Rev. Soc. cient. Parag. 2019;24(2):238-248

ARTÍCULO ORIGINAL – ORIGINAL ARTICLE

Medición de la distribución angular de muones en la superficie terrestre

Measurement of the angular distribution of muons on the earth's surface

Jesús Nuñez[1], Jorge Molina[2]
[1] Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FaCen). San Lorenzo, Paraguay.
[2] Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería (Fiuna). San Lorenzo, Paraguay.
Autor de correspondencia: nunezalberto96@gmail.com, jmolina@ing.una.py
DOI: https://doi.org/10.32480/rscp.2019-24-2.238-248
Recibido: 30/09/2019. Aceptado:25/11/2019.

Resumen: En este trabajo se realizaron mediciones del flujo y la distribución angular de muones que llegan a la superficie terrestre utilizando el telescopio de muones compuesto por centelladores de plástico leídos por detectores fotomultiplicadores de silicio (SiPM). Se verificó que la energía depositada por el muón sigue con la curva propuesta por Landau para partículas cargadas. Los resultados se compararon con los obtenidos por el experimento GRAPES-3 en India, dando un resultado 2 veces mayor para Asunción, resultado que se atribuye al efecto de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur.

Palabras clave: SiPM, flujo de muones, rayos cósmicos, Anomalía Magnética del Atlántico Sur (SAMA).

Abstract: In this work we show the measurements of the muon flux and its angular distributions made with a muon telescope composed of plastic scintillators read by silicon photomultiplier detectors (SiPM). We also verified that the energy deposited by muons agrees with the curve proposed by Landau for charged particles. Finally, we compare the results with the measurements made with the experiment GRAPES-3, and find that the flux in Asuncion is around 2 times higher due to the effects of the South Atlantic Magnetic Anomaly.

Keywords: SiPM, muon flux, cosmic rays, South Atlantic Magnetic Anomaly (SAMA).

Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo Licencia Creative Commons.

1. INTRODUCCIÓN

Los rayos cósmicos son partículas que golpean la atmósfera de la tierra con un flujo de aproximadamente 1000 partículas por metro cuadrado por segundo y se denominan rayos cósmicos primarios (1). Los rayos cósmicos cuando llegan a la atmósfera tienen una probabilidad de chocar con alguna de las moléculas del aire (2) ocasionando la emisión de partículas secundarias, que a su vez reaccionan sucesivamente con otras partículas, o decaen por sí solas formando la denominada cascada o lluvia atmosférica extensa como se muestra en la Figura 1 (3).

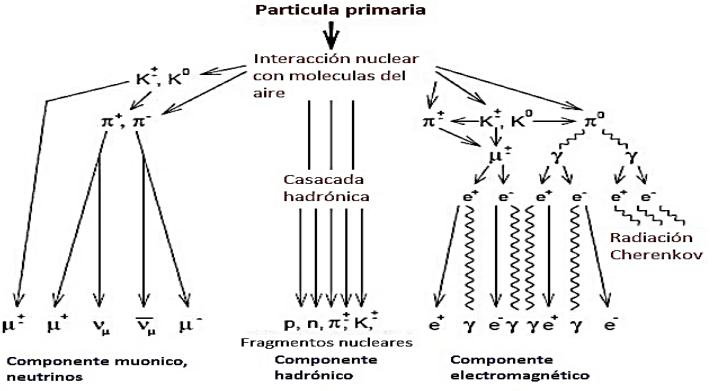

Figura 1: Representación de la cascada o lluvia atmosférica extensa de las partículas producidas en la atmósfera (4).

Las interacciones iniciales de los rayos cósmicos primarios en la atmósfera producen grandes cantidades de partículas como piones (π^+, π^0, π^-), neutrones, positrones, kaones (k^+, k^0, k^-), rayos gamma, entre otras. Los piones neutros π^0 decaen en rayos gamma generando la lluvia electromagnética de electrones y radiación gamma, en tanto que los piones cargados decaen en muones y neutrinos el 100% (5, 6). Los kaones decaen en muones y neutrinos el 63.5% de las veces:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}\nu^{-} \ (\sim 100\%)$$

$$k^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm}\nu^{-} \ (\sim 63.5\ \%)$$

1.1. Muones

Los muones producidos a través de estos canales poseen suficiente energía para alcanzar la superficie terrestre e incluso penetrar en la mayoría de los

casos. Los muones poseen masa en reposo de 105,658 MeV/c^2, tienen vida media de 2,2 μs y llegan con energías de alrededor de 4 GeV al nivel del mar (7).

Desde el origen de los muones en la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, ellos pueden decaer espontáneamente por interacción débil mediante los siguientes procesos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \nu_e{}^-$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_\mu + \nu_e$$

Las mediciones en tierra del flujo de muones dependen del ángulo cenital, en donde la relación es descrita mediante la ecuación [1]:

$$I(\theta, h, E) = I_o cos^{n(E,h)}(\theta) \quad [1]$$

al nivel del mar, los experimentos muestran que n ≈ 2 y por lo tanto queda la siguiente relación.

$$I(\theta) = I_o cos^2(\theta) \quad [2]$$

es de notar que el flujo medido depende con el coseno cuadrado del ángulo azimutal.

2. INSTRUMENTACIÓN

Los detectores utilizados para el montaje del telescopio de muones fueron centelladores de plásticos de dimensiones de 28 x 10 cm que son leídos a través de detectores fotomultiplicadores (SiPM) adheridos en las esquinas, como se muestra en la figura 2. La abertura del telescopio para calcular el flujo de muones y la distribución angular se utilizó cómo se explica en la referencia (8), ya que los detectores son acordes para utilizar dicho método.

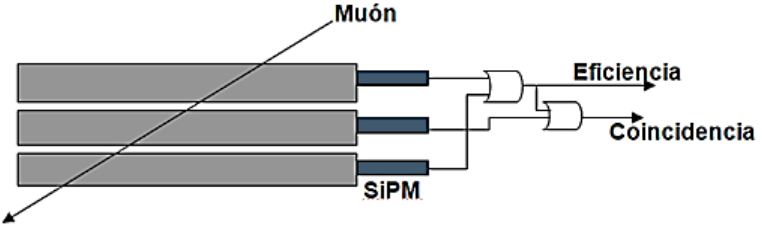

Figura 2: Esquema de detección del muón.
Fuente: Elaboración propia.

La electrónica asociada al telescopio de muones consiste en una placa construida en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería (ver Figura 3). Estas placas son las encargadas en extraer y procesar la información proporcionada por los SiPM, además de dar la tensión de trabajo a los SiPM y detectar las coincidencias temporales entre las señales de los tres detectores (9).

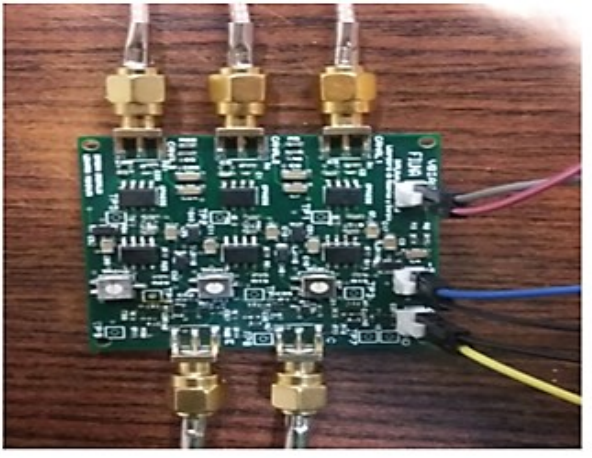

Figura 3: Placa electrónica utilizada para las lecturas de los SiPM.
Fuente: Elaboración Propia.

Para este trabajo se siguió el siguiente diagrama de bloques para la adquisición de datos (Figura 4).

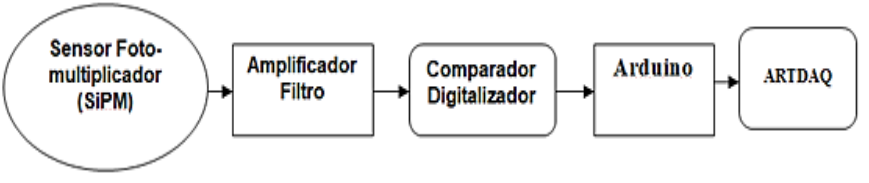

Figura 4: Esquema del sistema de medición de muones
Fuente: Elaboración Propia.

El hardware de adquisición de datos fue el módulo Arduino, en donde se implementaron las siguientes funcionalidades (9):

- Conteo de pulsos en los canales de coincidencia y eficiencia.
- Generación de trigger de eventos para ser guardados por el sistema de adquisición de datos.

Para el sistema de adquisición de datos se utilizó el programa *artDAQ*, que es una herramienta de manejo de datos creado en el laboratorio de Fermilab. Para este trabajo se implementaron las siguientes funcionalidades en este entorno (10):

- Transición de la máquina de estado del DAQ (start, stop, etc).
- Transporte, filtrado y ensamble de fragmentos de datos producidos por el DAQ.
- Un entorno art, que es un marco de procesamiento de eventos que permite la conexión y ejecución de los módulos de procesamiento de datos del experimento.

Para realizar la distribución angular se utilizó un soporte de cabeza móvil que permite la variación del ángulo de detección entre los detectores.

Figura 5: Soporte con cabeza móvil que permite la variación de la altura de los detectores.
Fuente: Elaboración propia.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las mediciones fueron obtenidos en el Laboratorio de Mecánica y Energía de la Facultad de Ingeniería de la UNA, la cual está localizada a 136 m de altitud y con coordenadas geográficas: 25° S,

57° O. Está en el centro de la región denominada la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, donde los valores del campo magnético medidos por satélites indican que los valores son mucho menores que en el hemisferio norte, y que en otras longitudes del hemisferio sur. La Figura 6 muestra la ubicación geográfica de la anomalía, donde se pueden observar los valores del campo geomagnético.

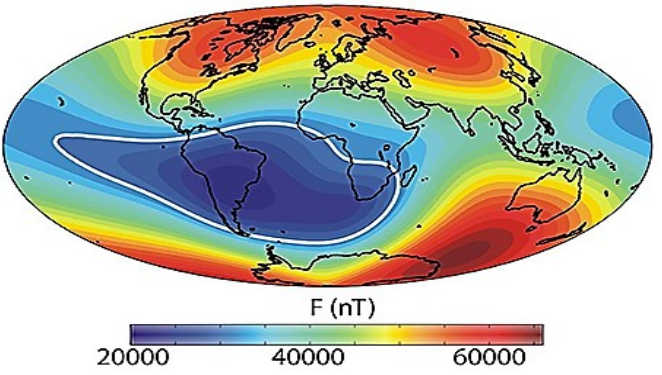

Figura 6: Mapa de intensidad del campo geomagnético (11).

3.1. Medición del flujo de muones

El procedimiento para la obtención del flujo de muones fue la de variar la distancia entre los detectores, y aplicar las ecuaciones propuestas en (8), las cuales son las siguientes:

$$\frac{dN}{dt} = I_0 A_b \qquad [3]$$

La cual indica la tasa de muones en función de la abertura y el flujo de muones, en donde realizando el despeje correspondiente de los términos obtenemos la fórmula para el cálculo del flujo.

$$I_o = \frac{dN}{dt\ A_b}$$

$$I_o = \frac{N}{\Delta t\ A_b} \qquad [4]$$

$\frac{N}{\Delta t}$ es la tasa de conteo y A_b es la abertura del detector de muones, es decir, es la región espacial en donde las partículas incidentes (muones) consiguen atravesar los detectores en todas las direcciones posibles, en donde ella depende de la geometría y la distancia de separación entre los detectores. Para un telescopio de muones con simetría rectangular utilizando tres detectores idénticos de dimensiones X e Y, y separadas por una altura Z, la abertura es expresado matemáticamente de la siguiente manera:

$$A_b = \frac{1}{2}\left\{\left(R_y^2 + Y^2\right)\frac{X}{R_y}arctg\left(\frac{X}{R_y}\right) + \left(R_x^2 + X^2\right)\frac{Y}{R_x}arctg\left(\frac{Y}{R_x}\right) - Z\left[X\,arctg\left(\frac{X}{Z}\right) + Y\,arctg\left(\frac{Y}{Z}\right)\right]\right\} \quad [5]$$

donde $R_x^2 = Z^2 + Y^2$ e $R_y^2 = Y^2 + Z^2$.

Para la tasa de muones en función de la distancia de separación se obtuvieron los puntos representados en gráfica de la Figura 7 con sus respectivos errores estadísticos, para lo cual se observa que cuando la separación es mínima entre los detectores la tasa de conteo es mayor, pero a medida que la separación va en aumento, la tasa de conteo va disminuyendo, puede observarse que la curva que más se ajusta es una exponencial negativa como era de esperarse.

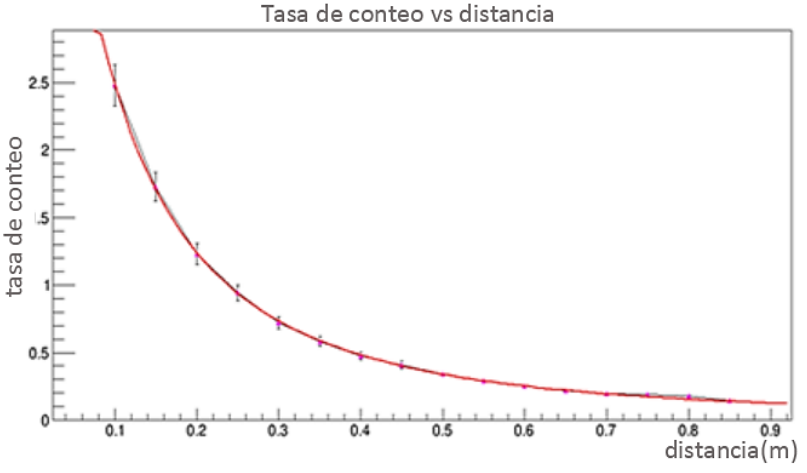

Figura 7: Comportamiento del conteo de muones en función de la distancia entre los detectores.
Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del flujo de muones se utilizó la ecuación (4), en la cual para cada A_b le correspondía una sola altura Z, en donde se halló el promedio de la tasa de conteo para cada altura durante dos días cada uno, y se obtuvo un valor promedio del flujo de muones en el Paraguay de $130{,}01 \pm 2.66\ \frac{muones}{m^2.s.sr}$

3.2. Distribución angular

Para la distribución angular se utilizó el soporte mostrado en la figura 5, donde se midieron la cantidad de muones que llegaban al variar los ángulos de 5 en 5 grados, desde 0° hasta 60°. La Figura 8 muestra los valores medidos para cada ángulo, y se asegura que la curva que mejor se ajusta a los datos es del $cos^2(\theta)$ como se esperaba.

Los datos obtenidos para cada ángulo fueron tomados por tres días manteniendo la distancia entre los detectores a 85 cm, y el error obtenido para cada medición es el error efectivo que consta del error estadístico y el error sistemático, es decir:

$$\bar{x} \pm \bar{\sigma}_x = \bar{x} \pm \sqrt{\sigma_{est}^2 + \sigma_{sist}^2}$$

$$\bar{x} \pm \bar{\sigma}_x = \bar{x} \pm \sqrt{\sigma_{ap}^2 + \sigma_{def}^2 + \sigma_{int}^2 + \sigma_{exac}^2}$$

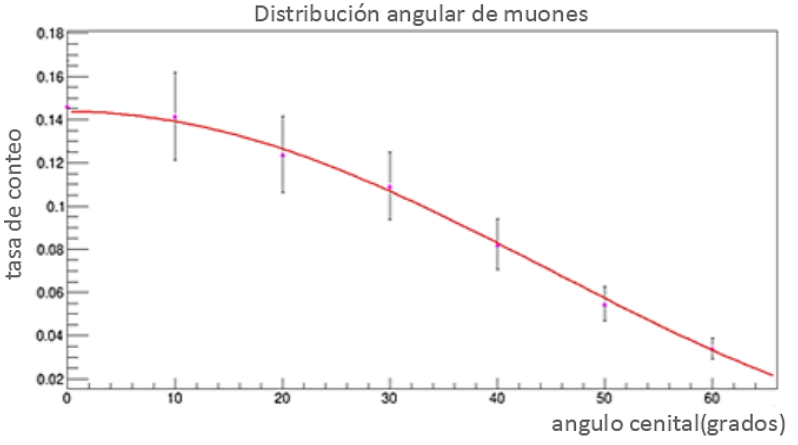

Figura 8: Distribución angular de muones.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Energía depositada por los muones

También se estudiaron los eventos registrados en cada detector cuando llegaron en coincidencia con los otros dos, formando la coincidencia de las tres placas que denotan a un muón. Los eventos fueron estudiados en función de la energía por unidad de corriente para dos ángulos distintos: 0° y 60° como se muestran en las Figuras 9 y 10. Puede observarse que la curva que mejor ajusta a ambas mediciones está de acuerdo con la descripción de Landau para partículas cargadas en detectores delgados (12).

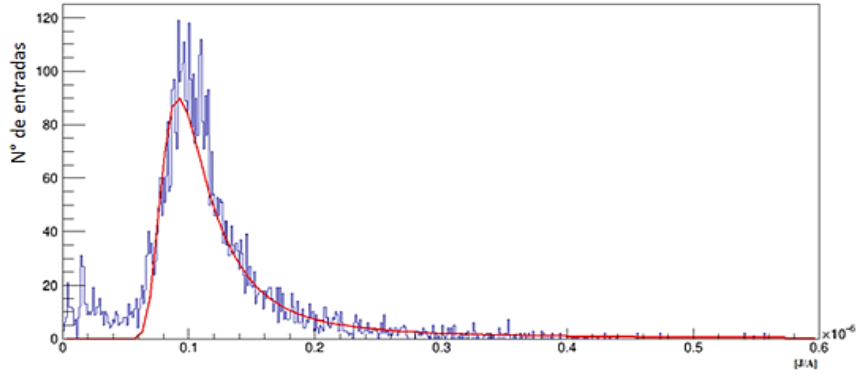

Figura 9: Datos obtenidos de energía por unidad de corriente a 0° para el canal 1, del día 12 de diciembre del 2018.
Fuente: Elaboración propia

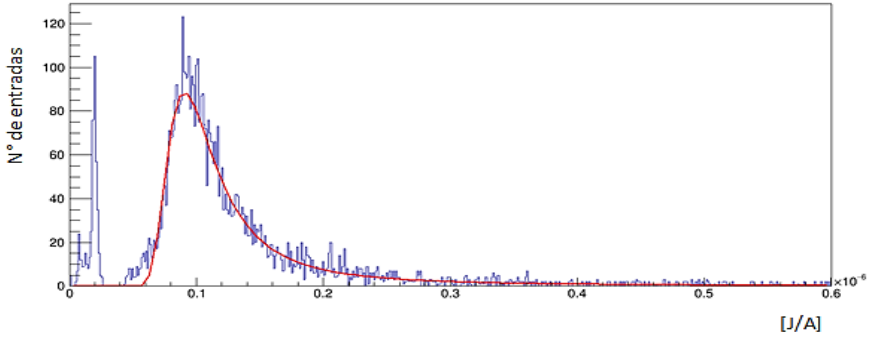

Figura 10: Datos obtenidos de energía por unidad de corriente a 60° para el canal 2, del día 15 de diciembre del 2018.
Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIÓN

En el Paraguay se realizó la primera medición del flujo y la distribución angular de muones utilizando detectores de plástico centelladores leídos con detectores fotomultiplicadores de silicio (SiPM). Los resultados muestran que la distribución angular de muones sigue con la ley del coseno cuadrado, y también se demostraron que los valores de energía depositados por los muones en los detectores delgados cumplen con la curva propuesta por Landau.

El valor medido del flujo vertical, fue de $I_0 = 130.01 \pm 2.66 \frac{muones}{m^2.s.sr}$, que es comparable con el trabajo realizado en la Universidad de Campinas (8), donde se obtuvo el valor de $I_0 = 141 \pm 1 \frac{muones}{m^2.s.sr}$. La discrepancia entre ambos valores puede ser explicado por la altura donde se hicieron esas mediciones para lo cuál la Universidad de Campinas se encuentra a 680 m y Facultad de Ingenieria a 136 m de altitud, ya que a mayor altitud se espera un flujo mayor (13).

Se puede notar que tanto Paraguay como Campinas están localizados dentro de la llamada "Anomalía Magnética del Atlántico Sur" (ver Figura 6), en esta zona el campo magnético de la tierra es casi la mitad que, en el hemisferio norte, por lo que se espera que haya un mayor flujo de partículas cargadas que lleguen a la superficie terrestre. Esto se corroboró con las mediciones hechas en el experimento GRAPES-3 localizado en India (14), donde se obtuvo un valor de $I_0 = 70 \frac{muones}{m^2.s.sr}$, lo cual representa aproximadamente la mitad de los eventos medidos en nuestro laboratorio y en Campinas. Este valor puede explicarse por el hecho de que el flujo de partículas cargadas es mucho menor cuando el campo magnético es mayor debido al desvío que sufren las partículas cargadas en sus trayectorias (13).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gaisser TKP. Cosmics Rays and Particle Physics. Cambridge, New York: Bartol Research Institute, University of Delaware. 1990.
2. Oda YJ. Sistemas de detección de partículas basados en fotomultiplicadores con matriz de silicio, con aplicaciones a muongrafías de volcanes. Instituto Balseiro, 2016.
3. Fuksman D, Melon J. Caracterización de un sistema de detectores de centelleo y utilización del mismo en el estudio del flujo de rayos cósmicos secundarios. Física Experimental IV, Instituto Balseiro, Laboratorio de Detección de Partículas y Radiación, Centro Atómico Bariloche, 2014.

4. Gregorio JI. Estudio de los efectos producidos por muones de clipping corner y electrones de knock-on en el sesgo de conteo del detector de muones del proyecto AMIGA [Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas], Buenos Aires: UBA, 2017.
5. Shteinbuk IJ. Measuring the Angular Distribution of Muons, 2011. Disponible en: http: //www.s.u−tokyo.ac.jp/en/utrip/archive/2011/pdf/17Inna.pdf
6. Cecchini S, Spurio MJ. Atmospheric muons: experimental aspects, Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna, Italia, 2005.
7. Blanchard JJ. A Measurement of the Angular Distribution of Cosmic Muons: Research Project Final Report. McGill University, 2012.
8. Fauth AC, Penereiro JC, Kemp E, Grizolli WC, Consalter DM, González EFG. Experimental demonstration of time dilatation and space contraction of cosmic rays muons. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2007.
9. Cristaldo E, Yoshimura LJ. Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos para sensores fotomultiplicadores de silicio del experimento Dune. San Lorenzo, Paraguay: UNA, 2018.
10. Augusto C, Navia C, De Oliveira MN, Fauth AC, Nepomuceno A. Signals at ground level of relativistic solar particles associated with a radiation storm on 2014. Public. Astron. Soc. Japan. 2016.
11. Carrasco FJ, De Santis A. The South Atlantic Anomaly: The key for a possible geomagnetic reversal, 2006. Disponible en: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2016.00040/full
12. Marucho M, Garcia CA, Fanchiotti H. The Landau Distribution for Charged particles traversing thin films, 2006.
13. Cecchini S, Sioli M., Cosmic ray muon physics, 1990, Disponible en: https://cds.cern.ch/record/427778/files/0002052.pdf
14. Arunbabu KP, Ahmad S, Chandra S, Dugad SR, Gupta SK, Hariharan B, Hayashi Y, Jagadeesan P, Jain A, Jhansi VB, Kawakami S, Kojima H, Mohanty PK, Morris SD, Nayak PK, Oshima A, Rao BS, Reddy LV, Shibata S, Tanaka K, Zuberi M. Atmospheric temperature dependence of muon intensity measured by the grapes3experiment, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/318674271_atmospheric_temperature_dependence_of_muon_intensity_measured_by_the_grapes-3_experiment