es:

$$h = l \cos \theta + \frac{1}{2} \frac{l^2}{R_{\oplus}} \sin^2 \theta \quad (10)$$

Así, la profundidad atmosférica para una inclinación específica es llamada **profundidad de inclinación** y corresponde a:

$$X(l) = \int_l^{\infty} \rho(h) dl, \quad (11)$$

donde, para ángulos cenitales, $\theta < 60$ se puede calcular esta profundidad como (Spurio, 2015):

$$X = X_v \cos \theta \quad y \quad \rho = \frac{X_v}{h_0}. \quad (12)$$

Otro parámetro de vital importancia es el X_{max} , que corresponde al valor de profundidad atmosférica, en que el número de partículas secundarias generadas alcanza su máximo. Una característica destacable, está en que es proporcional al logaritmo de la masa del primario que dio comienzo a la EAS (Aab y Abreu, 2014). Considerando que debido las fluctuaciones en la estimación del punto de primera interacción, es difícil medir experimentalmente su masa, es de gran utilidad que a partir del X_{max} ésta podría ser inferida estadísticamente (Aab y Abreu, 2014).

En consecuencia, el desarrollo de una EAS también se puede caracterizar por el número de partículas generadas a una altura determinada desde un punto de referencia. En el proceso de

interacción, ese punto de referencia es llamado eje de la lluvia, que corresponde a la dirección de propagación del primario inicial. Además, la sección transversal de la EAS varía en el tiempo, aumentando en los primeros metros, y disminuyendo drásticamente luego que se alcanza una energía crítica. Llegando al nivel del mar una cantidad mucho menor. Esta sección transversal es denominada frente de la lluvia.

La figura 2 muestra una simulación de una cascada producida por un protón de 10^{14} eV. La parte (a) muestra el frente de la lluvia sobre el nivel del mar. La parte (b) muestra el número de partículas secundarias como función de la altura en km. Se puede observar que, el mayor número de partículas se obtiene a una altura aproximada de 6 km. La parte (c) muestra el número de secundarios como función de la distancia radial al eje de la lluvia.

Además, teniendo en cuenta la naturaleza de las partículas secundarias, las EAS pueden clasificarse en tres constituyentes principales: la componente electromagnética, que está conformada por electrones, positrones y fotones; la componente hadrónica, constituida de piones, kaones y bariones, y la componente muónica, generada por el decaimiento de piones y kaones cargados. La figura 3 ilustra los procesos de interacción mostrados anteriormente y cómo éstos generan cada una de las componentes.

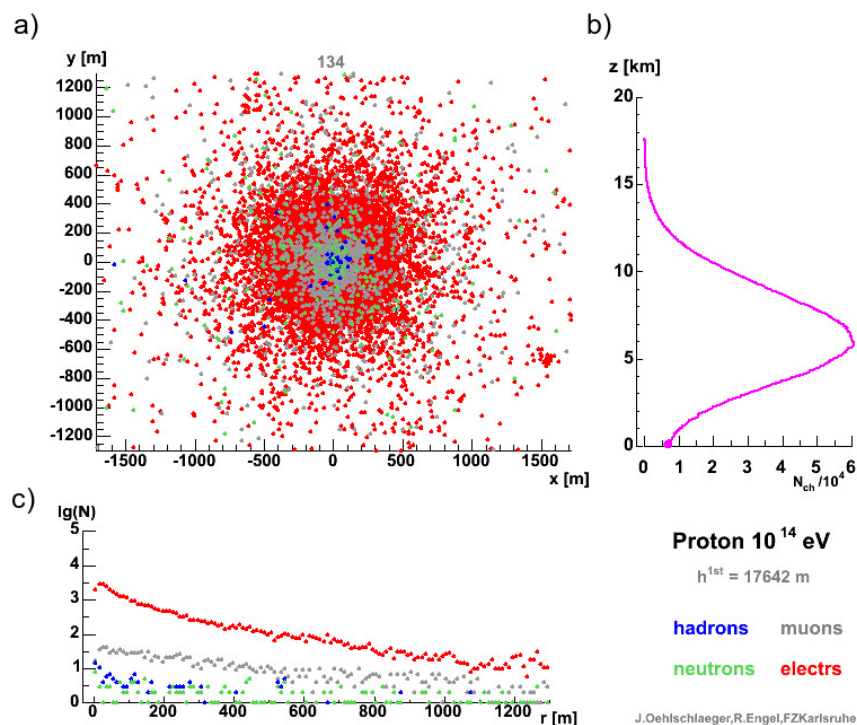


Figura 2. Simulación del desarrollo de una EAS generada por un protón de 10^{14} eV como función de la altura sobre el nivel del mar (Oehlschläger y Engel, 2018 (Accedido Julio 16, 2018)). La parte (a) muestra el frente de la lluvia, a una altura de 134m sobre el nivel del mar. La parte (b) muestra el número de partículas secundarias como función de la altura en km y la parte (c) muestra el número de secundarios como función de la distancia al eje de la lluvia.

1.1. La atmósfera como medio de interacción

Como se mencionó anteriormente, la atmósfera es un parámetro importante a la hora de estimar el flujo de secundarios, es necesario conocerla y caracterizarla adecuadamente. La atmósfera es una delgada capa gaseosa que recubre la superficie de la Tierra, principalmente compuesta por nitrógeno y oxígeno. En la tabla 1 se observan los porcentajes de abundancia de los elementos que la componen.

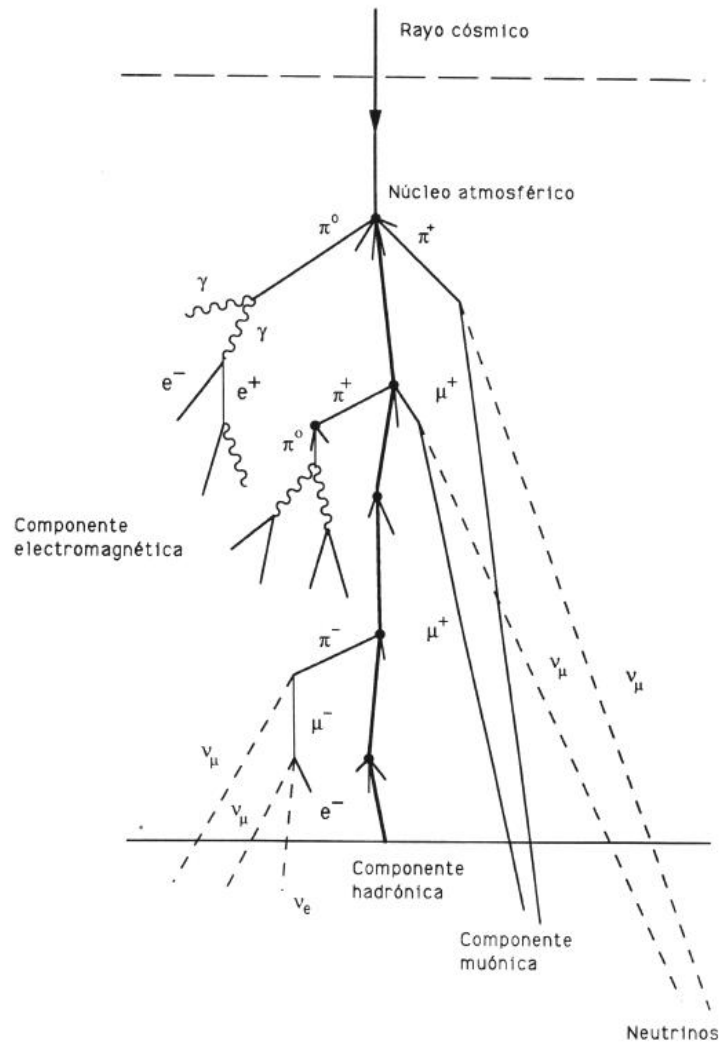


Figura 3. Esquema del desarrollo más probable de una EAS iniciada por un hadrón (Suarez-Duran, 2011). En la figura se observa el decaimiento del hadrón en piones cargados y neutros, y estos a su vez, al decaer, generan fotones, electrones y muones. Se identifican tres componentes: electromagnética, muónica y hadrónica.

Estructura de la atmósfera: La atmósfera se puede clasificar por una serie de capas, estas se pueden definir de acuerdo al cambio en algunas propiedades físicas, como su temperatura, densidad, presión o sus propiedades eléctricas.

Tabla 1

Composición estándar de la atmósfera en la superficie de la Tierra (Ahrens, 2011).

GASES PERMANENTES			GASES VARIABLES			
Gas	Símbolo	% v/v de Aire Seco	Gas (y partículas)	Símbolo	% v/v	ppm
Nitrógeno	N_2	78.08	Vapor de Agua	H_2O	0 a 4	
Oxígeno	O_2	20.95	Dióxido de Carbono	CO_2	0.039	390*
Argón	Ar	0.93	Metano	CH_4	0.00017	1.7
Neon	Ne	0.0018	Óxido nitroso	N_2O	0.00003	0.3
Helio	He	0.0005	Ozono	O_3	0.000004	0.04**
Hidrógeno	H_2	0.00006	Material Particulado		0.000001	0.01-0.15
Xenón	Xe	0.000009	Clorofluorocarbonos CFCs		0.00000002	0.0002

* Para el CO_2 , 390 ppm significa que de cada millón de partículas de aire, 390 son CO_2 .

**Los valores estratosféricos a altitudes entre 11 y 50 km están entre los 5 y 12 ppm.

Para la densidad y la presión, en la figura 4 se observa una disminución a medida que se aumenta en altitud. Esto ocurre debido a la atracción gravitacional, que genera una mayor acumulación de moléculas de aire cerca de la superficie de la tierra.

En cuanto a la temperatura, en la figura 5 se observa que decrece desde el suelo hasta una altura de 11 km. Esto se puede explicar porque la luz del sol calienta la superficie de la Tierra y también el aire sobre él. La tasa de cambio de la temperatura con respecto a la altura es llamado *lapse rate* o gradiente adiabático. Este gradiente depende del día, la estación y la latitud.

La región de la atmósfera desde la superficie hasta alrededor de 11km es llamada troposfera, y contiene el clima al que estamos acostumbrados. Allí, las moléculas de aire pueden circular a

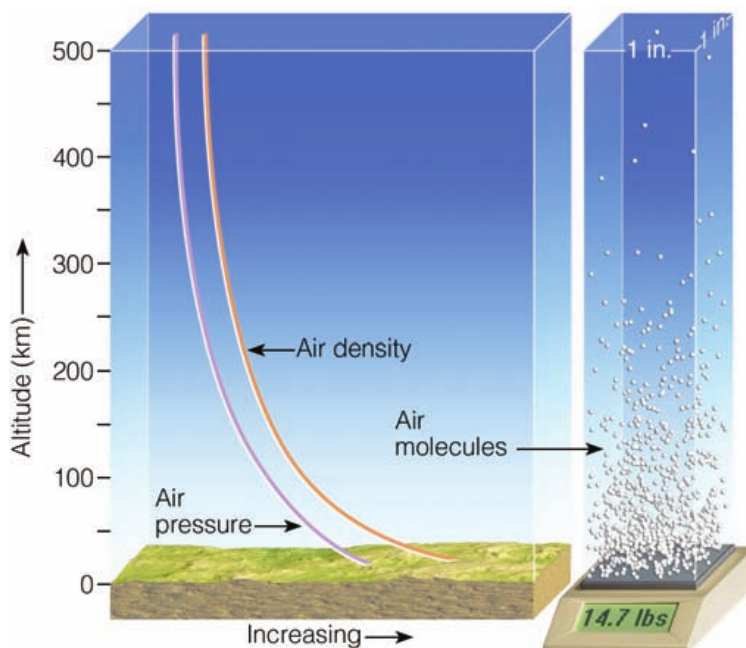


Figura 4. Comportamiento de la presión atmosférica y la densidad del aire con la altitud (Ahrens, 2011). Se observa una relación inversa, al aumentar la altitud, la presión tiende a cero.

través de una profundidad de más de 10km en pocos días, y su límite se determina por la posición en el que el aire deja de enfriarse.

Además en la figura 5, se puede observar que entre los ≈ 10 km y los 20 km, hay una región en altitud donde la temperatura del aire se mantiene constante. Se puede inferir que el gradiente adiabático es cero, y corresponde a la tropopausa. La altura a la que se encuentra la tropopausa varía, pero es encontrada a mayor altitud en regiones ecuatoriales y decrece en dirección a los polos. Luego de la tropopausa, viene la estratosfera. Se puede observar que en esta capa la temperatura del aire comienza a incrementarse con la altura, ocurriendo una inversión.

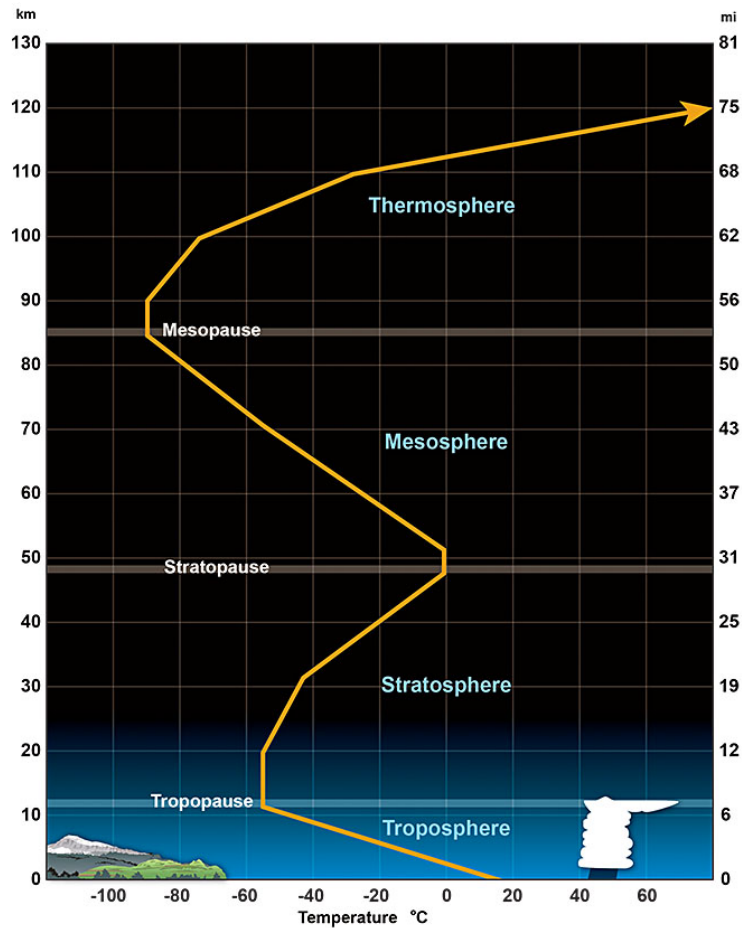


Figura 5. Perfil de temperatura promedio para las capas más inferiores de la atmósfera (*Average temperature profile for the lower layers of the atmosphere*). Se observan las regiones de pausa, donde la temperatura permanece constante en un rango de alturas. Estas brechas marcan el final de una capa y el comienzo de otra.

La razón de esto, es que el gas ozono presente a esta altitud, tiene la función de calentar el aire, debido a que absorbe la luz solar en el ultravioleta. Así, parte de esta energía absorbida calienta la estratosfera. Si el ozono no estuviera presente, el aire probablemente podría llegar a ser más frío con la altura como en la troposfera.

Sobre la estratosfera se encuentra la mesosfera. En esta capa el aire es extremadamente delgado, y la presión atmosférica es bastante baja. Sin embargo, el porcentaje de oxígeno y nitrógeno es cercano a los valores en la superficie de la Tierra. Con una temperatura promedio de -90°C , es la parte más fría de nuestra atmósfera. Finalmente se encuentra la termosfera, donde se vuelve a generar una inversión en la temperatura. Las moléculas de oxígeno absorben la luz, calentando el aire. Sin embargo, hay relativamente pocos átomos y moléculas lo que implica que la absorción de un pequeño porcentaje de energía solar, puede causar un gran incremento en la temperatura del aire. Además, es en la termosfera donde las partículas cargadas desde el Sol interactúan con las moléculas del aire produciendo las auroras. La región se extiende hasta los 500 km.

En consecuencia, la atmósfera no termina abruptamente en un punto, sino que va disminuyendo su densidad, tanto que la mayoría del material que la compone, se encuentra en los primeros 30 km. A pesar que aún hay moléculas que corresponden a la atmósfera cerca de los 500km, hay un límite para el cual, a cierta altitud se considera atmósfera y espacio exterior, y este límite se encuentra a $\approx 100\text{km}$. Esta región se conoce como Línea de Karman y se puede determinar, estimando la altura a la que la densidad de la atmósfera se vuelve tan baja que la velocidad de una aeronave para conseguir una sustentación aerodinámica equivale a la velocidad orbital a esa altura.

1.2. Simulaciones de Cascadas Aéreas Extensas

Como se mencionó en secciones anteriores, el desarrollo de una EAS en la atmósfera depende de las interacciones hadrónicas y electromagnéticas de las partículas en el aire, y sus secciones

eficaces de interacción. Los procesos físicos involucrados en la formación de nuevas partículas son indispensables para describir y reconstruir el fenómeno. Sin embargo, estamos ante un proceso estocástico, en el que intervienen numerosas variables y de las que es imposible determinar los valores exactos de alguno de los anteriores parámetros. De esta manera, para hacer predicciones y estimaciones relacionados con las EAS, es necesario llevar a cabo simulaciones.

Estas simulaciones se realizan usando el método de Monte Carlo, el cual usa números aleatorios, que modelan desarrollos físicos que pueden tener varios resultados, siguiendo una distribución de probabilidad conocida. Este tipo de análisis conduce a fluctuaciones estadísticas, de la misma forma como se observan en los datos experimentales (Alania y col., 2009).

Un ejemplo de herramienta Monte Carlo para la simulación de EAS es CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for Cascade). Este software es un conjunto de códigos que fueron diseñados para recrear de forma detallada cascadas aéreas extensas iniciadas por protones, fotones, núcleos o cualquier partícula que llegue a la atmósfera. CORSIKA considera las interacciones entre núcleos y las desintegraciones de estos, al interactuar con la materia. Fue desarrollado en el *Karlsruhe Institute of Technology* para el experimento KASCADE, (Heck y col., 1998) y ha sido mejorado a lo largo de los años por investigadores de múltiples Institutos y Universidades del mundo.

CORSIKA no es el único *software* que ha sido desarrollado para la simulación de EAS. Junto al desarrollo de grandes experimentos, le han acompañado la elaboración de herramientas que

facilitan la interpretación de los datos. Algunos de ellos son MOCCA (Engel y col., 2018), AIRES (Engel y col., 2018), SENECA (Engel y col., 2018), COSMOS (Engel y col., 2018), GEANT4 (Engel y col., 2018) entre otros. Sin embargo, CORSIKA ha sido optimizado para la simulación de EAS y actualmente es la herramienta más utilizada y conocida para la investigación en este campo. Por esta razón, también será el software utilizado para este trabajo.

Estructura general del software: CORSIKA se compone de una gran cantidad de subrutinas que se encargan de un proceso específico dentro de la lluvia. Además, permite al usuario seleccionar la subrutina que considere de acuerdo al fenómeno y la física involucrada que desea analizar.

El software está compuesto por 4 partes fundamentales. La primera se encarga del decaimiento de partículas inestables y el seguimiento de las mismas considerando las pérdidas de energía por ionización, la dispersión múltiple y el campo magnético. La segunda se encarga de las interacciones entre hadrones y la atmósfera a altas energías. La tercera parte simula las interacciones hadrónicas a bajas energías y, por último, la cuarta parte describe el transporte, la interacción de fotones y pares electrón - positrón. En las cuatro partes se han considerado todos los procesos conocidos que pudieran tener una influencia notable en las cantidades observadas de las EAS. Además contiene varios modelos para llevar a cabo las tres últimas partes que se pueden activar o desactivar opcionalmente para arrojar más detalle, o disminuyendo el tiempo de cómputo (Heck y col., 1998). Una descripción de los códigos utilizados para la simulación de las interacciones

hadrónicas y electromagnéticas se encuentran en el apéndice A.

Adicionalmente este código, admite la configuración de perfiles atmosféricos, predeterminados o ingresados por el usuario. Estos últimos ajustados a un momento y sitio particular. Dentro de CORSIKA, todas las partículas secundarias son rastreadas a través de sus trayectorias y sus parámetros son almacenados con una etiqueta, lo que permite un análisis detallado de las características de las lluvias simuladas.

Para realizar una simulación, se deben escoger una variedad de parámetros que establecen las condiciones iniciales y los límites del fenómeno que se quiere analizar. Algunos parámetros fundamentales son la naturaleza y el ángulo de incidencia del primario, el medio con el que va a interactuar, el nivel de observación, la energía o el rango de energías del primario en el espectro, la energía mínima para el seguimiento de las interacciones consecuentes y el tipo de tratamiento que se le da a la dispersión múltiple. Además, deben seleccionarse los modelos de interacciones hadrónicas y electromagnéticas.

CORSIKA reconoce 50 partículas elementales y núcleos atómicos hasta una masa atómica de $A = 59$. Todas las partículas que admite, pueden ser seguidas a través de la atmósfera (usando un sistema de coordenadas cartesiano). Además, son capaces de interactuar, aniquilarse, decaer y producir partículas secundarias en concordancia con el modelo estándar de física de partículas.

Además, opera con un generador de números aleatorios RANMAR, propuesto por Marsaglia y Zaman (Zaman y Marsaglia, 1990) y modificado por F. James para el CERN (James, 1980). Actualmente es la herramienta estándar más usada para el análisis de fenómenos estadísticos en variados campos de aplicación incluyendo la física de partículas.

Simulación de la atmósfera: En CORSIKA, son de principal relevancia los perfiles de densidad que van a indicar la probabilidad de interacción a medida que evoluciona la cascada. La densidad de la atmósfera es modelada mediante 5 capas donde, para las 4 primeras capas se establece una relación exponencial:

$$T(h) = a_i + b_i e^{\frac{-h}{c_i}} \quad i = 1, \dots, 4 \quad , \quad (13)$$

y en la última capa, la densidad decrece linealmente con la altura de la forma:

$$T(h) = a_s - b_s \frac{h}{c_s} \quad \text{con } h_{max} = 112.8 \text{ km.} \quad (14)$$

Donde $T(h)$ es la densidad de la atmósfera a una altura h específica y los parámetros a_i , b_i y c_i se establecen de forma que la función sea continua en los límites de cada capa, y se puedan apreciar las diferencias. Se construyen entonces, varios tipos de atmósferas de tal forma que reflejen características de las diferencias estacionales (Heck y col., 1998) para una localización específica.

La figura 6 muestra la diferencia entre las presiones atmosféricas para distintos meses en

la ciudad de Stuttgart Alemania, en comparación con la presión atmosférica estándar para Estados Unidos a diferentes altitudes. Se observa que a partir de los 30 km la diferencia entre los valores de presión disminuye a menos de 5 hPa, sin embargo hay fluctuaciones significativas a lo largo de los 30km. Estas variaciones están relacionadas de forma directa con los perfiles de densidad.

Por lo anterior, CORSIKA admite tres configuraciones diferentes para el modelo atmosférico que usará en cada simulación:

- MODATM, que establece atmósferas predefinidas para ubicaciones de experimentos.
- ATMEXT, que es una configuración para atmósferas externas dependientes de la ubicación geográfica (tropical, subtropical, ártico, etc).
- GDASTOOL, que genera un perfil atmosférico en base a una fecha y hora predefinidas por el usuario, usando el Sistema Global de Asimilación de Datos GDAS.

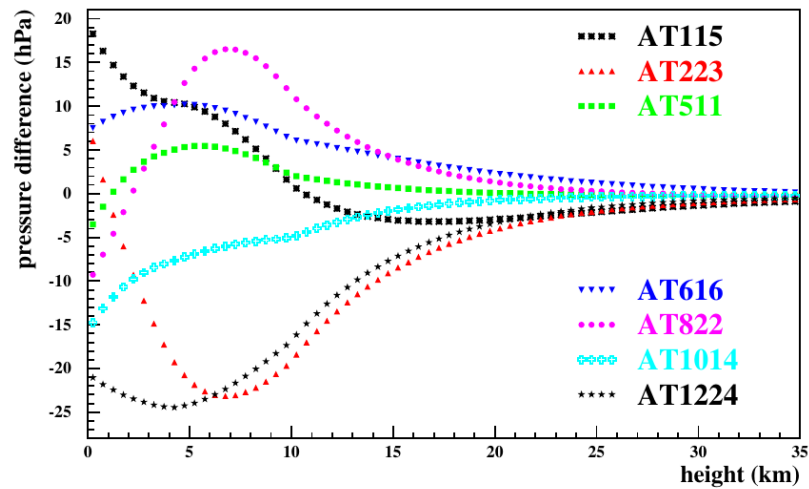


Figura 6. La gráfica muestra la diferencia entre las presiones atmosféricas para distintos meses en la ciudad de Stuttgart, y la presión atmosférica estándar para Estados Unidos a diferentes altitudes (Heck y col., 1998). El modelo atmosférico AT115 corresponde al mes de enero, AT223 a febrero, AT511 a mayo, AT616 a junio, AT822 a Agosto, AT1014 corresponde a octubre y AT1224 al mes de diciembre. A cada uno de estos modelos le corresponde valores de los parámetros a_i , b_i y c_i característicos cuyas diferencias se ven reflejadas en las variables atmosféricas estándar, una de estas la presión, que se observa en la gráfica.

2. Estimación del flujo de fondo de secundarios

La colaboración LAGO estudia la influencia de la actividad solar en las variaciones del flujo de partículas secundarias, producidas durante la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Este estudio se realiza usando detectores Cherenkov de agua, o WCD. Para estudiar los datos obtenidos por estos detectores, es necesario estimar el flujo de secundarios al nivel de suelo. Dicho flujo, debe calibrarse a partir de simulaciones detalladas que tengan en cuenta todas las posibles causas de fluctuación. Para ello, se ha desarrollado una cadena de simulaciones organizadas en tres bloques principales. Como primer paso, se deben encontrar los efectos del campo geomagnético en la propagación de partículas cargadas, que contribuyen a la radiación de fondo a nivel del suelo y que se caracterizan por la rigidez de corte en cada sitio LAGO (Asorey y col., 2018). Luego, estimar el flujo de partículas secundarias al nivel de los detectores, originado por la interacción de los primarios con la atmósfera (Sarmiento-cano y col., 2019), usando el software CORSIKA (Heck y col., 1998). Por último, obtener la respuesta del detector para los diferentes tipos de partículas secundarias, ((Jaimes-Motta, 2018), (Vásquez-Ramírez y col., 2019)) usando los códigos de GEANT4 (Agostinelli, 2003).

Actualmente, para la segunda parte de la cadena de simulaciones, LAGO usa perfiles atmosféricos de la configuración ATMEXT de CORSIKA. Sin embargo, para precisar las estimaciones de flujo, se debe modelar la variabilidad de la atmósfera y establecer parámetros que permitan obtener perfiles atmosféricos precisos. Además, de ser posible hay que compararlos con los perfiles

usados actualmente en cada sitio. Es por ello que el presente trabajo se concentra en la construcción y valoración de nuevos perfiles atmosféricos. A continuación, se presenta la forma como puede estimarse, el flujo de secundarios en un punto de observación determinado mediante CORSIKA, y la metodología que se usará para la obtención de estos perfiles en base al Sistema Global de Asimilación de datos GDAS.

2.1. Flujo de fondo a nivel de Bucaramanga

El flujo de partículas secundarias que llegan al nivel de los detectores, corresponde a la cantidad de partículas que atraviesan un área, en un nivel de observación determinado y en un intervalo de tiempo. Dicho flujo depende principalmente de dos factores: el flujo de primarios que llegan a la atmósfera, y la composición de ésta.

Para caracterizar el flujo de primarios se considera el flujo diferencial. Como se mencionó en el capítulo anterior, corresponde al número de astropartículas que llegan con una energía determinada dE en un ángulo sólido $d\Omega$. Así, usando datos experimentales para diferentes tipos de partículas, se puede obtener una distribución aproximada de las partículas interactuantes para un intervalo de tiempo t como se muestra en la figura 7.

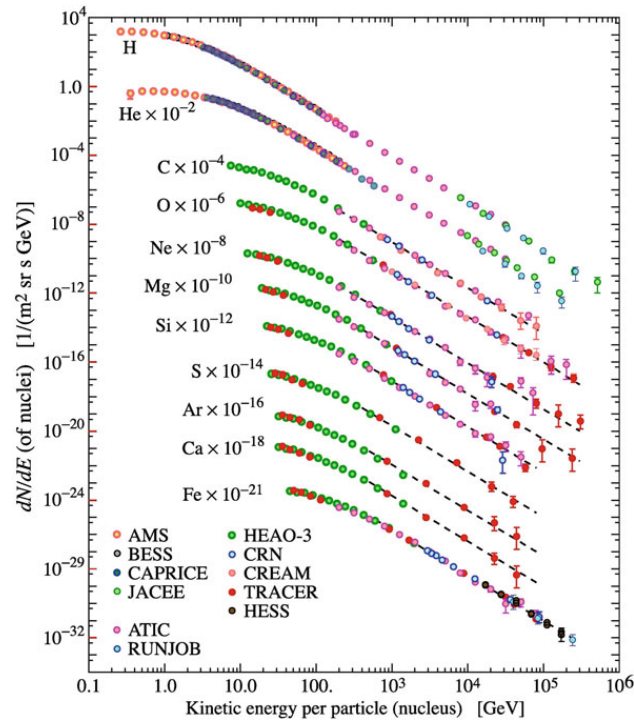


Figura 7. Flujo de núcleos de astropartículas como función de su energía (Spurio, 2015). Los datos son tomados a partir de detecciones directas por satélites. Para mejorar la lectura de la gráfica, el flujo para cada núcleo está multiplicado por un factor de escala.

De esta manera, se simulan individualmente cada una de los primarios. Recolectando al final, información de la totalidad de secundarios en el punto de observación. Por ejemplo, para simular un flujo en un tiempo de 120 segundos, se obtiene la siguiente distribución primarios:

Tabla 2

Distribución de primarios que se deben simular para estimar el flujo de secundarios en 120 s a la altura de Bucaramanga. La primera columna corresponde al código de identificación de cada núcleo en CORSIKA, la segunda el símbolo del elemento, y la tercera columna corresponde a la cantidad de núcleos que se simularán para el tiempo escogido.

ID	Partícula	Cantidad
1	H	562322
402	He	56595
1206	C	1458
1608	O	1410
703	Li	574
1105	B	396
2412	Mg	335
2814	Si	322
1407	N	295
2010	Ne	259
5626	Fe	195
904	Be	167
3216	S	51
2713	Al	44
2311	Na	38
4020	Ca	30
1909	F	25
5224	Cr	19
4018	Ar	18
4822	Ti	17
5525	Mn	13
3919	K	11
5123	V	10
3115	P	9
3517	Cl	8
4521	Sc	5

Donde la primera columna corresponde al código de identificación de cada núcleo en COR-SIKA, la segunda el símbolo del elemento, y la tercera columna corresponde a la cantidad de núcleos que se simularán para el tiempo escogido.

Para simular el flujo de secundarios, se deben definir las condiciones iniciales. Estas deben ajustarse a las características con las que el flujo se genera de forma natural en la atmósfera. La siguiente, es la configuración con la que se realizarán las estimaciones de flujo para este trabajo sobre la ciudad de Bucaramanga:

- Componentes horizontal y vertical del campo magnético terrestre (en vT) correspondientes a $27,0263vT$ y $17,176vT$ respectivamente.
- Nivel de observación, 950 m s.n.m. para Bucaramanga.
- Tipo de primarios, núcleos desde el Hidrógeno hasta el Hierro.
- Rango de energía de los primarios: de $5GeV$ a $1 \cdot 10^6 GeV$.
- Ángulo cenital de incidencia de los primarios: de 0° hasta los 90° .
- Tiempo del flujo 4 horas = 14400s.
- Tipo de detección: Volumétrica.
- Perfil atmosférico: Para este trabajo se usan dos tipos de perfiles atmosféricos. El perfil Subtropical dentro de las rutinas ATMEXT, que es el usado hasta ahora para las simulaciones

de flujo sobre Bucaramanga, y 12 perfiles atmosféricos mensuales creados a partir de la subrutina GDASTOOL de CORSIKA cuyas características explicaremos más adelante.

2.2. El sistema global de asimilación de datos, GDAS

Para construir un modelo de atmósfera para CORSIKA, extraeremos datos del Sistema Global de Asimilación de Datos, GDAS (NOAA, 2019 (Accedido Julio 8, 2019)). Éste es un sistema de predicción numérica del clima en el que se construye un modelo que incorpora el comportamiento de la atmósfera como se encuentra en las observaciones meteorológicas. Los datos de GDAS están disponibles a través del Sistema Nacional de Archivo y Distribución de Modelos Operativos, NOAA.

Sistema de asimilación de datos aplicado a la atmósfera: GDAS, realiza un ajuste de un modelo que debe describir el estado de la atmósfera para unas variables determinadas en tiempo y altura siguiendo tres pasos fundamentales:

1. Recolectar datos de los instrumentos que realizan observaciones meteorológicas ubicados alrededor del mundo. Estos incluyen tanto estaciones en Tierra, barcos y aviones, como radiosondas y satélites climáticos.

2. Utilizar el pronóstico a partir de una iteración previa del modelo, junto con la medición que describe un momento determinado. La predicción o primera estimación agrega más información al sistema, acerca del comportamiento atmosférico expresado en modelos matemáticos.

3. Ajustar la salida del modelo al estado atmosférico medido.

Un esquema que muestra esta secuencia, está representado en la figura 8. A un tiempo dado, t_0 , las observaciones arrojan un valor de una variable de estado, y en ese mismo tiempo está disponible un pronóstico. La etapa de análisis combina observación y predicción para mejorar el modelo en t_0 . Con ese ajuste, se realiza un pronóstico en un tiempo posterior t_1 .

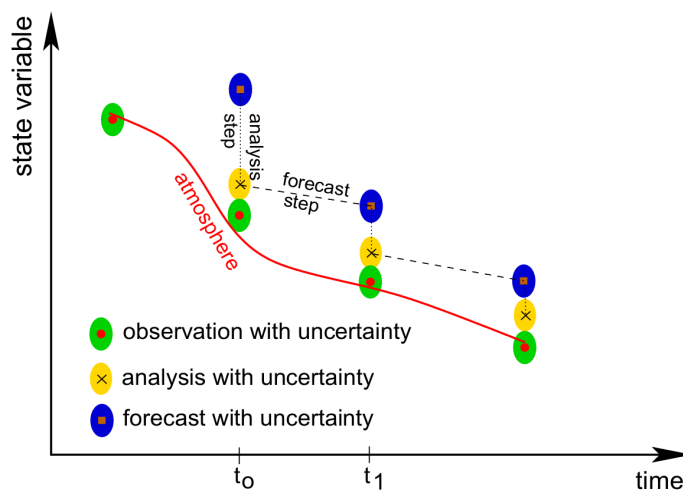


Figura 8. Representación de la evolución y tipo de la variable de estado en el tiempo, mediante el método de asimilación de datos (Abreu y col., 2012). A un tiempo dado, t_0 , las observaciones arrojan un valor de una variable de estado, y en ese mismo tiempo está disponible un pronóstico. La etapa de análisis combina observación y predicción para mejorar el modelo en t_0 . Con ese ajuste, se realiza un pronóstico en un tiempo posterior t_1 .

Contenido de los datos: GDAS realiza un análisis cuatro veces en el día: a las 0, 6, 12 y 18 UTC, y una predicción de entre 3,6 y 9 horas. La predicción numérica del clima usada en GDAS es el Sistema de Predicción Global (GFS) (NOAA, 2019 (Accedido Julio 8, 2019)). Los datos están disponibles cada 3 horas con 23 valores de presión desde los 1000hPa hasta los 20hPa, en una

mallla global de 1° en longitud y en latitud, desde enero del 2005. Estos datos son guardados en archivos semanales y están disponibles online (NOAA, 2019 (Accedido Julio 8, 2019)).

Estudios previos, han evidenciado la confiabilidad del uso de perfiles atmosféricos contruidos en base a GDAS para las estimaciones de EAS (Will y Keilhauer, 2011). Por esta razón, a continuación se presenta una metodología que permite la construcción y uso de perfiles atmosféricos mensuales usando esta herramienta. Esto con el fin de estudiar la sensibilidad que tiene el flujo de secundarios ante variaciones atmosféricas, para la ciudad de Bucaramanga.

2.3. Creación y comparación de perfiles atmosféricos mensuales

Para construir los perfiles atmosféricos con GDAS, se ha utilizado la rutina de GDASTOOL de CORSIKA (Heck y col., 1998) que extrae un perfil atmosférico para un día y hora específicas. GDASTOOL realiza la lectura de un archivo binario, del que interpreta y extrae información de la presión, altitud, temperatura y humedad, con los que realiza el cálculo de la densidad y presión atmosférica (Abreu y col., 2012). Por último el código ajusta estos datos al modelo de 5 capas descrito en el capítulo anterior. Un esquema general se muestra en la figura 9.

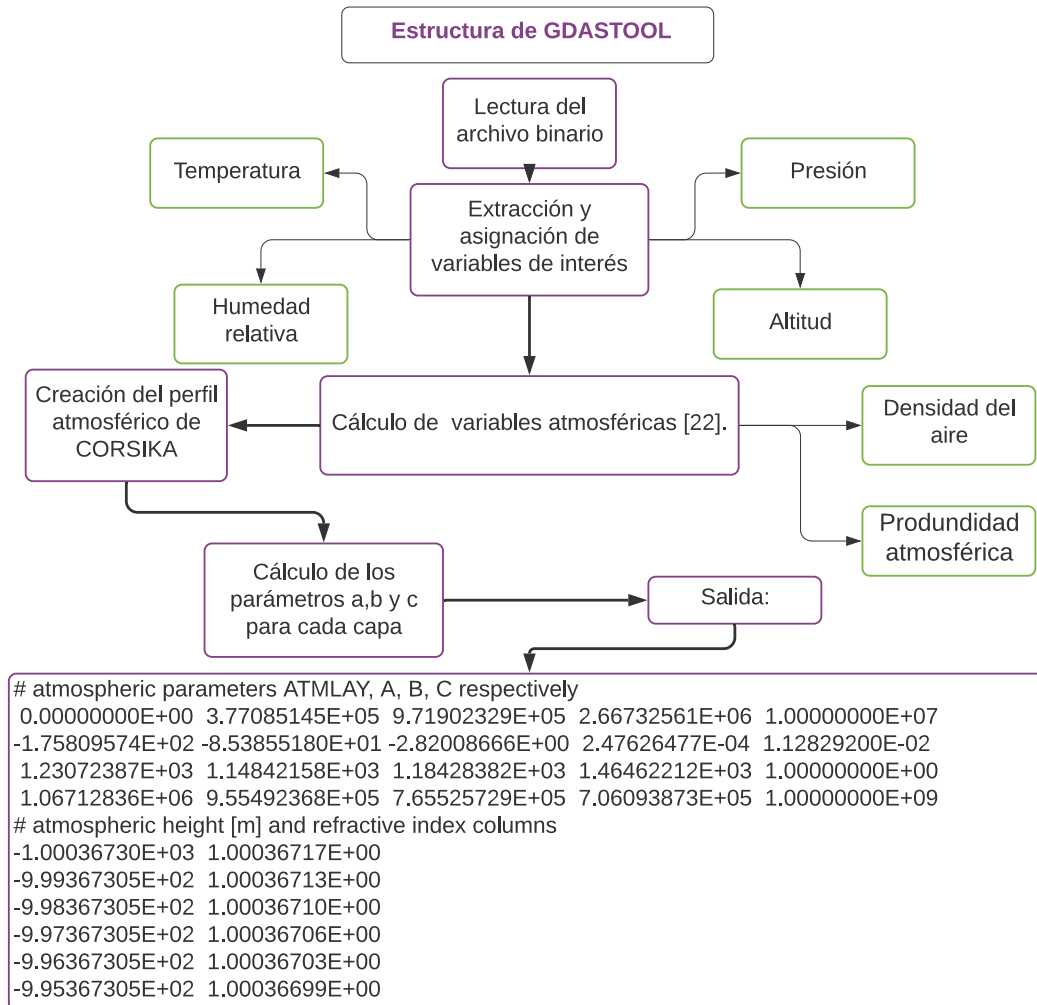


Figura 9. Esquema del GDASTOOL, desde la lectura del archivo binario hasta el cálculo de los parámetros a , b y c que se realiza en función de las variables atmosféricas extraídas, y las ecuaciones (13) y (14).

Para construir los perfiles mensuales, se ha creado un algoritmo computacional que usando el GDASTOOL, extrae datos de dos horas del día diferentes: 0:00 y las 12:00 UTC-5, para todos los días del año 2018, sobre cualquier posición geográfica, en nuestro caso, Bucaramanga (7.11 N, 73.11 E), como se observa en el esquema de la figura 10. En total, se obtienen 730 perfiles, correspondiendo a dos perfiles por cada día del mes. En la figura 11, se observan los primeros 62

perfiles de densidad para el mes de enero en Bucaramanga y el resultado de promediarlos para ese mes ¹.

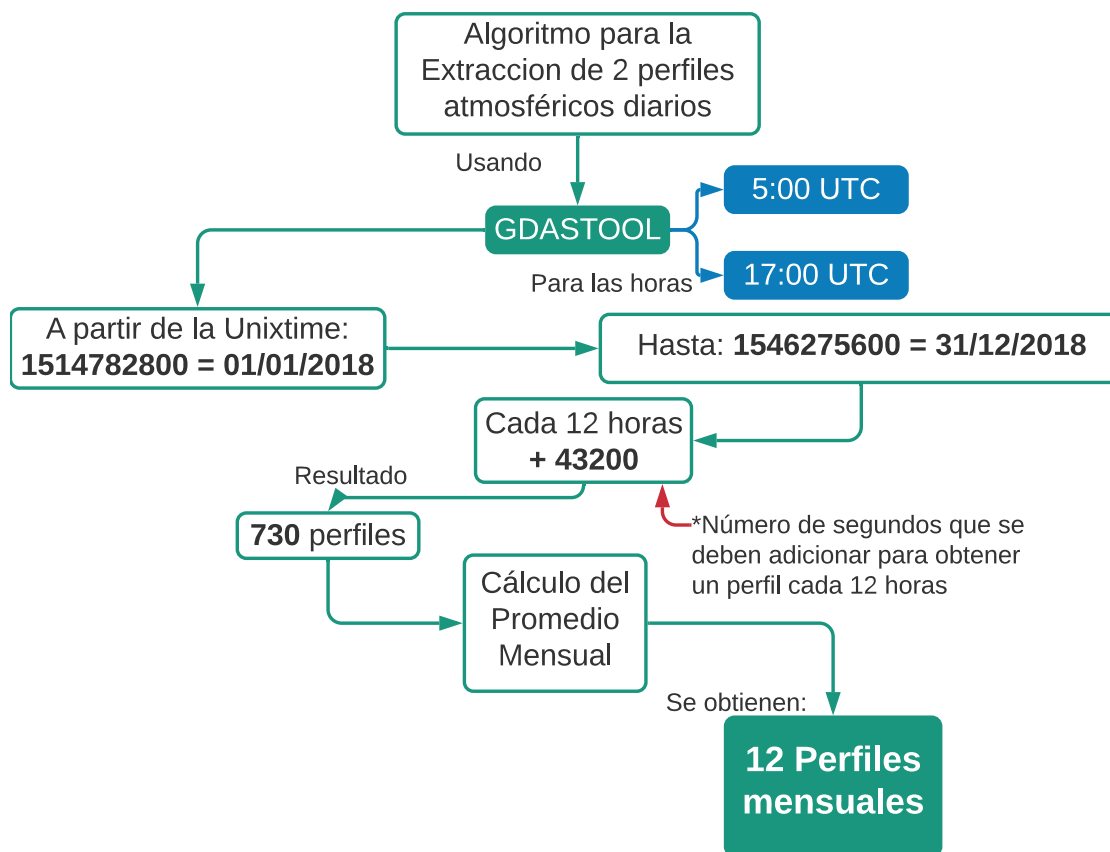


Figura 10. Secuencia lógica utilizada para extraer y construir los 12 perfiles mensuales para la ciudad de Bucaramanga.

De estos perfiles diarios se comienzan a observar discrepancias que se incrementan a medida que aumenta la altitud. Luego de los 100 km estas diferencias caen a cero, puesto que todos

¹Ver los parámetros de los 12 perfiles mensuales en el apéndice B.

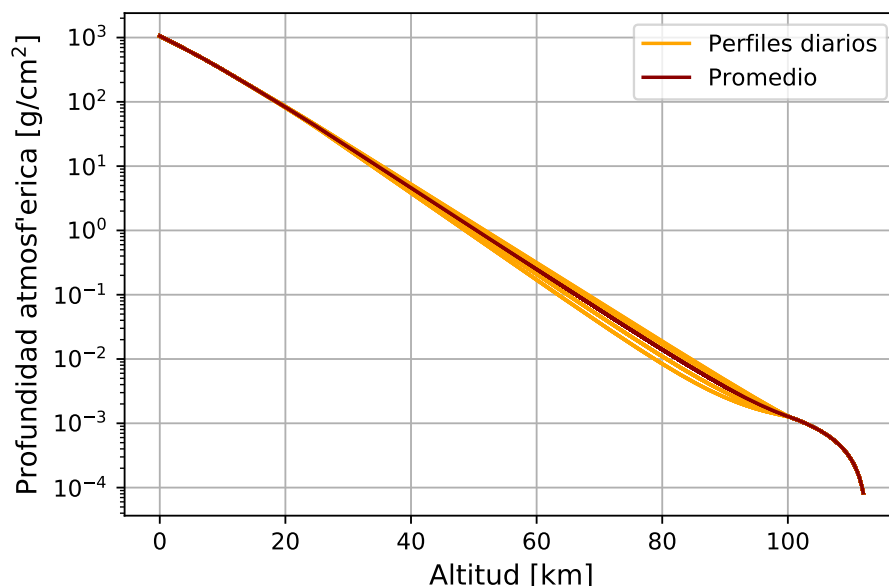


Figura 11. La figura muestra 62 perfiles de densidad para el mes de enero en Bucaramanga (líneas amarillas) y el promedio para ese mes (línea roja). Las líneas amarillas corresponden a los perfiles atmosféricos obtenidos en dos horas del día diferentes: 0:00 y las 12:00 UTC-5 durante todos los días del mes de enero, en la ciudad de Bucaramanga (7.11 N, 73.11 E). Y la línea roja corresponde al promedio de los 62 perfiles.

los perfiles atmosféricos tienen los mismos parámetros para esta última capa. En consecuencia, ¿Podrían observarse diferencias suficientes para justificar la creación y uso de perfiles atmosféricos mensuales, incluso en climas tropicales como el de Bucaramanga? Para dar respuesta, es necesario en primera instancia comparar los perfiles de densidad de cada uno de los meses, con los perfiles comúnmente usados para esta ciudad: el perfil Tropical y Subtropical.

Un contraste entre los promedios mensuales creados con GDAS, con los perfiles atmosféricos predeterminados en CORSIKA, se puede observar en la figura 12. A la izquierda se observan todos los perfiles de densidad en los primeros 30 km. Allí, los perfiles atmosféricos subtropi-

cal y tropical se encuentran cercanos entre sí y a su vez alejados de los perfiles mensuales. Para cuantificar esta diferencia, la gráfica de la derecha muestra la diferencia entre los perfiles mensuales construidos versus el perfil subtropical. Se observa una diferencia notable que se incrementa rápidamente en los primeros 4 km hasta llegar a los 250 g/cm^2 . Esto corresponde a un 58% de diferencia. Luego esta diferencia disminuye, pero se mantiene por encima del 40%.

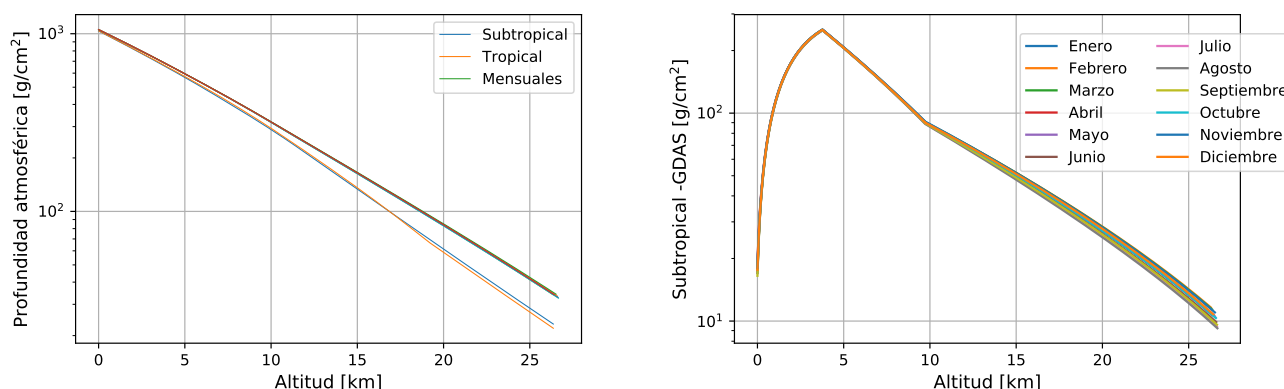


Figura 12. Contraste entre los promedios mensuales creados con GDAS, con los perfiles atmosféricos tropical y subtropical predeterminados en CORSIKA. A la izquierda se observan los perfiles de densidad para los primeros 30 km. A la derecha se observa la diferencia entre los perfiles mensuales construidos y el perfil subtropical de CORSIKA usado comúnmente para Bucaramanga. Se observa una diferencia notable que se incrementa rápidamente en los primeros 4 km hasta llegar a los 250 g/cm^2 . Esto corresponde a un 58% de diferencia. Luego esta diferencia disminuye, pero se mantiene por encima del 40%.

2.4. Validación de los perfiles para la atmósfera de Malargüe

En virtud de validar la metodología implementada para la creación de perfiles atmosféricos, es necesario comprobar que los datos y aproximaciones realizadas, reproducen adecuadamente el comportamiento de la atmósfera. Esto debe realizarse para una localización previamente caracterizada, donde también se usen perfiles mensuales en base a GDAS.

La localización seleccionada es el Observatorio Pierre Auger, quien reemplazó los perfiles basados en mediciones con radiosondas, por perfiles atmosféricos mensuales basados en GDAS. Estos perfiles fueron construidos para la ciudad de Malargüe - Argentina. Teniendo en cuenta que GDAS proporciona información diaria desde junio del 2005 hasta la fecha, este observatorio extrajo datos para dos horas del día diferentes, en todos los días disponibles, recolectando 17416 perfiles atmosféricos con los que se construyeron los promedios mensuales (Keilhauer y Will, 2012). Las diferencias que arrojan los perfiles de GDAS con datos no superaron $1g/cm^2$ como se observa en la figura 13.

Para realizar la validación, se construyó un perfil atmosférico para el mes de abril, entre los años 2006 y 2011, extrayendo 10 perfiles mensuales cada año en los días 6, 12, 18, 24 y 30 a las 0:00 y las 12:00 horas cada día para Malargüe, usando la metodología descrita en la sección 2.3. Seguidamente, se corroboró el desarrollo de una EAS usando los dos medios de interacción, uno a la vez: la atmósfera reconstruida, y el perfil robusto de Pierre Auger. Para esto, se realizaron 100

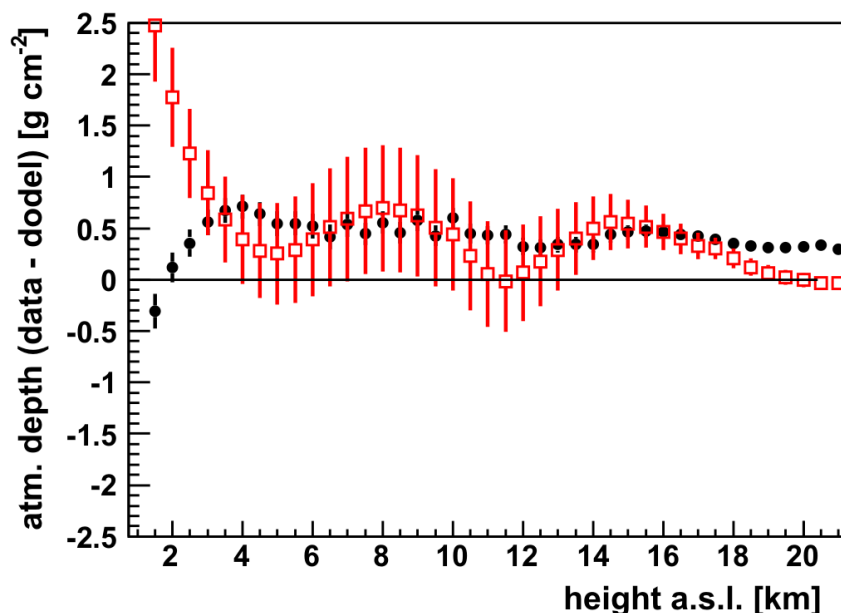


Figura 13. Diferencias entre datos de radiosonda tomados sobre Malargüe (Abreu y col., 2012), con los perfiles mensuales de GDAS (puntos negros) y los perfiles mensuales promedios basados en datos de radiosonda (puntos rojos) en función la altura. Para el Observatorio Pierre Auger. Las diferencias que arrojan los perfiles de GDAS con datos no superaron $1\text{g}/\text{cm}^2$ como se observa en la figura 13.

simulaciones de un núcleo de Hierro de $1 \cdot 10^8$ GeV. Esta elección se hizo teniendo en cuenta que este valor de energía está en el rango de máxima eficiencia del Observatorio.

A partir de la figura 14 se puede observar la distribución longitudinal de partículas secundarias producto de la interacción, luego de promediar las 100 EAS bajo las mismas condiciones iniciales. Se observa que el modelo reconstruido reproduce el resultado arrojado por las atmósferas mensuales estándar de Malargüe construidas con GDAS, con una diferencia porcentual por debajo del 20% después de los $400\text{g}/\text{cm}^2$. Además el comportamiento de la EAS que se obtiene con la atmósfera reconstruida muestra una diferencia de $\approx 2\%$ en el valor del X_{max} .

Estos resultados muestran que el método utilizado para la creación de perfiles puede reproducir las condiciones atmosféricas reales tal como lo demostró el Observatorio Pierre Auger (Abreu y col., 2012). Con esto se valida la metodología implementada y los códigos utilizados, y se procede a realizar estimaciones del flujo de secundarios con los perfiles construidos.

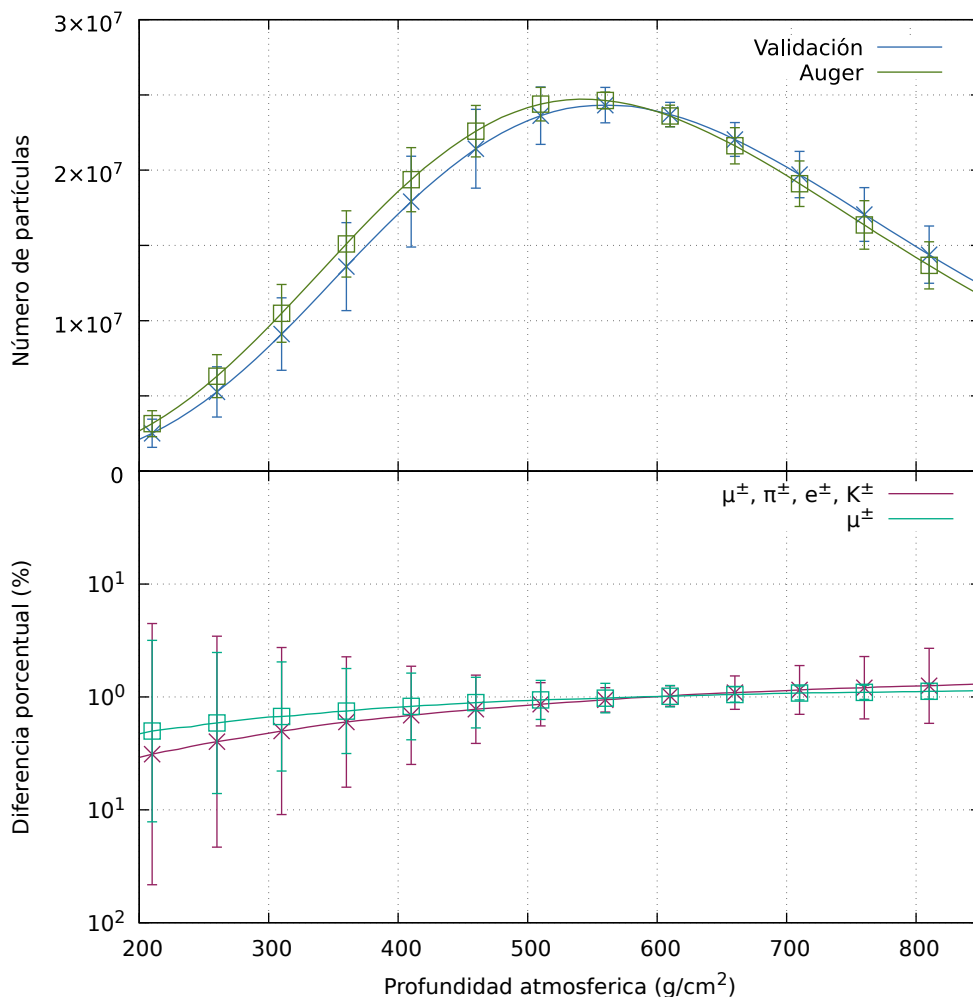


Figura 14. Arriba, Distribución longitudinal de partículas secundarias producto de la interacción de 1 núcleo de Hierro de $1 \cdot 10^8$ GeV sobre la atmósfera de Malargue para abril, construida por el Observatorio Pierre Auger (Verde) y la atmósfera de Malargue en abril construida mediante la metodología implementada para este trabajo (Azul). Abajo, diferencia porcentual entre las dos distribuciones longitudinales, considerando las partículas cargadas (morado) y sólo los muones (celeste). Las simulaciones consideran el mismo campo magnético y altura sobre el nivel del mar.

3. Influencia de la atmósfera en el flujo de secundarios

Una vez construidos y validados los perfiles atmosféricos, es hora de analizar el efecto que éstos tienen en el flujo de secundarios, para ello, se realizan simulaciones de flujo con las condiciones iniciales establecidas en la sección 2.1. En total, son 12 simulaciones usando un perfil atmosférico mensual a la vez, y finalmente una última simulación, usando el perfil atmosférico predeterminado subtropical. El resultado, se observa en la figura 15.

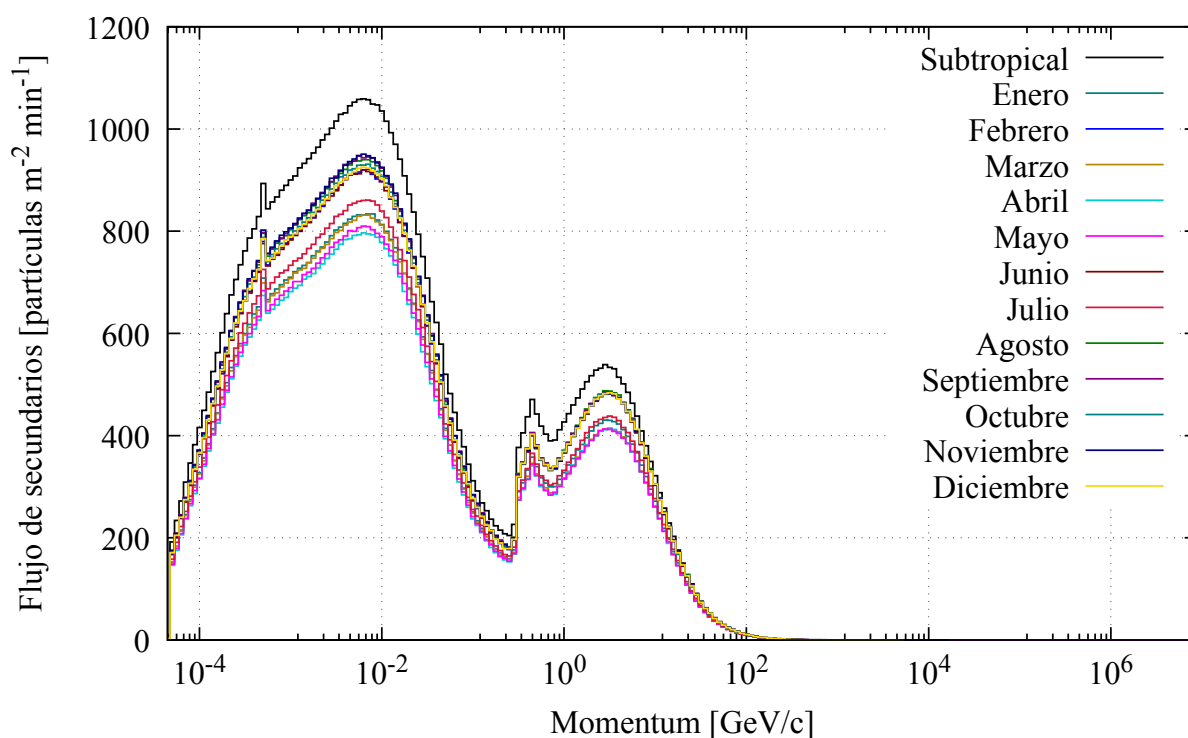


Figura 15. Simulación del flujo total de secundarios en función de la energía a la altura de Bucaramanga, usando diferentes medios de interacción: La línea negra corresponde al perfil predeterminado subtropical, y las líneas de colores, corresponde a los 12 perfiles atmosféricos mensuales. Las estimaciones arrojan un flujo mayor con el perfil subtropical, en comparación a los 12 perfiles atmosféricos mensuales, siendo la mayor diferencia observada con el mes de abril.

Las estimaciones arrojan un flujo mayor con el perfil subtropical, en comparación a los 12 perfiles atmosféricos mensuales, siendo la mayor diferencia observada con el mes de abril. La primera prominencia corresponde a la contribución al flujo, de la componente electromagnética, y la segunda está compuesta de dos picos que corresponden al aporte de los neutrones y muones respectivamente.

La figura 16 muestra el espectro de secundarios, que permite ver de forma más clara, la componentes del flujo, diferenciado por el tipo de partículas que lo componen. Ha sido obtenido usando el perfil atmosférico del mes de abril. Aquí, se puede apreciar que el aporte de los neutrones al segundo pico es significativo sólo entre los $0,2$ a $1\text{GeV}/c$ y disminuye drásticamente a medida que aumenta en energía. A diferencia de la componente muónica que incrementa en ese mismo rango de energía, teniendo su máximo valor cerca a los $10\text{GeV}/c$.

De la simulación representada en la figura 15, se obtiene una diferencia en el flujo total entre $10,22\%$ y el $24,12\%$ correspondientes a los meses de noviembre y abril respectivamente. De forma similar, para los muones estas diferencias están entre $9,58\%$ y $22,25\%$. Este resultado responde finalmente a la interrogante planteada en el capítulo anterior. Además, permite concluir que las variaciones atmosféricas a lo largo del año, pueden ser evidenciadas en el flujo de secundarios a nivel del suelo, incluso en regiones tropicales como Bucaramanga.

Sin embargo, aún se debe comprobar que las diferencias en el flujo de secundarios obser-

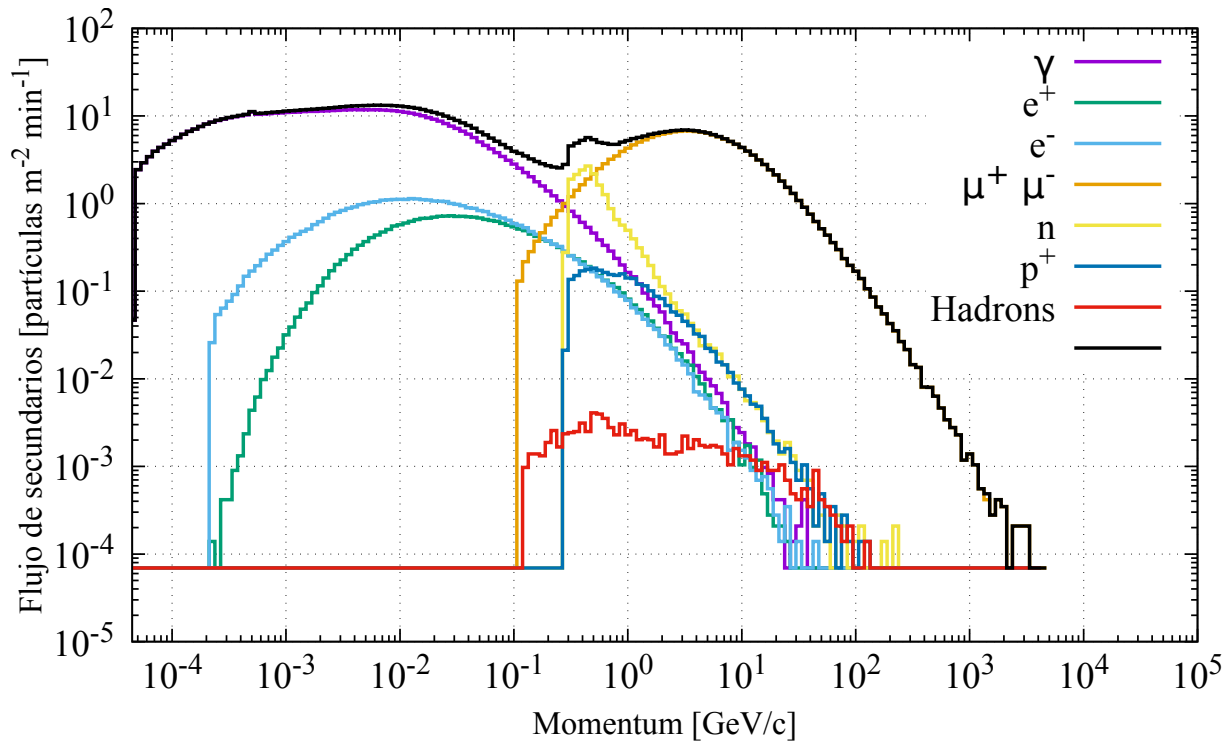


Figura 16. Simulación del espectro de energía de secundarios a la altura de Bucaramanga, usando el perfil atmosférico para el mes de abril, como medio de interacción. En negro se representa el espectro total de secundarios, en morado la contribución de los fotones, en celeste los electrones, en verde los positrones, en naranja los muones y antimuones, en amarillo los neutrones, en azul oscuro los protones y en rojo los hadrones.

vadas, obedezcan a la modulación que inducen las variaciones de temperatura a lo largo del año.

La figura 17 muestra el cambio mensual del flujo obtenido con los nuevos perfiles atmosféricos creados para el año 2018, en comparación al flujo que se obtiene con el perfil atmosférico subtropical, que es constante a lo largo del año. Se observan diferencias significativas, siendo mayores en el primer semestre. Una explicación a este comportamiento está relacionado con los cambios de clima, y puede apreciarse en el diagrama de la derecha.

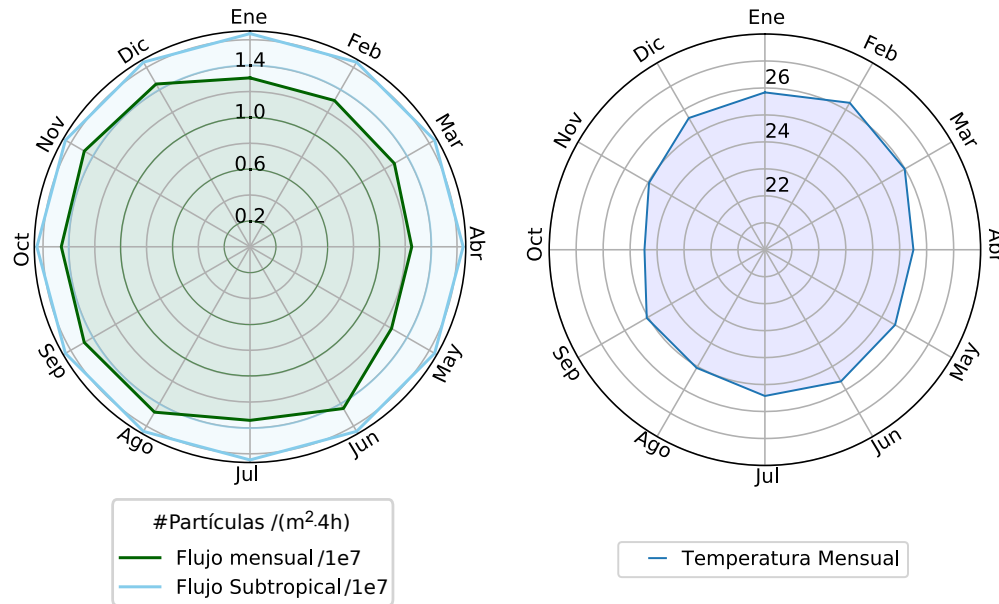


Figura 17. A la derecha diagrama que compara el cambio mensual del flujo obtenido a partir de los perfiles atmosféricos construidos para el año 2018, y el flujo que se obtiene con el perfil atmosférico subtropical, que es constante a lo largo del año. Se observan diferencias significativas, siendo mayores en el primer semestre del año. A la izquierda temperatura promedio para cada mes del año 2018 para la ciudad de Bucaramanga. Se observa un aumento de la temperatura en el primer semestre del año, que contrasta con la disminución en el flujo para ese mismo intervalo de tiempo. Los datos de temperatura están disponibles en la base de datos de RACIMO AIRE. (Datos de temperatura para la ciudad de Bucaramanga suministrados por la AMB)

Se observa una relación inversa entre el flujo y los cambios de temperatura, en concordancia con la aproximación de gas ideal, es decir, a medida que la temperatura aumenta, disminuye la densidad, por ende, también disminuye el flujo de secundarios. Este resultado, es una evidencia de que los perfiles atmosféricos construidos no sólo reproducen bien el comportamiento de la atmósfera a lo largo del año, sino que permiten incluso observar en el flujo de secundarios, las variaciones de temperatura.

Como comprobación final, se hicieron simulaciones de la distribución longitudinal de secundarios, esta vez observando el efecto que tiene cambiar el perfil atmosférico, en una EAS generada por diferentes tipos de primarios como veremos a continuación.

Efecto de los perfiles atmosféricos en EAS generadas por partículas individuales: Para estudiar el comportamiento de los perfiles atmosféricos mensuales durante el desarrollo de la lluvia, se realizan simulaciones de partículas individuales. Para tener suficientes datos estadísticos, se realizan 10 simulaciones de EAS para primarios de $1 \cdot 10^8$ GeV, 1000 para primarios de $1 \cdot 10^6$ GeV, y 5000 para $1 \cdot 10^3$ GeV.

Con el resultado de estas simulaciones, se realizan promedios estadísticos que permiten obtener la distribución longitudinal más cercana de lo que se pudiera observar en la realidad. La figura 18 muestra el resultado de promediar la distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^6$ GeV que fue simulado 1000 veces, observando el número de partículas generado, a medida que éstas se propagan por la atmósfera (A), la diferencia porcentual usando el perfil atmosférico predeterminado y para el mes de enero (B), la energía depositada a lo largo de dicha dirección de propagación (C) y la diferencia porcentual entre la energía depositada en los dos medios de propagación (D).

Se puede observar, un exceso en el número de partículas generadas longitudinalmente, en la región cercana al X_{max} usando el perfil predeterminado por CORSIKA. Sin embargo, la integral de la gráfica de energía depositada, tiene un 99% de coincidencia.

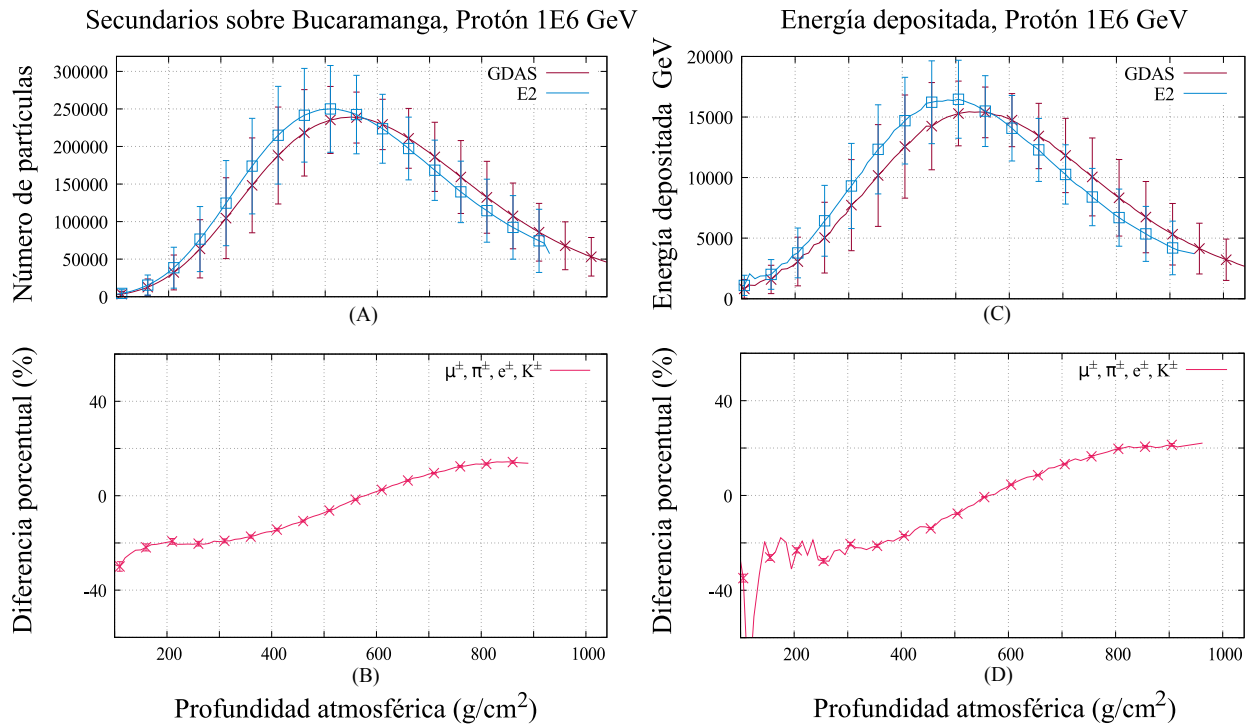


Figura 18. Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^6 \text{ GeV}$ que fue simulado 1000 veces, usando la atmósfera predeterminedada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja). Se observa el número de partículas que se genera, a medida que la EAS se desarrolla a través de la atmósfera (A), la diferencia porcentual en relación al número de partículas generadas con la atmósfera predeterminedada (B), la energía depositada a lo largo del desarrollo de la EAS (C), y la diferencia porcentual en relación a la energía depositada con la atmósfera predeterminedada (D).

Adicionalmente, la figura 19 y la 20 muestran los resultados obtenidos para el fotón y un núcleo de hierro, donde pequeñas diferencias cerca del X_{max} también se observan. Las distribuciones longitudinales obtenidas para otros valores de energía se asemejan a lo observado en las figuras 18, 19 y 20 y se encuentran en el apéndice B.

En particular, la tabla 3 muestra las diferencias porcentuales entre los X_{max} de cada una de

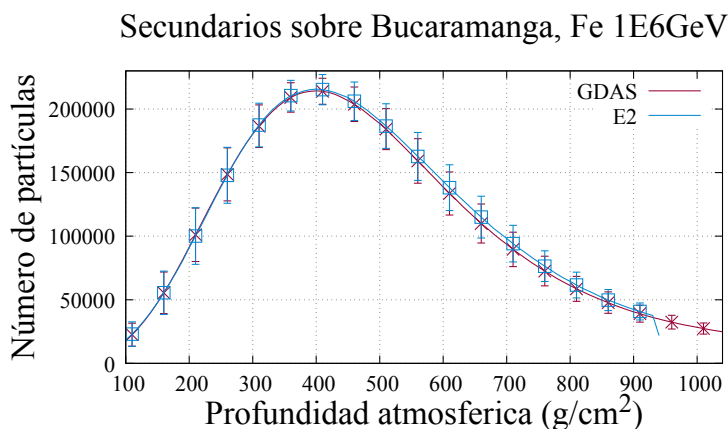


Figura 19. Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^6 GeV$ que fue simulado 1000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja), se observa el número de partículas que se genera, a medida que la EAS se desarrolla a través de la atmósfera.

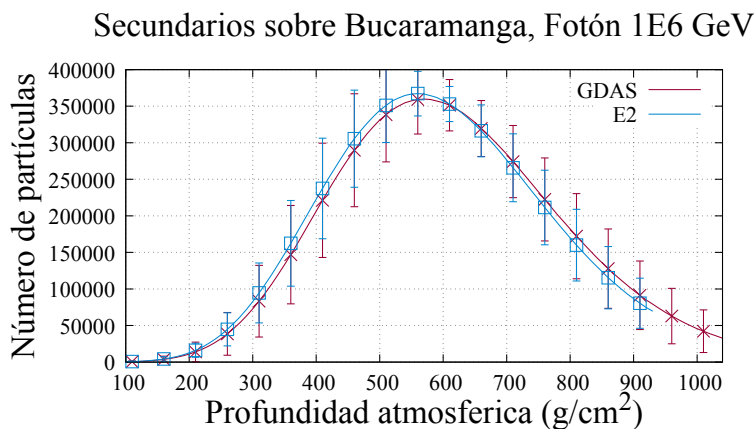


Figura 20. Distribución longitudinal de un átomo de hierro de $1 \cdot 10^6 GeV$ que fue simulado 1000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja), se observa el número de partículas que se genera, a medida que la EAS se desarrolla a través de la atmósfera.

las simulaciones realizadas. Las diferencias encontradas no superan el 10%. Esto muestra que la variación en los perfiles atmosféricos afecta el número de partículas generadas cerca al X_{max} , e incluso, puede afectar en el flujo, pero la posición del X_{max} no se ve alterada enormemente.

Tabla 3

X_{max} para protones, hierros y fotones de 1E3, 1E6 y 1E8 GeV con y sin GDAS. La última columna muestra las diferencias porcentuales entre los X_{max} de cada una de las simulaciones realizadas. Las diferencias encontradas no superan el 10%.

Energía (GeV)	Partícula	X_{max} GDAS (g/cm²)	X_{max} SubTropical (g/cm²)	Diferencia %
1E3	Protón	310	310	0
	Fotón	310	310	0
1E6	Protón	550	510	7.84
	Hierro	400	400	0
	Fotón	570	560	1.79
1E8	Protón	620	650	4.6
	Hierro	550	560	1.79
	Fotón	750	720	4.16

4. Conclusiones

Se construyó una metodología que permite crear perfiles atmosféricos promediados mes a mes, para cualquier ubicación geográfica, usando el código GDASTOOL. Esta metodología propone la extracción de datos de dos horas del día diferentes: 0:00 y las 12:00 UTC-5, para todos los días del año. Se crearon perfiles atmosféricos para la ciudad de Bucaramanga (7.11 N, 73.11 E) y se construyeron 12 perfiles para cada mes del año 2018, que se contrastaron con el perfil atmosférico Subtropical que viene predeterminado en CORSIKA. Este trabajo, completa la secuencia de simulaciones que LAGO estableció en el programa de clima espacial, el cual busca estudiar los fenómenos relacionados a la modulación que realiza el viento solar al flujo de secundarios que se pueden detectar en tierra.

Adicionalmente, se realizó una validación, construyendo perfiles atmosféricos para el Observatorio Pierre Auger, y contrastándolos con el perfil basado en GDAS que actualmente usa el Observatorio. Las simulaciones arrojaron que el modelo reconstruido reproduce el resultado de las atmósferas mensuales estándar de Malargüe construidas con GDAS, con una diferencia porcentual por debajo del 20% después de los 400 g/cm^2 . Además el comportamiento de la EAS que se obtiene con la atmósfera reconstruida muestra una diferencia de $\approx 2\%$ en el valor del X_{max} .

Con estos perfiles construidos, se contrastó la diferencia de densidad atmosférica, en relación al perfil subtropical predeterminado en CORSIKA, y se observaron diferencias que llegan

hasta el 58 %, en los primeros 30 km como se mostró en la figura 12.

Así mismo, se estudió el efecto de estos perfiles atmosféricos en el flujo de fondo de secundarios sobre Bucaramanga y se confirmó la relación que tienen estos perfiles con la variación de temperatura mensual a lo largo del año. Se evidenció una diferencia en el flujo total entre 10,22 % y el 24,12 % correspondientes a los meses de noviembre y abril respectivamente. De forma similar, para los muones estas diferencias están entre 9,58 % y 22,25 %. Este resultado permite confirmar que las variaciones atmosféricas a lo largo del año, pueden ser evidenciadas en el flujo de secundarios a nivel del suelo.

También, se estudió el efecto de los perfiles atmosféricos en el desarrollo de las EAS generadas por partículas individuales. Se encontró que el perfil atmosférico cambia levemente la distribución longitudinal de secundarios, observando un mayor número de partículas cerca al X_{max} . Sin embargo, las diferencias en la posición del X_{max} no superan el 8 %.

Finalmente, cabe resaltar que la metodología presentada, puede ser usada en cualquier ubicación geográfica, donde se requieran perfiles atmosféricos en base a GDAS, que recojan información suficiente y estable de las variables atmosféricas, en periodos determinados de tiempo. Los códigos que permiten extraer y crear los perfiles atmosféricos mensuales están disponibles de forma libre, en el repositorio web: https://github.com/jennifergerc/Tesis_Pregrado.

Los resultados de este trabajo de grado, han sido presentados en el VI Congreso Colombiano de Astronomía y Astrofísica CoCoA, celebrado en la ciudad de Medellín, con la ponencia: *Estimación del flujo de astropartículas usando el Sistema Global de Asimilación de Datos, para la colaboración LAGO*, y en el 11th Workshop of the Latin American Giant Observatory LAGO, celebrado en la ciudad de Buenos Aires, con la ponencia: *Generación de perfiles atmosféricos con GDAS para LAGO*.

Bibliografía

- Ambrosino, F, Anastasio, A, Basta, D Y col. (2014). The MU-RAY project: detector technology and first data from Mt. Vesuvius. *Journal of Instrumentation*.
- Vásquez-Ramírez, A., Suárez-Durán, M., Jaimes-Motta, A., Calderón-Ardila, R., Peña-Rodríguez, J., Sánchez-Villafrades, J., Sanabria-Gómez, J., Asorey, H. & Núñez, L. (2019). Simulated Response of MuTe, a Hybrid Muon Telescope.
- Aab, A. Y col. (2014). Searches for Large-Scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays Detected above Energy of 10^{19} eV at the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array.
- Patrignani, e. a., C. (2016). *Review of Particle Physics* (Vol. C40).
- Spurio, M. (2015). *Particles and Astrophysics, A multi-messenger approach*. Switzerland, Springer.
- Asorey, H, Dasso, S & LAGO Collaboration. (2015). LAGO: the Latin American Giant Observatory, En *The 34th International Cosmic Ray Conference*.
- Aab, A. & Abreu, P. (2014). Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. I. Measurements at energies above $10^{17,8}$ eV. *Phys. Rev. D*, 90.
- Oehlschläger, J. & Engel, R. (2018 (Accedido Julio 16, 2018)). Simulación del Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Karlsruhe. <https://web.iikp.kit.edu/corsika/movies/Movies.htm>

- Suarez-Duran, M. (2011). Instalación de un detector Chérenkov de agua para la detección de trazas de rayos cósmicos a 956 metros sobre el nivel del mar. [Tesis de pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Colombia].
- Ahrens, C. D. (2011). *Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere* (6.^a ed.). Brooks Cole.
- JetStream, N. W. S. Average temperature profile for the lower layers of the atmosphere [Accedido: 2019-07-8].
- Alania, M., Araya, I. J., Gómez, A. V. C., Huerta, H. M., Flores, A. P. & Knapp, J. (2009). Air Shower Simulations. *AIP Conference Proceedings*, 1123.
- Heck, D., Knapp, J., Capdevielle, J., Schatz, G. & Thouw, T. (1998). *CORSIKA : A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers* (inf. téc. FZKA 6019). Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- Engel, H. D., R. Y col. (2018). Towards A Next Generation of CORSIKA: A Framework for the Simulation of Particle Cascades in Astroparticle Physics. *Computing and Software for Big Science*.
- Zaman, A. & Marsaglia, G. (1990). Random selection of subsets with specified element probabilities. *Communications in Statistics-theory and Methods - COMMUN STATIST-THEOR METHOD*, 19.
- James, F. (1980). Monte Carlo theory and practice. *Reports on Progress in Physics - REP PROGR PHYS*, 43, 1145-1189.

- Asorey, H., Núñez, L. & Suárez-Durán, M. (2018). Preliminary Results From the Latin American Giant Observatory Space Weather Simulation Chain.
- Sarmiento-cano, C., Suarez-Durán, M., Vásquez-Ramírez, A., Jaimes-Motta, A., Calder'on-Ardila, R. & Peña-Rodríguez, J. (2019). Modeling the LAGO's detectors response to secondary particles at ground level from the Antarctic to Mexico.
- Jaimes-Motta, A. (2018). Estimación de la respuesta de un detector Chérenkov de agua al fondo de rayos cósmicos en Bucaramanga (956 M S.N.M). [Tesis de pregrado, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Colombia].
- Agostinelli, S. e. a. (2003). GEANT4: A Simulation toolkit. *Nucl. Instrum. Meth.*, A506, 250 -303.
- NOAA. (2019 (Accedido Julio 8, 2019)). Global Data Assimilation System (GDAS1). <ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/>
- Abreu, P. Y col. (2012). Description of Atmospheric Conditions at the Pierre Auger Observatory using the Global Data Assimilation System (GDAS). *Astropart. Phys.*, 35, 591-607.
- NOAA. (2019 (Accedido Julio 8, 2019)). Global Forecast System (GFS), Air Resources Laboratory (ARL). <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- Will, M. & Keilhauer, B. (2011). Monthly Average Profiles for CORSIKA and Offline Based on Data from the Global Data Assimilation System (GDAS).
- Keilhauer, B. & Will, M. (2012). Description of Atmospheric Conditions at the Pierre Auger Observatory Using Meteorological Measurements and Models. *Eur. Phys. J. Plus.*
- RACIMO. Datos de temperatura para la ciudad de Bucaramanga suministrados por la AMB.

R. Nelson, W & Namito, Y. (1990). The EGS4 Code System: Solution of gamma-ray and electron transport problems.

A. Nahum, R. W. R. A., Theodore M. (1988). *Monte Carlo Transport of Electrons and Photons* (1.^a ed.). Springer US.

Allen, Jeff, Castellina, Antonella, Engel, Ralph, Kasahara, Katsuaki, Knurenko, Stanislav, Pierog, Tanguy, Sabourov, Artem, Stokes, Benjamin T., Ulrich, Ralf, Sako, Takashi & Ostapchenko, Sergey. (2013). Air shower simulation and hadronic interactions. *EPJ Web of Conferences*, 53.

Apéndices

Apéndice A. Simulación de las interacciones electromagnéticas y hadrónicas en CORSIKA

1. Interacciones electromagnéticas

CORSIKA proporciona dos rutinas diferentes para el análisis de las interacciones electromagnéticas de la EAS: FNKG que calcula de forma analítica las subcascadas electromagnéticas usando la información suministrada por el usuario del tipo de primario y los límites en energía. Y EGS4, que es una rutina Monte Carlo para calcular las interacciones de forma explícita a partir de distribuciones estadísticas. Para este trabajo, se utilizó la rutina EGS4 de la cual explicaremos algunas de sus consideraciones físicas más importantes.

EGS4 es un programa analógico de Monte Carlo, es decir, todas y cada una de las partículas son seguidas hasta su destino final hasta algún límite inferior de energía. En concordancia con la naturaleza de el método estadístico de Monte Carlo, la precisión de los resultados dependerá del número de eventos analizados. Generalmente, las incertidumbres estadísticas son proporcionales a la raíz inversa del número de eventos (R. Nelson y Namito, 1990). También para una energía mínima dada, el tiempo de cómputo para una lluvia de alta energía es alto. Por esta razón que EGS4 está dividido en dos partes, la primera, un código procesador que usa fórmulas teóricas y empíricas para calcular las cantidades físicas que se necesitan y las prepara para realizar una evaluación numérica rápida. Estos datos son los que usa para desarrollar toda la simulación (R. Nelson y Namito, 1990).

EGS4 considera los siguientes procesos:

- Radiación de frenado o Bremsstrahlung
- Aniquilación de positrones
- Dispersión múltiple de Coulomb
- Dispersión de Moller (e^-e^-) y Bhabha (e^-e^+)
- Pérdida continua de energía
- Producción de pares
- Dispersión Compton
- Dispersión de Rayleigh (opcional)
- Efecto fotoeléctrico

Los procedimientos Monte Carlo cambian respecto al tipo de partícula y tipo de interacción. Por ejemplo, para los fotones, la distancia al siguiente punto de interacción, se obtiene por una distribución exponencial que se establece a partir del coeficiente de atenuación, y el tipo de interacción es determinado a través del cálculo de probabilidades relativas. Para los electrones, las interacciones elásticas e inelásticas de Coulomb son difíciles de calcular directamente, de esta forma, EGS4 divide las trayectorias del electrón en muchos segmentos en los cuales ocurren numerosas interacciones y, para cada segmento, la deflexión angular y la pérdida de energía, son

calculadas a partir de distribuciones de dispersión múltiple (A. Nahum, 1988).

En el proceso de propagación de las partículas cargadas en el aire, estas pierden energía por ionización. Mientras que las partículas neutras continúan su camino sin pérdidas. Debido a la gran capacidad de penetración de los $\mu\pm$, se tiene en cuenta con ellas el fenómeno de dispersión múltiple de Coulomb. Además, todas las trayectorias de partículas cargadas son curvadas por el campo magnético terrestre. Finalmente, si las partículas pasan un nivel de observación mientras están siendo seguidas hasta el siguiente punto de interacción, sus coordenadas de espacio, momento y tiempo son almacenadas. Veamos cómo EGS4 considera algunos de estos procesos:

Pérdida de energía por Ionización: La pérdida de energía por ionización de una partícula cargada que atraviesa la materia con un espesor λ es descrita por la ecuación de Bethe-Bloch:

$$dE_i = \frac{\lambda z^2}{\beta^2} \kappa_1 (\ln(\gamma^2 - 1) - \beta^2 + \kappa_2)$$

$$dE_i = \frac{\lambda \gamma^2 z^2}{\gamma^2 - 1} \kappa_1 (\ln(\gamma^2 - 1) - \beta^2 + \kappa_2) \quad (15)$$

Donde $\beta = v/c$ es la velocidad de la partícula en unidades de la velocidad de la luz, γ es el factor de Lorentz, z es la carga de la partícula ionizada en unidades de e . Las dos constantes $\kappa_1 = 0,153287 \text{MeVg}^{-1}$ y $\kappa_2 = 9,386417 \text{MeVg}^{-1}$ son los valores correspondientes para el aire (Heck y col., 1998). Esta expresión es usada para calcular la pérdida por energía de ionización

a través de la trayectoria de la partícula. La pérdida de energía de muones como función de su energía está representado en la figura 21.

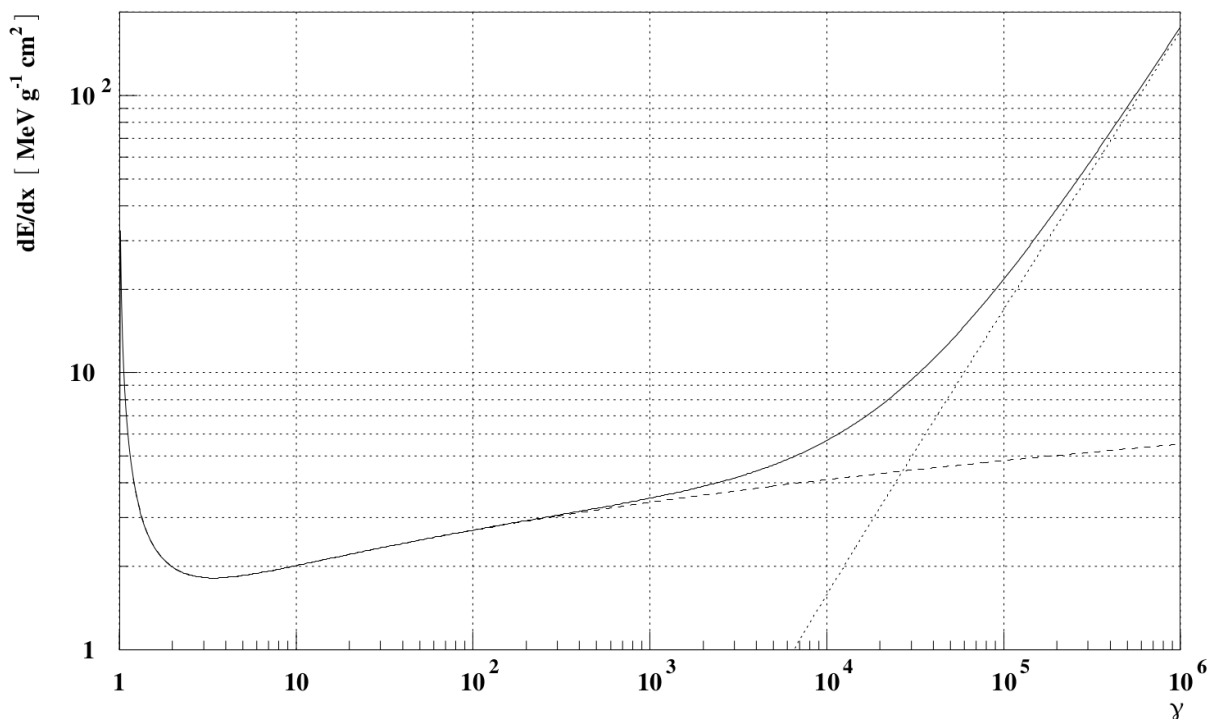


Figura 21. Pérdida de energía de Muones en el aire como función del factor de Lorentz (Heck y col., 1998). Están indicadas las contribuciones de la ionización (línea seccionada) y la producción de pares (línea punteada).

Dispersión múltiple de Coulomb: Las partículas cargadas son dispersadas por el campo eléctrico Coulombiano de los núcleos de aire, en esta situación, la dirección de propagación es alterada pero no cambia la energía de la partícula. En CORSIKA el proceso de dispersión múltiple es considerado sólo en muones y solo una vez por cada tramo de trayectoria. La distribución angular de esta dispersión es descrita por la teoría de Molière. Es importante destacar que, para partículas

de altas energías, esta dispersión no es relevante. En la dispersión de Moliere, la determinación del ángulo de dispersión, se rige por el número de dispersiones a través de un espesor λ de acuerdo con:

$$\Omega_0 = 6702,33 \frac{\lambda}{\beta^2} \frac{Z_s}{m_{air}} e^{Z_e - Z_x/Z_x} \quad (16)$$

donde β es la velocidad del muon en unidades de la velocidad de la luz y $m_{air} = 14,54$ es el promedio del peso atómico del aire. Las cantidades Z_s , Z_e y Z_x dependen de las fracciones atómicas n_i de los átomos del tipo i con carga número Z_i en el aire. Si el número eventos dispersivos es bajo (menores a 20), el ángulo total de dispersión se toma como la suma geométrica de las dispersiones individuales, si no, es modelado por:

$$f(\theta)\theta d\theta = \sqrt{\frac{\sin\theta}{\theta}} f_r(\eta) d\eta \quad (17)$$

Deflexión causada por el campo magnético de la Tierra: El campo magnético de la tierra es caracterizado por la fuerza B_E , el ángulo de declinación δ y el ángulo de inclinación θ .

Una partícula de carga Z y momento \vec{p} moviéndose a través de la longitud de su trayectoria l en un campo magnético \vec{B} , experimenta una deflexión que apunta a la dirección normal del plano atravesado por \vec{B} y p . Para ángulos pequeños esta dada por:

$$\alpha \approx lZ \frac{\vec{p} \times \vec{B}}{p^2} \quad (18)$$

Tiempo de vuelo: Después de la primera interacción del primario con la atmósfera, el tiempo de la lluvia comienza. EL intervalo de tiempo dt en el cual una partícula se mueve alrededor de su trayectoria se obtiene dividiendo la longitud recorrida por la velocidad promedio de la partícula como,

$$dt = \frac{l}{c\beta_{prom}} \quad (19)$$

y el tiempo total que transcurre desde la primera interacción es la suma de los intervalos acumulados por las sucesivas partículas hasta un nivel de observación definido.

2. Interacciones hadrónicas

Los canales de interacción electromagnética y electrodébil dentro del modelo estándar de la física de partículas, describen muy bien los procesos involucrados en las EAS. Sin embargo, el limitado conocimiento de las interacciones fuertes llega a ser una fuente dominante de indeterminación en los procesos de las lluvias. Aunque la cromodinámica cuántica (QCD) es una teoría de interacción fuerte bien establecida y confirmada experimentalmente, sólo los procesos con gran transferencia de momento pueden ser predichos en base a principios fundamentales hasta ahora (Allen, Jeff y col., 2013).

Como no es posible calcular las propiedades de la producción de múltiples partículas en las interacciones hadrónicas de manera precisa, para analizar las EAS, se construyen modelos que

realizan supuestos adicionales, parametrizaciones fenomenológicas y empíricas, que complementen la falta de información. Luego de creados los modelos, son verificados y restringidos a partir de los datos obtenidos de aceleradores. Los modelos construidos para la interpretación de las EAS, deben estar optimizados para un rango de energías amplio, y deben ser constantemente actualizados, conforme se obtienen más datos en los aceleradores.

En CORSIKA, las interacciones hadrónicas son simuladas mediante diferentes modelos dependiendo de la energía. A bajas energías, usa el modelo GHEISHA o ISOBAR. Si la energía es lo suficientemente grande, la interacción es tratada con alguno de los modelos: VENUS, QGSJET, DPMJET, SIBYLL o HDPM. Los modelos de altas energías alcanzan su límite si la energía de centro de masa disponible está por debajo de un umbral, 12GeV para la transición de GHEISHA.

Las rutinas GHEISHA tratan a los neutrones de baja energía de una manera muy consistente. Comparándola con la rutina ISOBAR, donde los neutrones de baja energía son dispersados alrededor de una pérdida de energía de una forma poco realista (Allen, Jeff y col., 2013), resultando en numerosos neutrones de baja energía. Por tal razón, CORSIKA recomienda siempre el uso de GHEISHA a pesar de aumentar el tiempo de cómputo con ello.

Interacciones fuertes a altas energías: La figura muestra una comparación entre los códigos disponibles en CORSIKA y datos obtenidos del CMS el flujo de energía como función de la pseudorapidez en dirección del movimiento de la partícula. Además, los datos de los modelos

han sido contrastados con las simulaciones realizadas para el CMS. Para este trabajo, se usará el modelo QGSJET-II.

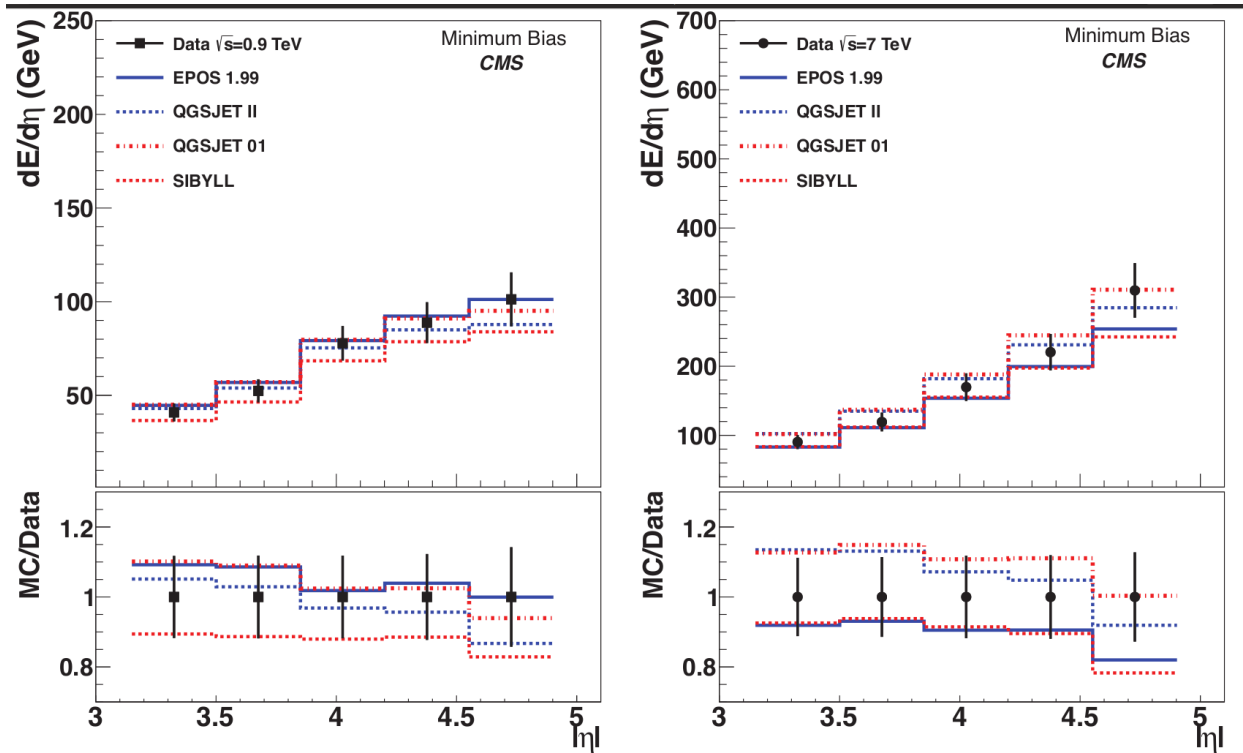


Figura 22. Gráfica del flujo de energía como función de la pseudorapidez en la dirección del movimiento de hadrones con energía de centro de masa de 900GeV. (Allen, Jeff y col., 2013)

Apéndice B. Parámetros de los nuevos perfiles atmosféricos construidos con GDAS.

Tabla 4

Parámetros atmosféricos para el mes de Enero.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-183.43	1237	1.07488e+06
3.76290	-84.5939	1146.93	952969
9.70995	-4.26996	1181.31	768112
26.3624	0.000546666	1629.39	682201
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 5

Parámetros atmosféricos para el mes de Febrero.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-185.777	1240.57	1.07873e+06
3.76290	-80.0252	1144.24	948226
9.70995	-4.51389	1176.73	773697
26.3624	0.000506149	1628.68	684995
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 6

Parámetros atmosféricos para el mes de Marzo.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-186.091	1240.02	1.08192e+06
3.76290	-82.1356	1145.26	953386
9.70995	-4.49877	1177.97	773998
26.3624	0.000502607	1634.37	684999
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 7

Parámetros atmosféricos para el mes de Abril.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-182.28	1237.95	1.07445e+06
3.76290	-81.2229	1145.98	949767
9.70995	-4.41518	1179.3	772360
26.3624	0.000530822	1641.29	683270
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 8

Parámetros atmosféricos para el mes de Mayo.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-181.218	1236.72	1.07487e+06
3.76290	-81.8311	1146.27	952054
9.70995	-4.39951	1179.72	773038
26.3624	0.00052024	1646.42	683695
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 9

Parámetros atmosféricos para el mes de Junio.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-179.889	1234.4	1.07286e+06
3.76290	-86.019	1148.91	956774
9.70995	-3.92019	1184.53	767604
26.3624	0.00049459	1607.05	686431
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 10

Parámetros atmosféricos para el mes de Julio.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-182.313	1236.06	1.07453e+06
3.76290	-86.4462	1148.72	956044
9.70995	-3.95886	1184.72	766086
26.3624	0.000538009	1622.1	683272
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 11

Parámetros atmosféricos para el mes de Agosto.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-186.139	1239.66	1.0789e+06
3.76290	-88.2091	1150.4	957878
9.70995	-3.68067	1187.35	763621
26.3624	0.000518244	1592.17	685882
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 12

Parámetros atmosféricos para el mes de Septiembre.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-183.954	1236.97	1.07739e+06
3.76290	-84.3842	1146.24	954335
9.70995	-4.15752	1180.68	769259
26.3624	0.000540041	1635.2	682826
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 13

Parámetros atmosféricos para el mes de Octubre.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-180.852	1235.63	1.0738e+06
3.76290	-80.3508	1144.14	949685
9.70995	-4.38572	1176.83	773922
26.3624	0.000499663	1644.66	684513
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 14

Parámetros atmosféricos para el mes de Noviembre.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-179.222	1233.73	1.07416e+06
3.76290	-78.7574	1142.26	949893
9.70995	-4.54605	1173.72	777710
26.3624	0.000480868	1639.56	686566
100	0.0112829	1	1e+09

Tabla 15

Parámetros atmosféricos para el mes de Diciembre.

Distancia [km]	Parámetros atmosféricos A,B,C		
0	-179.336	1233.49	1.07174e+06
3.76290	-79.8575	1142.9	948863
9.70995	-4.93372	1174.98	775317
26.3624	0.000593498	1695.48	677150
100	0.0112829	1	1e+09

Apéndice C. Distribuciones longitudinales de primarios individuales

Las siguientes gráficas corresponden, cada uno, a distribuciones longitudinales de primarios individuales, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja). Se observa el número de partículas que se genera, a medida que la EAS se desarrolla a través de la atmósfera (superior izquierda), la diferencia porcentual en relación al número de partículas generadas con la atmósfera predeterminada (inferior izquierda), la energía depositada a lo largo del desarrollo de la EAS (superior derecha), y la diferencia porcentual en relación a la energía depositada con la atmósfera predeterminada (inferior derecha).

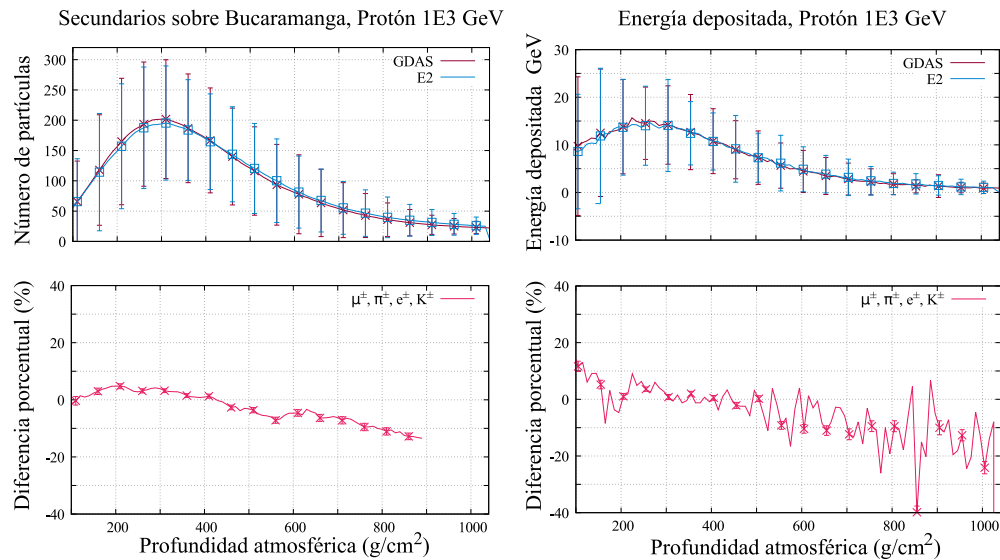


Figura 23. Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^3 GeV$ que fue simulado 5000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

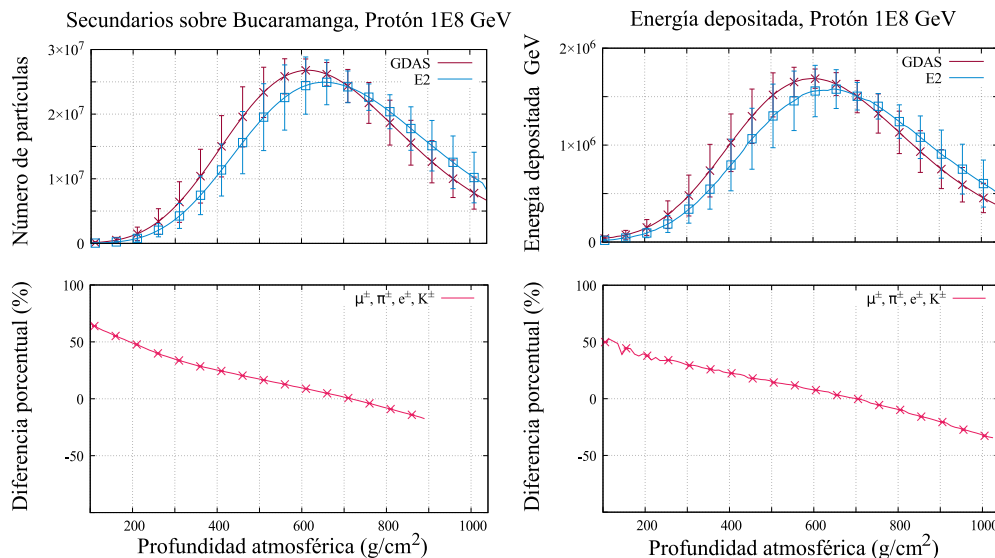


Figura 24. Distribución longitudinal de un protón de $1 \cdot 10^8 GeV$ que fue simulado 10 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

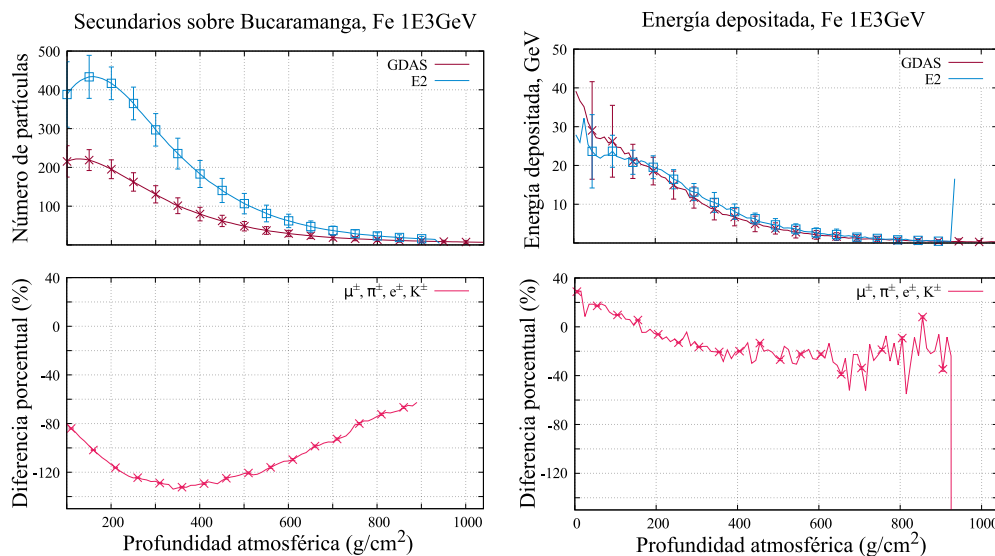


Figura 25. Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^3 GeV$ que fue simulado 5000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

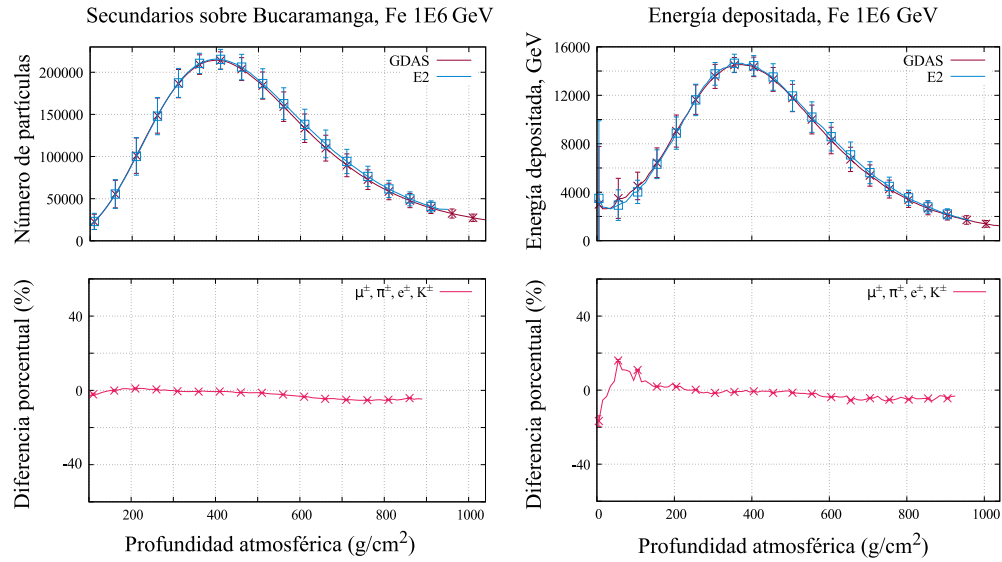


Figura 26. Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^6 GeV$ que fue simulado 1000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

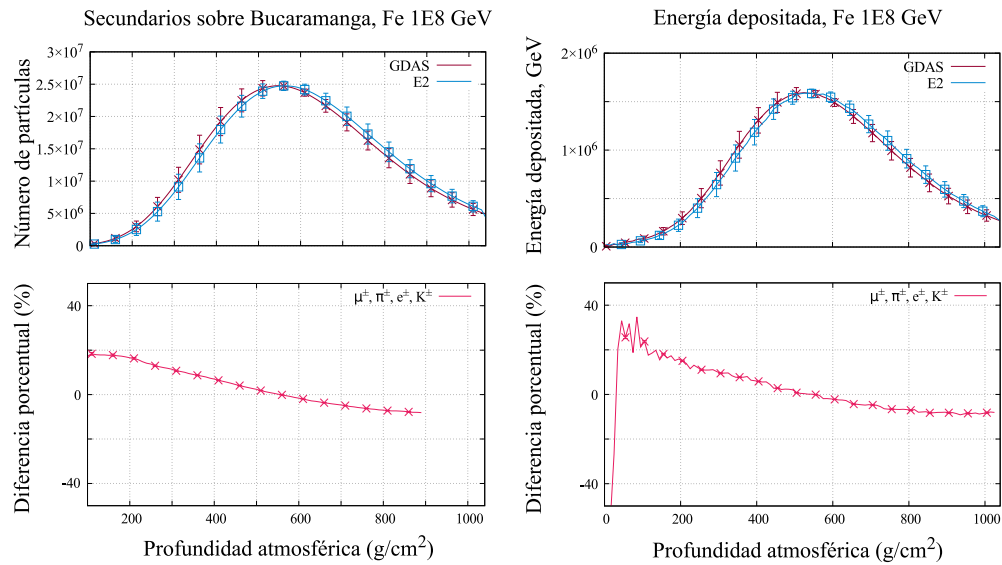


Figura 27. Distribución longitudinal de un núcleo de hierro de $1 \cdot 10^3 GeV$ que fue simulado 10 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

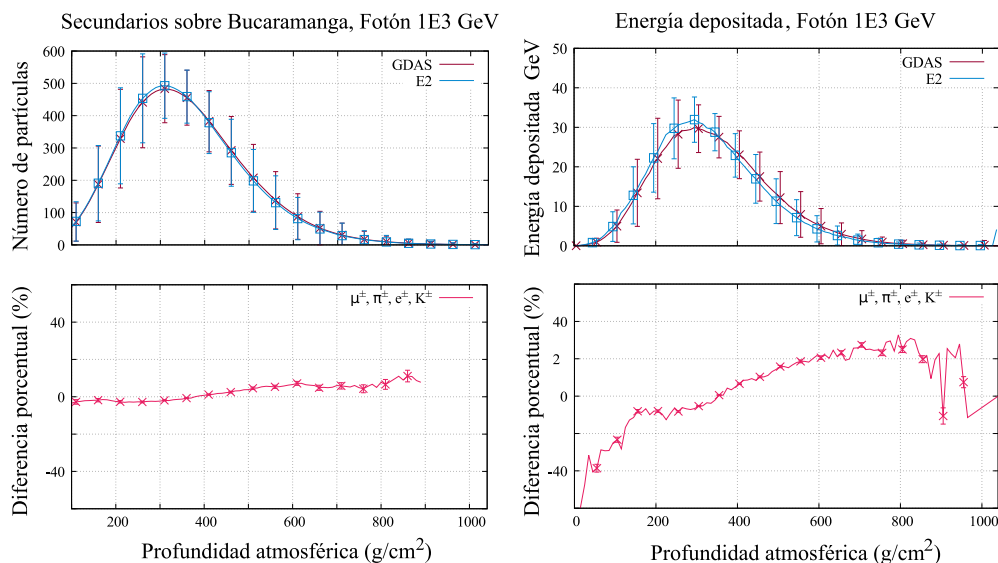


Figura 28. Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^3 \text{ GeV}$ que fue simulado 5000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

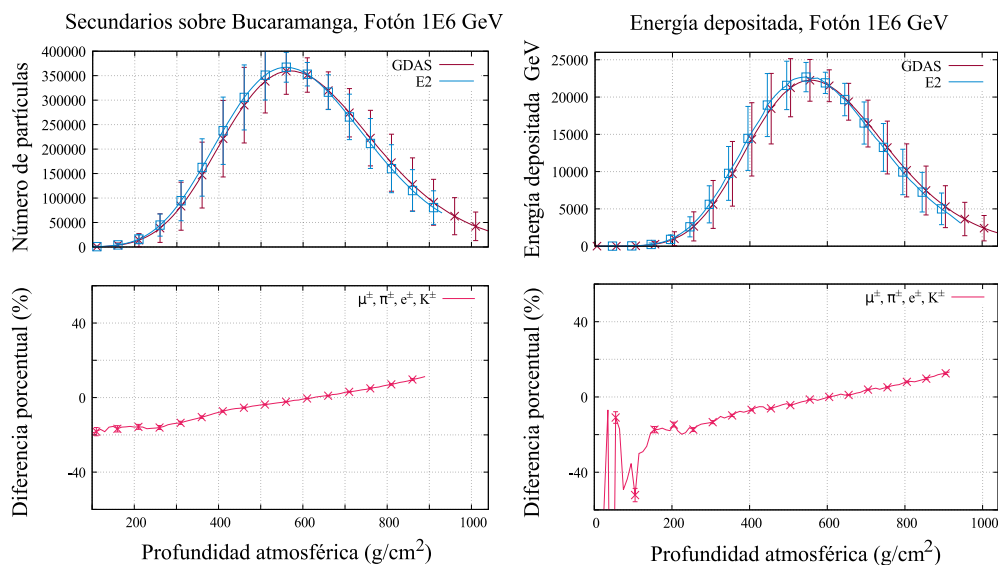


Figura 29. Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^6 \text{ GeV}$ que fue simulado 1000 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).

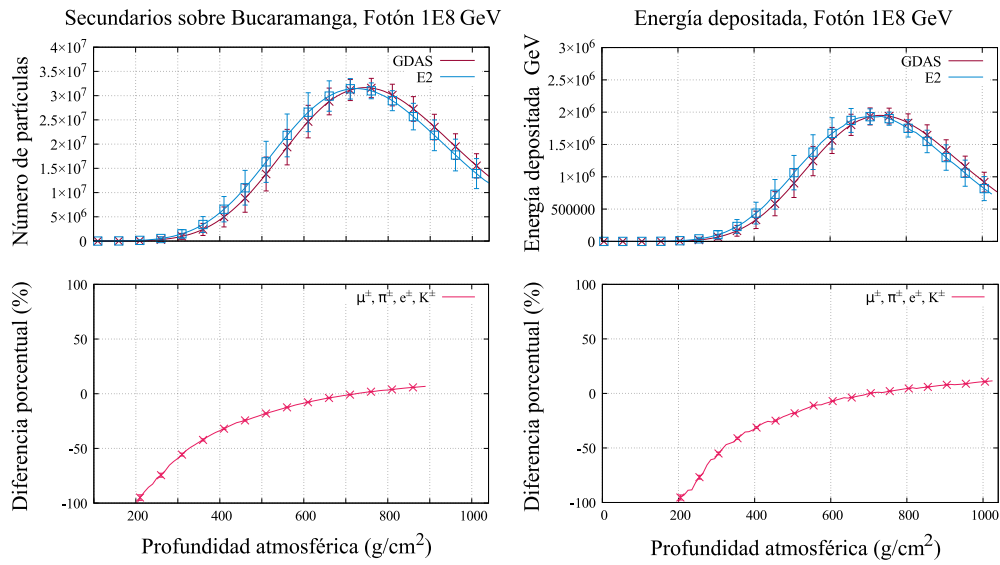


Figura 30. Distribución longitudinal de un fotón de $1 \cdot 10^8 GeV$ que fue simulado 10 veces, usando la atmósfera predeterminada (línea azul), y usando la atmósfera construida para el mes de abril (línea roja).