


# Simulación de cascadas de partículas secundarias en la atmósfera para Mérida-Venezuela


Simulation of secondary particle cascades in the atmosphere for Mérida, Venezuela


Robert Rondón <sup>1</sup>


Yunior Pérez <sup>2</sup>


Libardo Zerpa <sup>3</sup>

Orielis Soto <sup>4</sup>

Carlos Jaimes <sup>5</sup>

Jesús Erazo <sup>6</sup>

Neptali Martorelli <sup>7</sup>

Carlos Pérez <sup>8</sup>

Richard Rojas <sup>9</sup>

Francisco Guerrero <sup>10</sup>

Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela<sup>1,3,4,5,6,7,8,10</sup>

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México<sup>2</sup>

Centro de Investigaciones de Astronomía Francisco J. Duarte, Mérida, Venezuela<sup>3,5,8,9,10</sup>

Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, Mérida, Venezuela<sup>6</sup>

roncharoberth@gmail.com<sup>1</sup>

yuniorp@fisica.unam.mx<sup>2</sup>

libardo.zerpa.guillen@gmail.co<sup>3</sup>

orielys1012@gmail.com<sup>4</sup>

carl8919@gmail.com<sup>5</sup>

jerazo@cenditel.gob.ve<sup>6</sup>

martorelli617@gmail.com<sup>7</sup>

roncharoberth@gmail.com<sup>8</sup>

astrofisico1968@gmail.com<sup>9</sup>

fxgv20@gmail.com<sup>10</sup>

Fecha de recepción: 23/05/2025

Fecha de aceptación: 12/08/2025

Pág: 38 – 49

DOI: 10.5281/zenodo.17466412



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-SA 4.0.

## Resumen

Los rayos cósmicos son partículas de altas energías provenientes del espacio que al interactuar con la atmósfera terrestre, generan una cascada de partículas secundarias. Para estudiar este fenómeno, se utilizó la aplicación ARTI (*Atmosferical Radiation Transport Information*), desarrollada por el Observatorio Gigante Latinoamericano (LAGO), que incorpora el software CORSIKA para simular la producción y propagación de estas partículas secundarias en la atmósfera. LAGO es un observatorio de rayos cósmicos que opera con detectores Cherenkov en agua distribuidos en distintas alturas y latitudes de América Latina. En este trabajo se evaluó la ubicación de un detector Cherenkov en agua en Mérida, Venezuela, para el estudio de las componentes electromagnética y muónica de una cascada secundaria de partículas. En CORSIKA se modeló el flujo de partículas secundarias, en tres ubicaciones de Mérida - Venezuela: en la Hechicera a 1630 m.s.n.m, Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato (OANLLH) a 3600 m.s.n.m y Pico Espejo Mérida a 4754 m.s.n.m. Los resultados de las simulaciones muestran que Pico Espejo es el sitio más adecuado para estudios con gamas secundarias, ya que presenta un flujo superior a  $10^3$  partículas  $m^2s^{-1}$  y energías cercanas a 500 GeV, superando los valores registrados en la Hechicera y el OANLLH. Además, las simulaciones mostraron una diferencia significativa entre la componente electromagnética (gammas, electrones y positrones) y la componente muónica, que lo convierte en la ubicación preferente para estudios de clima espacial con la componente muónica.

**Palabras clave:** CORSIKA, detectores Cherenkov, muones, rayos cósmicos.

## Abstract

Cosmic rays are high-energy particles from space that, upon interacting with the Earth's atmosphere, generate a cascade of secondary particles. To study this phenomenon, the ARTI (*Atmospherical Radiation Transport Information*) application was used, developed by the Latin American Giant Observatory (LAGO), which incorporates the CORSIKA software to simulate the production and propagation of these secondary particles in the atmosphere. LAGO is a cosmic ray observatory that operates with water Cherenkov detectors distributed at different heights and latitudes of Latin America. In this work, the location of a water Cherenkov detector in Mérida, Venezuela, was evaluated for the study of the electromagnetic and muonic components of a secondary particle cascade. In CORSIKA, the flux of secondary particles was modeled in three locations in Mérida, Venezuela: in La Hechicera at 1630 m.a.s.l., National Astronomical Observatory Llano del Hato (OANLLH) at 3600 m.a.s.l., and Pico Espejo Mérida at 4754 m.a.s.l. The results of the simulations show that Pico Espejo is the most adequate site for studies with secondary gammas, since it presents a flux superior to  $10^3$  particles  $m^2s^{-1}$  and energies close to

500 GeV, surpassing the values registered in La Hechicera and OANLLH. Additionally, the simulations showed a significant difference between the electromagnetic component (gammas, electrons, and positrons) and the muonic component, which converts it into the preferential location for space weather studies with the muonic component.

**Keywords:** CORSIKA, Cherenkov detectors, muons, cosmic rays.

## Introducción

Desde el descubrimiento de los rayos cósmicos, se ha comprendido que estas partículas de alta energía provenientes del espacio exterior impactan constantemente la atmósfera terrestre, generando cascadas de partículas secundarias (Lipari, 1993). Estas partículas juegan un papel crucial en el estudio de fenómenos astrofísicos y de clima espacial (Durán et al., 2016). Los rayos cósmicos abarcan un amplio espectro de energías (Regener, 1931), desde megaelectronvoltios (MeV) hasta exa-electronvoltios (EeV), y su estudio ha llevado al desarrollo de técnicas avanzadas de detección, como los detectores Cherenkov de agua (Allan et al., 1960).

Ahora bien, el espectro de los rayos cósmicos (RC), es uno de los aspectos más estudiados, que se refiere a la distribución de las partículas cargadas de alta energía que llegan a la Tierra desde el espacio exterior. Este espectro abarca una amplia gama de energías, desde valores relativamente bajos hasta extremadamente altos. La forma exacta del espectro de rayos cósmicos es compleja y está influenciada por varios factores, incluyendo la fuente de los rayos cósmicos, su trayectoria a través del espacio y las interacciones con campos magnéticos (Gaisser et al., 2016). Cuando un rayo cósmico primario, usualmente un protón o un núcleo pesado, entra en la atmósfera terrestre, interactúa con los núcleos del aire y produce una cascada de partículas secundarias en un proceso conocido como cascada atmosférica extensa (del inglés: *Extensive Air Shower*, EAS) (Gaisser et al., 2016). Estas cascadas incluyen tres componentes principales: electromagnético, compuesto por electrones, positrones y fotones; muónico, dominado por muones que pueden llegar a grandes profundidades en la atmósfera e incluso atravesar estructuras sólidas; y hadrónico, formado por protones, neutrones y piones que posteriormente decaen en otras partículas (de acuerdo con la física de partículas, los protones son partículas prácticamente estables. Sin embargo, los neutrones sí pueden decaer en protones, electrones y antineutrinos. Del mismo modo, los piones también pueden decaer, pero su decaimiento depende de su carga, si están cargados decaen en muones y neutrinos muónicos, si son neutros pueden producir fotones, que a su vez generan el componente electromagnético de la cascada). La evolución de la cascada depende de la energía y composición del rayo cósmico primario, así como de la altitud y densidad de la atmósfera, alcanzando su máximo desarrollo a varios kilómetros de altura antes de que las partículas secundarias alcancen el suelo, donde pueden ser detectadas por instrumentos como los detectores Cherenkov sumergidos en agua utilizados en LAGO (Observatorio Gigante Latinoamericano) (Sidelnik y Asorey, 2017).

Por otro lado, la colaboración internacional LAGO desarrolló ARTI, un marco computacional diseñado para simular señales de partículas secundarias generadas por la interacción de rayos cósmicos primarios con la atmósfera [10]. ARTI combina tres herramientas principales: *MagnetoCosmics*, *CORSIKA* y *Geant4* (*GEometry ANd Tracking 4*), permitiendo evaluar el efecto del campo geomagnético, simular cascadas de partículas secundarias atmosféricas de rayos cósmicos y modelar la respuesta de detectores de partículas. El estudio utiliza ARTI para calcular el flujo de señal en ocho sitios del Observatorio Gigante Latinoamericano (LAGO), los cuales varían en altitud, latitud y rigidez geomagnética. Los resultados incluyen estimaciones del flujo de partículas secundarias en diferentes altitudes y la influencia del campo geomagnético sobre este flujo. Además, ARTI permite calcular el flujo de partículas esperadas durante el destello de rayos gamma (GRBs) y el impacto de fotones energéticos de fuentes gamma persistentes (Sarmiento et al., 2022). Otro aspecto destacado es la capacidad de ARTI para estimar flujos de muones de alta energía y partículas secundarias a nivel del suelo, permitiendo aplicaciones en muografía, estudios de clima espacial y simulaciones de detectores de radiación.

En ese sentido, el estudio con ARTI permitió calcular el flujo de partículas secundarias en ocho sitios de LAGO, evidenciando que la altitud es el factor más influyente en la cantidad de partículas detectadas, con sitios elevados registrando un flujo hasta diez veces mayor que los de baja altitud. Además, la rigidez geomagnética afecta principalmente las partículas de baja energía, reduciendo significativamente el número de neutrones secundarios en sitios con alta rigidez. Las simulaciones con *Geant4* mostraron que los detectores tipo LAGO responden de manera distinta según la ubicación, con variaciones en la señal de muones utilizada para calibración. ARTI también demostró su capacidad para modelar eventos astrofísicos transitorios como estallidos de rayos gamma (GRBs), estudiar el impacto del clima espacial en la radiación secundaria y evaluar la respuesta de detectores en distintas condiciones geográficas. En este estudio, se utilizó *CORSIKA* (versión 7.7402), integrado en ARTI, para obtener simulaciones detalladas de cascadas de partículas secundarias atmosféricas extensas y calcular el flujo total de señal esperada en tres sitios seleccionados en Mérida, Venezuela (alturas de 1630 msnm, 3600 msnm y 4754 msnm) para un detector de Cherenkov sumergidos en agua situado en estos sitios.

## Método

En cuanto a ARTI (*Atmospheric Radiation Transport Information*), es un conjunto de códigos desarrollados por la colaboración LAGO, escrito en C++, Fortran, y scripts en Python, que simula la propagación y la interacción de los rayos cósmicos primarios con la atmósfera terrestre y calcula la señal generada en un detector específico, en este caso un detector Cherenkov sumergido en agua. El software permite ajustar las condiciones locales del sitio de interés, incluyendo la latitud, longitud, altitud y condiciones atmosféricas

(presión, temperatura, densidad), que se obtienen utilizando perfiles atmosféricos generados con MODTRAN, mediante los cuales ARTI invoca a CORSIKA para la simulación detallada de cascadas atmosféricas y procesa las señales de las partículas secundarias en el detector. Se empleó ARTI para calcular el flujo de partículas secundarias en los tres sitios en Mérida-Venezuela. Se simuló un intervalo temporal de 3600 segundos (1 hora) para cada sitio, con una configuración estandarizada para las partículas primarias. Se analizaron tres componentes de las cascadas de partículas secundarias: componente electromagnética (formada por electrones ( $e^-$ ), positrones ( $e^+$ ) y fotones ( $\gamma$ ), componente muónica (compuesta principalmente por muones ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ), generados a partir del decaimiento de piones cargados ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ )), componente hadrónica (integrada por bariones (protones y neutrones) y mesones (piones y kaones)). CORSIKA utiliza el método Monte Carlo para modelar las interacciones de partículas primarias con las moléculas atmosféricas y las subsecuentes cascadas de partículas. Las simulaciones incluyen protones y núcleos pesados como partículas primarias, abarcando un rango de energías que va desde 109 eV hasta 1020 eV. Estas partículas interactúan mediante interacciones hadrónicas y electromagnéticas, generando partículas secundarias que se propagan hasta la superficie terrestre.

Ahora bien, el software de simulación CORSIKA emplea distintos modelos para describir las interacciones hadrónicas en función de la energía del rayo cósmico primario. El modelo hadrónico para interacciones a altas energías QGSJET-II-04, (*Quark Gluon String model with JETs*, versión II-4) se utiliza para energías superiores a 100 GeV y modela colisiones hadrón-núcleo generando piones y kaones, cuyos decaimientos producen muones detectables en la superficie terrestre. Los modelos GHEISHA (*Gamma Hadron Electron Interaction SHower code*) y FLUKA (*FLUktuierende KAskade* o Cascada Fluctuante en español) se aplican en el rango de baja energía (100 GeV), describiendo procesos como la dispersión de protones, el decaimiento de piones y la producción de neutrones y radiación electromagnética. Para colisiones de ultra alta energía en el rango de EeV (10<sup>18</sup> eV), DPMJET (*Dual Parton Model with JETs*) modela eventos hadrón-hadrón y núcleo-núcleo, permitiendo el estudio de partículas secundarias de extrema energía.

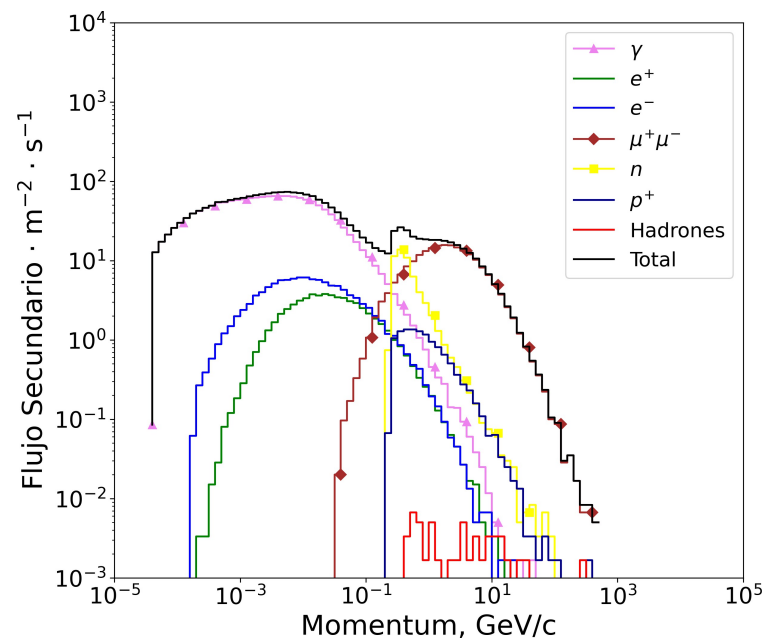
En cuanto a los resultados de las simulaciones, fueron validados mediante la comparación con estudios previos realizados en otros sitios del proyecto LAGO, como Chacaltaya (Bolivia), La Serena (Chile) y Lima (Perú), que presentan condiciones atmosféricas similares en términos de altitud y características geomagnéticas. Estas comparaciones permiten asegurar que los flujos de partículas secundarias simulados para Hechicera, OANLLH y Pico Espejo siguieran las tendencias esperadas en función de la altitud y la densidad atmosférica.

## Resultados y discusión

En este estudio, se seleccionaron tres ubicaciones en Mérida, Venezuela. Debido a la falta de perfiles atmosféricos específicos para estos sitios, se utilizó el perfil atmosférico tropical

de Bucaramanga, Colombia, dada su proximidad geográfica. La naturaleza aleatoria del flujo primario de rayos cósmicos y la dispersión de la cascada secundaria de partículas dificultan la medición directa. Debido a que la cascada se extiende sobre un área considerable al alcanzar el suelo, se recurre a la normalización del flujo. Este proceso estandariza las mediciones, permitiendo la obtención de datos comparables. La normalización se fundamenta en la premisa de que todas las partículas secundarias, originadas por las partículas primarias que impactan un área de  $1m^2$  en la alta atmósfera, llegarán al suelo dentro de la misma superficie en el mismo intervalo de tiempo. La validez de la suposición anterior se justifica por la breve duración de la evolución de la cascada, en contraste con los periodos de tiempo típicos considerados. Por lo tanto, se normaliza el flujo a un área estándar de  $1m^2$ , lo que facilita el conteo de las partículas secundarias que atraviesan dicha área de referencia.

Con base a lo anterior, las Figuras 1, 2 y 3 ilustran el flujo de partículas secundarias, obtenidas en diferentes altitudes: La Hechicera (1630 m.s.n.m.), OANLLH (3600 m.s.n.m.) y Pico Espejo (4754 m.s.n.m.), respectivamente.

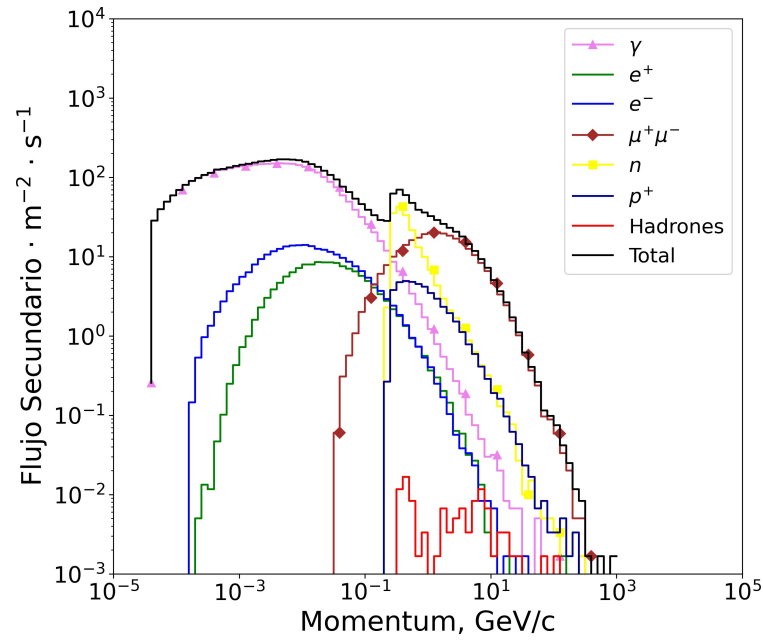


**Figura 1:** Espectros de las partículas secundarias discriminadas por tipo de partícula a 1630 m.s.n.m (Hechicera).

Fuente: Elaboración propia (2025)

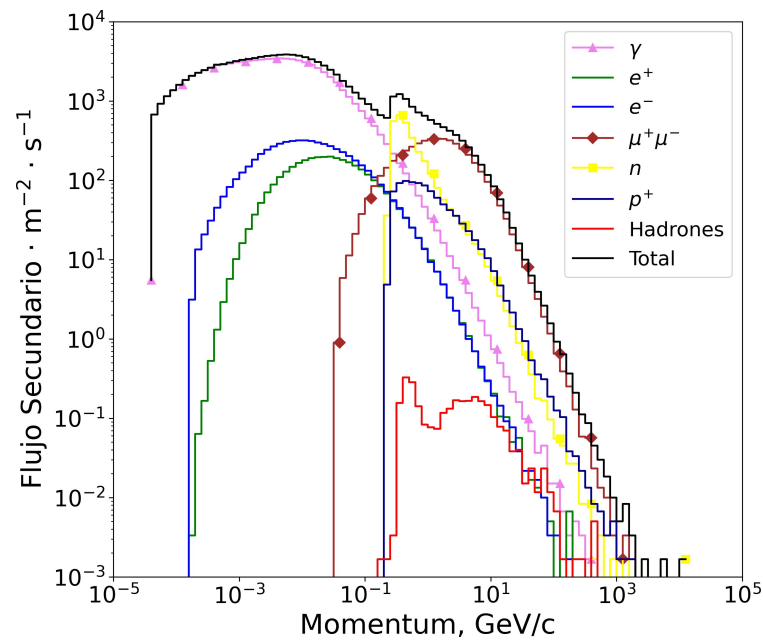
Se presenta el flujo de partículas secundarias obtenido en tres ubicaciones: Pico Espejo (4754 m.s.n.m.), CIDA (3600 m.s.n.m.) y La Hechicera (1630 m.s.n.m.). El análisis de los gráficos muestra que, para momentum promedio relativamente bajo, el flujo está dominado por la componente electromagnética. A medida que el momentum aumenta, predominan los muones,

observándose incluso algunos con energías cercanas a 1 TeV/c durante el periodo de integración. Adicionalmente, se aprecia una disminución gradual en el flujo total de partículas secundarias en todas las componentes, atribuible a la atenuación atmosférica en las diferentes altitudes, evidenciada al comparar las Figuras 1, 2 y 3. Al contrastar los resultados de Chacaltaya (Sarmiento et al., 2022), obtenidos con un perfil de verano subtropical, con los de Pico Espejo (perfil tropical), se constata un incremento de dos órdenes de magnitud en el flujo, resultado directo de la diferencia en los perfiles atmosféricos empleados.



**Figura 2:** Espectros de las partículas secundarias discriminadas por tipo de partícula a 3600 m.s.n.m (OANLLN).

Fuente: Elaboración propia (2025)



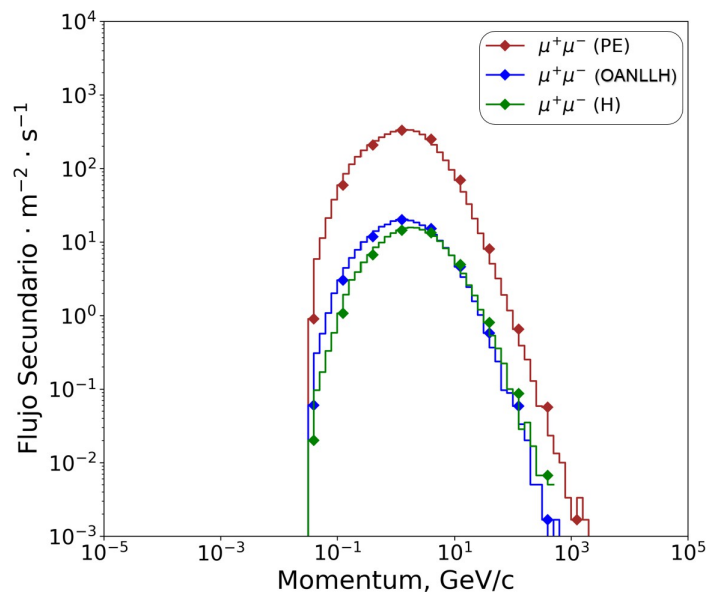
**Figura 3:** Espectros de las partículas secundarias discriminadas por tipo de partícula a 4754 m.s.n.m (Pico Espejo)

Fuente: Elaboración propia (2025)

La calibración de los detectores LAGO depende de la medición de la señal asociada a los muones, que pertenece a la componente muónica. Para Pico Espejo los  $e^\pm$  dominan sobre los muones ( $\mu^\pm$ ) debido al desarrollo de la cascada.

Esto también se puede observar en Chacaltaya que está aproximadamente a 455 metros más alto que Pico Espejo. En la Figura 4 se muestra el flujo de muones para Pico Espejo, OANLLH, y la Hechicera. Se observa un mayor flujo de muones para Pico Espejo en todo el rango de energía de  $\sigma$   $10^{-1}$  GeV/c a  $\sim 10^3$  GeV/c. El flujo para el OANLLH y la Hechicera es similar en el rango de energía de  $\sigma$   $10^1$  GeV/c a  $\sim 10^3$  GeV/c. Se observa un mayor flujo de muones para Pico Espejo (línea y diamante de color rojo), con muones de energías  $\sim 10^3$  GeV, el flujo para el Llano del Hato y la Hechicera es similar en todo el rango de energía.

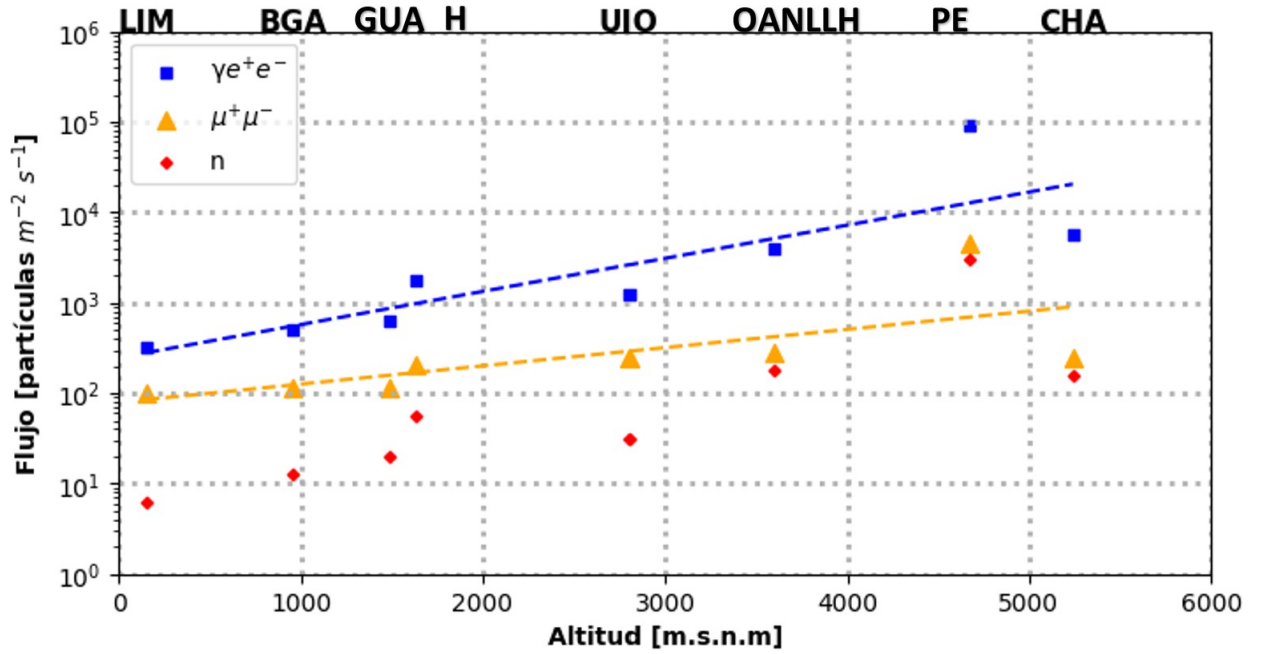




**Figura 4:** Flujo de muones para los tres sitios de interés.

Fuente: Elaboración propia (2025)

En la Figura 5, muestra el efecto para diferentes componentes de la cascada por la absorción atmosférica que cambia con la altitud. Por ejemplo, el efecto geomagnético influye solo en las partículas primarias de baja energía y, por lo tanto, el impacto en el flujo total de partículas secundarias en la superficie es más importante en sitios de gran altitud, donde el impacto de las primarias de energía muy baja es más significativo. En esta Figura 5, mostramos una comparación en el flujo de componentes electromagnéticos, muónicos y de neutrones, en cinco sitios con altitudes diferentes, pero rigidez geomagnética muy similar ( $\approx 11.3 \text{ GV}/c$ ) y perfil atmosférico. El mismo perfil tropical para Bucaramanga (BGA, Colombia) y Ciudad de Guatemala (GUA, Guatemala), y un perfil subtropical de verano para Quito (UIO, Ecuador), Lima (LIM, Perú) y Chacaltaya (CHA, Bolivia). Además, en esta gráfica incluimos nuestros tres lugares Hechicera (H), Llano del Hato (OANLLH) y pico Espejo (PE), asumiendo un perfil atmosférico tropical y una rigidez similar a los 5 sitios considerados en LAGO. La variación del flujo total de las componentes electromagnéticas, muónicas y de neutrones para los sitios de la Hechicera, Llano del Hato y Pico Espejo, es congruente con los resultados obtenidos para los 5 sitios de LAGO.



**Figura 5:** El flujo total de partículas secundarias en la superficie de la Tierra, en función de la altitud en cinco sitios de LAGO (con rigidez geomagnética similar) y tres sitios de Mérida-Venezuela (Con la misma rigidez, pero diferente a los otros sitios de LAGO) con altitudes distintas.

Fuente: Elaboración propia (2025)

Asimismo, la Figura 5 ilustra la relación entre las tres componentes de la cascada: la electromagnética ( $\gamma$ ,  $e^+$ ,  $e^-$ ) en cuadrados azules, la muónica ( $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ) en triángulos amarillos, y los neutrones ( $n$ ) de la componente hadrónica en diamantes rojos. Aunque el efecto de la altitud en el flujo es evidente, este estudio se centra en las componentes muónica y electromagnética. Se realizó un ajuste lineal para cada una, revelando lo siguiente:

Para la componente electromagnética ( $\gamma e^\pm$ ):

$$\log_{10}(\text{flujo}) = 0.0002 \times \text{Altitud} + 1.89 \quad (1)$$

Para la componente muónica ( $\mu^\pm$ ):

$$\log_{10}(\text{flujo}) = 0.0004 \times \text{Altitud} + 2.39 \quad (2)$$

La pendiente de la recta representa cómo cambia el valor del logaritmo base 10 cuando la variable Altitud aumenta en una unidad. En este caso, por cada aumento de una unidad en Altitud, el valor del logaritmo aumenta en función de la pendiente  $m_{EM} = 0.0002$  y  $m_\mu = 0.0004$  y la constante  $b$  o corte con el eje (representa el valor del logaritmo del flujo a una altitud de 0 m o nivel del mar) en estos casos serían  $b_{EM} = 1.89$  y  $b_\mu = 2.39$ .

## Conclusiones

El flujo total para todas las partículas secundarias obtenidas para la Hechicera ( $2020.18$  partículas  $m^2s^{-1}$ ), Llano del Hato ( $4506$  partículas  $m^2s^{-1}$ ) refleja cómo cambia el flujo total con la altitud.

En el caso de Pico Espejo (Figura 5.1), se observa un pequeño flujo ( $10^3$  partículas  $m^2s^{-1}$ ) muones, neutrones y más partículas alrededor de  $10^3$  GeV/c. Para Llano del Hato y Hechicera el flujo de estas partículas no alcanza energías de  $10^3$  GeV/c. Los muones permiten una buena calibración del detector por la cantidad de energía que depositan en el medio, gracias al efecto Cherenkov.

En tal sentido, para realizar estudios usando gamas secundarias, el mejor sitio es Pico Espejo-Mérida, con un flujo en la componente electromagnética de  $9.2 \times 10^4$  partículas  $m^2s^{-1}$ , ya que su flujo es más grande que para la Hechicera-Mérida ( $4.0 \times 10^3$  partículas  $m^2s^{-1}$ ) y el OANLLH ( $1.742 \times 10^3$  partículas  $m^2s^{-1}$ ).

Ahora bien, si se realizan estudios de clima espacial usando la componente muónica (ver Figura 4), el mejor sitio es Pico Espejo por el flujo de muones. El siguiente sitio es Llano del Hato y Hechicera. Además, la componente de electromagnética se diferencia bastante de la componente muónica, como se observa en la Figura 5.

En ese sentido, a la altura de Pico Espejo se espera tener un flujo de muones  $10^3$  partículas  $m^2s^{-1}$  a energías mayores a un TeV. El flujo total de las componentes electromagnético, muónica y hadrónica se presenta en la Figura 5. En los sitios de La Hechicera, OANLLH y Pico Espejo se observa una tendencia similar a la de los sitios de LAGO.

## Referencias

- Allan, H., Beamish, R., Bryant, D., Kasha, H., y Wills, R. (1960). An Investigation of Extensive Air Showers using Cerenkov Detectors. *Proceedings Of The Physical Society*, 76(1), 1-16. <https://doi.org/10.1088/0370-1328/76/1/302>
- Durán, M., Asorey, H., Dasso, S., Nunez, L., Pérez, Y., y Sarmiento, C. (2016). The LAGO Space Weather Program: Directional Geomagnetic Effects. Background Fluence Calculations and Multi-Spectral Data Anal. *Proceedings Of 36th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2019)*, 142. <https://doi.org/10.22323/1.236.0142>
- Gaisser, T., Engel, R., y Resconi, E. (2016). Cosmic Rays and Particle Physics. *Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139192194>
- Lipari, P. (1993). Lepton spectra in the earth's atmosphere. *Astroparticle Physics*, 1(2), 195-227. [https://doi.org/10.1016/0927-6505\(93\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0927-6505(93)90022-6)

- Regener, E. (1931). Spectrum of Cosmic Rays. *Nature*, 127(3198), 233-234. <https://doi.org/10.1038/127233b0>
- Sarmiento, C., Suárez, M., Calderón, R., Vásquez, A., Jaimes, A., Núñez, L., Dasso, S., Sidelnik, I., y Asorey, H. (2022). The ARTI framework: cosmic rays atmospheric background simulations. *The European Physical Journal C*, 82(1019). <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10883-z>
- Sidelnik, I., y Asorey, H. (2017). LAGO: The Latin American giant observatory. *Nuclear Instruments And Methods In Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors And Associated Equipment*, 876, 173-175. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.069>