

Sombra de la Luna

Daniel González Velázquez
Antonio Carlos Samaniego Flores

Posgrado en Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México,
04510, CDMX

17 de noviembre de 2021

Resumen

In this work, we present a simple analysis of the moon shadow map constructed from data measured by HAWC over a period of 31 months. We used HAWC pre-processed data in which specific quality cuts have been applied to improve the analysis.

1. Introducción

1.1. El observatorio y sus dominios

HAWC (por sus siglas en inglés, High Altitude Water Cherenkov Experiment) es un observatorio de rayos cósmicos ubicado en el volcán de Sierra Negra, Puebla México. Tiene la capacidad de detectar rayos gamma con energías en el rango de los TeV, cubriendo hasta dos tercios de la bóveda celeste. Cuenta con 300 detectores principales de radiación Cherenkov, cuya disposición y competencia tecnológica permiten discernir la composición de las cascadas atmosféricas que inciden en la atmósfera terrestre. Este observatorio comenzó a operar en su totalidad durante la primera mitad del 2015, y desde entonces ha permitido el desarrollo de importantes investigaciones como son el estudio de la Nebulosa del Cangrejo, las primeras búsquedas de materia oscura y los estudios de las galaxias Markarian 421 y 501, por nombrar algunas [1]. Los rayos gamma consisten meramente de fotones de alta energía (mayores a 100 KeV). Por otro lado, los rayos cósmicos están constituidos por partículas cargadas que viajan grandes distancias hasta impactar con la atmósfera terrestre. Estas pueden llegar a tener energías de alrededor de 10^{20} eV [2], i.e., millones de veces mayores a las podemos producir en grandes colisionadores [3].

La mayoría de los rayos cósmicos —aproximadamente 9 de cada 10— están constituidos por protones, mientras que en menor proporción se tiene la presencia de núcleos de Helio y núcleos más pesados. Al poseer carga eléctrica, estos objetos de origen astrofísico son sensibles a la presencia de campos magnéticos (en particular el terrestre); de hecho, es extremadamente complicado conocer la fuente de cualquier rayo cósmico debido a su errático trayecto a través del cosmos.

Ya que en la atmósfera se encuentran átomos y partículas de distinta naturaleza, la incidencia de partículas energéticas suele producir cascadas atmosféricas a una altura aproximada de 10 a 12 km sobre el nivel del mar [4]. A la partícula que origina la cascada se le conoce como rayo cósmico primario, y a todas las partículas resultantes de interacciones con la atmósfera se les conoce como partículas secundarias. Las características de las cascadas atmosféricas dependen del rayo cósmico

primario y, en general, se identifican de dos tipos: cascadas electromagnéticas y cascadas hadrónicas. En el primer tipo se suelen producir fotones, electrones y positrones. Los dos últimos, por efecto de la radiación de frenado, pueden emitir fotones que nuevamente dan lugar a pares de electrón-positrón. El camino libre medio de las partículas involucradas en cascadas electromagnéticas no es de gran magnitud, por lo que éstas suelen tener la posición de su núcleo muy bien definida. En contraste, las cascadas hadrónicas involucran procesos de creación y aniquilación de partículas mucho más complejos y extendidos, por lo que su estructura es más amplia que la de las cascadas electromagnéticas. Entre las partículas secundarias que se originan en cascadas hadrónicas destacan los piones cargados que decaen en muones y piones neutros que a su vez decaen en un par de fotones [5].

1.2. Detección de eventos y su clasificación

Tras innumerables decaimientos, aniquilaciones, creaciones e interacciones, llegan a toda la superficie terrestre, y en particular a las cercanías del volcán de Sierra Negra, un gran número de partículas. Cuando la velocidad de una partícula en un medio es mayor que la velocidad de la luz en dicho medio (situación inconcebible en el vacío), se produce la denominada radiación de Cherenkov. En el caso de los detectores de HAWC el medio es agua simple, y la radiación producida es luego detectada por los fotomultiplicadores (PMTs) que se encuentran dentro de los 300 tanques que componen el observatorio. Esto permite registrar el tiempo en que se activa el PMT y la carga depositada en el mismo.

Un rayo cósmico muy energético genera un gran número de hits (incidencias sobre PMTs). Para asegurarnos de estudiar únicamente cascadas atmosféricas, se implementa un filtro (trigger) que sólo considera eventos con 28 o más hits dentro de una ventana de 150 ns. Posteriormente se reconstruye la cascada, lo que da información de la partícula primaria para así discernir entre cascadas electromagnéticas y hadrónicas, identificar la dirección de incidencia y la energía del rayo primario y determinar la posición del núcleo de la cascada. Para una descripción de los recursos materiales y métodos para la reconstrucción se recomienda consultar [6, 7].

En particular, hay dos cantidades importantes en la clasificación de cascadas: compactness y PINCness. La primera se define como el número de PMTs activados sobre la carga de mayor magnitud registrada a más de 40 m del núcleo. Siguiendo la línea a la discusión de párrafos previos, es claro que las cascadas hadrónicas tendrán un valor grande para la variable compactness, dado que son más amplias que las cascadas electromagnéticas. Por su parte, PINCness determina la suavidad de la distribución de carga, lo cual permite identificar fluctuaciones dentro de cierta distancia radial del núcleo. En cascadas electromagnéticas, que tienden a ser simétricas, las fluctuaciones son en general pequeñas (PINCness baja); en contraste, las cascadas hadrónicas no muestran una gran simetría, en vista de que las fluctuaciones son de mayor magnitud (PINCness alta). En consecuencia, la diferencia entre valores de ambas variables es relevante en la determinación de la naturaleza del rayo primario [8].

1.3. Reconstrucción de cascadas y creación de mapas

Es evidente que, antes de cualquier medición, el dispositivo debe calibrarse. Para tal propósito, se simula la propagación de cascadas atmosféricas utilizando el software CORSIKA (por sus siglas en inglés, COsmic Ray SIMulations for KAscade), con el fin evaluar el comportamiento del arreglo en diversas situaciones (partiendo del rayo primario y culminando en la llegada de las partículas secundarias a las inmediaciones del observatorio). A su vez, las características de la interacción de partículas con los detectores Cherenkov (léase, las cualidades físicas de las partículas en un

medio acuoso) son simuladas por el software GEANT4. Tras la calibración, se separan los eventos fidedignos de aquellos producidos por ruido. Una primera valoración del tamaño de la cascada es el número de hits detectados [5]. Para estimar el núcleo de la cascada (i.e., su posición sobre la superficie de incidencia) se establece la región donde la carga detectada es mayor. Para ello se ajusta una función con una componente gaussiana y una de tipo NKG, que converge rápidamente y por tal motivo se denomina Super Fast Core Fitter [5].

En una aproximación razonable, se asume que la velocidad de las partículas que llegan a la superficie es muy cercana a la de la luz y se determina el tiempo en que se activa cada PMT. Posteriormente, se ajusta un frente de cascada a la distribución de tiempos de incidencia, corrigiendo el retraso de las partículas externas al núcleo de la cascada. Finalmente, mediante la información del frente de onda y el núcleo de la cascada, se determina la dirección de incidencia del rayo cósmico primario. Completando el esquema predictivo, la energía de los rayos cósmicos primarios puede estimarse empleando distintos métodos, entre los cuales se encuentran una simple relación de proporcionalidad con el número de hits (estimador sencillo), el uso de inteligencia artificial (estimador de redes neuronales), y ajustes de verosimilitud (estimador de energía de protones; aplicable cuando las cascadas son producidas por este tipo de partículas hadrónicas).

La información recabada mediante estos procedimientos estadísticos y computacionales se almacena en archivos de extensión .xcd, altamente comprimidos. A estas alturas del proceso se cuenta con datos que ya posibilitan una interpretación visual, obtenida mediante una rutina de la paquetería de AERIE [5], que además permite efectuar cortes o filtros para restringir las cascadas con las que se crean los mapas celestes. Dichos mapas pueden plasmarse en coordenadas locales (tal como las ve un observador en la Tierra, con el horizonte a una altitud de 0°), coordenadas ecuatoriales (que son la declinación, o distancia angular del ecuador al punto en cuestión, y la ascensión recta, que corresponde la posición en el ecuador), o coordenadas lunares (relacionadas con las coordenadas ecuatoriales mediante una traslación que posiciona a la Luna en el origen).

2. Estructura de los datos

Los datos con los que se trabaja en este estudio consisten en mapas realizados con distintos estimadores de energía y cortes de calidad. Cada conjunto de datos está dividido en 10 bins de energía, tal y como se muestra en la Tabla 1. Todos los mapas se encuentran en coordenadas lunares, con columnas que contienen información de declinación, ascensión recta y significancia, en ese orden leyendo de izquierda a derecha. El procedimiento de recolección, selección de datos y estimación de

Bin	Energía (TeV)
0	0.1-1.58
1	1.58-2.51
2	2.51-3.98
3	3.98-6.30
4	6.30-10.0
5	10.0-15.85
6	15.85-25.11
7	25.11-39.81
8	39.81-63.09
9	63.09-100.0

Cuadro 1: Bines de energía.

energía es el mismo que se expuso en la introducción, salvo que contamos con datos almacenados en archivos de extensión .dat que posteriormente se analizan con ROOT. Esta herramienta, además de ser muy útil para la realización de análisis estadísticos y procesamiento de grandes cantidades de datos, cuenta con paqueterías predefinidas para crear gráficas e histogramas.

Originalmente, los mapas se crearon usando el software HEALPix, generando la información correspondiente a la significancia con un número que indexa cada píxel y que debe luego transformarse a coordenadas celestes. En nuestro caso, se usó el parámetro $N_{side} = 256$, que establece el número de píxeles con los que se realiza el mapa mediante $N_{pix} = 12 \times N_{side}^2$, dando un total de 786432 píxeles en cada mapa [5].

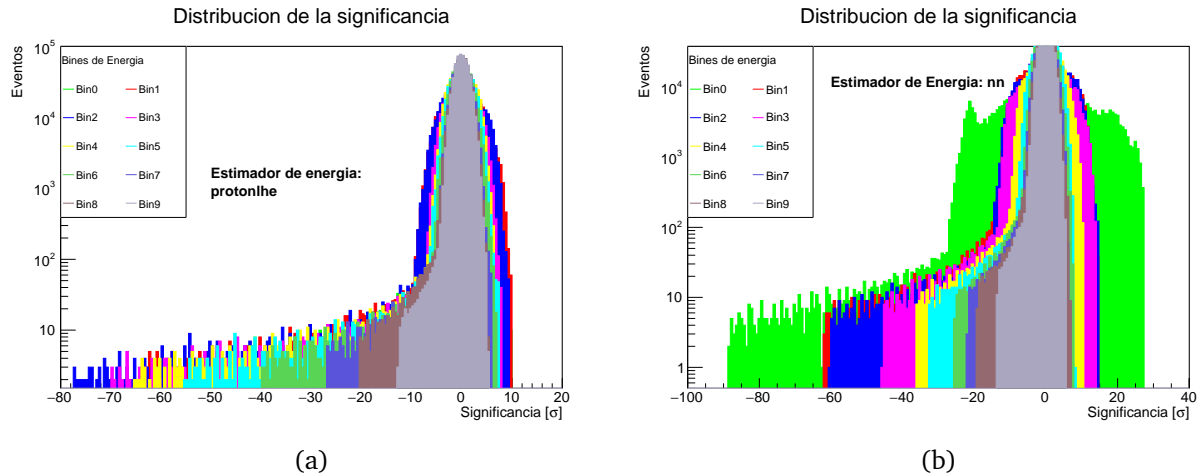
3. Resultados y análisis

A partir de los mapas creados con el estimador de energía *protonlhe* sin cortes se realizó un histograma de la significancia para cada bin de energía (Fig. 1 (a)) con ayuda del macro *punto2.C*. En él se observa claramente que el bin 2 posee la significancia más baja, correspondiente a -78.02σ con coordenadas $(\alpha, \delta) = (-0.91^\circ, -0.15^\circ)$, que se encontraron con el macro *puntos3y4.C*. En este estimador, se obtiene un valor de verosimilitud para cada PMT dada una cascada con ángulo zenital y posición del núcleo reconstruidos. En cada bin de energía simulado, se suman los valores de la verosimilitud para todos los PMTs. La mejor estimación de energía corresponde al bin con la mayor verosimilitud [9].

Se realizó este mismo procedimiento para los mapas del estimador de energía *nn* (Fig. 1 (b)) con ayuda del macro *punto4a.C*. Se puede apreciar que en este caso es el bin 0 el que posee la significancia más baja, siendo ésta de -88.31σ . Las coordenadas correspondientes son $(\alpha, \delta) = (-1.61^\circ, -0.15^\circ)$. Este estimador está basado en inteligencia artificial, y “aprende” a hacer predicciones tras obtener información de un gran número de simulaciones con distintos parámetros que pueden ajustarse individualmente.

Para ambos estimadores, la razón de que la significancia más baja se encuentre en la región de menor energía es que las cascadas son más pequeñas, lo que implica una menor cantidad de datos. Por su parte, los rangos de energía abarcados por los bins 0 y 1 del estimador *protonlhe* tienen problemas de reconstrucción, lo que explica que el bin 2 sea el de menor significancia.

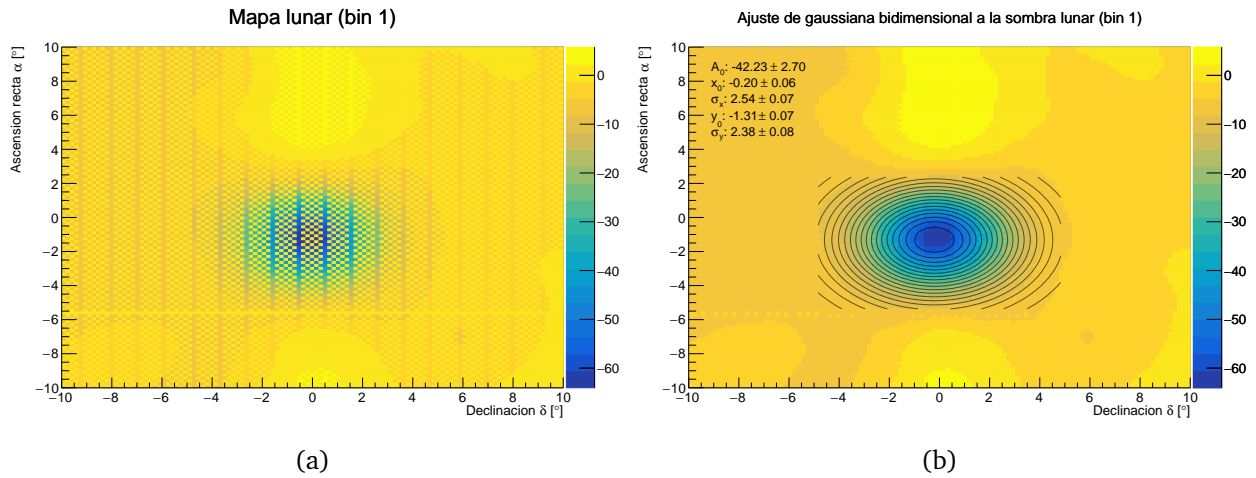
Figura 1: (a) Histograma de significancia para el estimador *protonlhe*. (b) Histograma de significancia para el estimador *nn*.



Empleando en macro *puntos5y6.C*, se graficaron mapas de la Luna para el bin 1 con el estimador de energía *protonlhe* en los rangos $\alpha \in [-10^\circ, 10^\circ]$ y $\delta \in [-10^\circ, 10^\circ]$. Se dividió cada eje en 115 bins para minimizar el numero de bins vacíos (Fig. 2 (a)). Mediante este mismo macro, se realizó un proceso de suavizado, que consiste en asignar a los bins vacíos el promedio del contenido de los bins adyacentes. Posteriormente, como se muestra en la Fig. 2 (b), se ajustó una distribución gaussiana a la sombra de la Luna implementando la función

$$S(x, y) = A_0 e^{-\left(\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right)}. \quad (1)$$

Figura 2: (a) Mapa de la Luna para el bin 1 con el estimador de energía *protonlhe*. (b) Mapa suavizado con ajuste de gaussiana bidimensional para el bin 1 con el estimador de energía *protonlhe* (ver macro *punto7.C* para más detalles).



Finalmente, en la Fig. A.1 del Apéndice se muestran mapas de la Luna para todos los bins de energía con el estimador *protonlhe_charge*, que se ajustaron con la función gaussiana de la Eq. (1) (ver script *punto8.sh*). Se observa que la sombra en los bins de bajas energías sufre un desplazamiento en el eje de la ascensión recta, que tiende a disminuir a energías altas. Esto se debe a que los protones de bajas energías son deflectados con mayor facilidad por el campo geomagnético. En consonancia con el histograma de la Fig. 1 (a), que corresponde al mismo estimador de energía, el bin 2 alcanza el mayor déficit de significancia.

4. Conclusiones

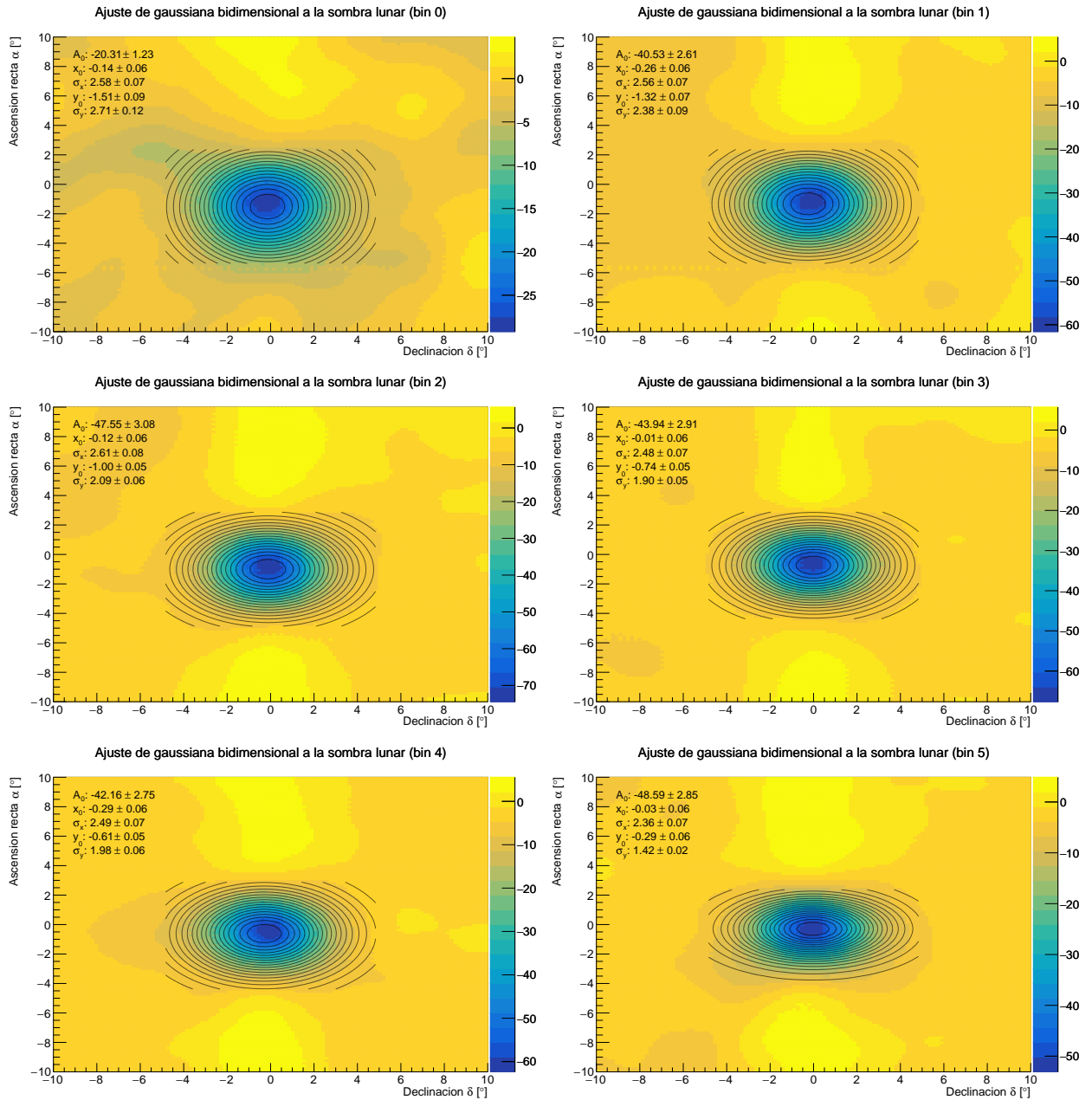
En los mapas obtenidos con el estimador *protonlhe_charge* (Apéndice A), se puede apreciar que el tamaño de la sombra varía dependiendo el bin de energía que corresponde a cada mapa, dando como resultado una sombra más pequeña en la región de altas energías. Justamente esto lo que se busca para poder aproximarnos al tamaño real de la Luna y mejorar el ajuste gaussiano.

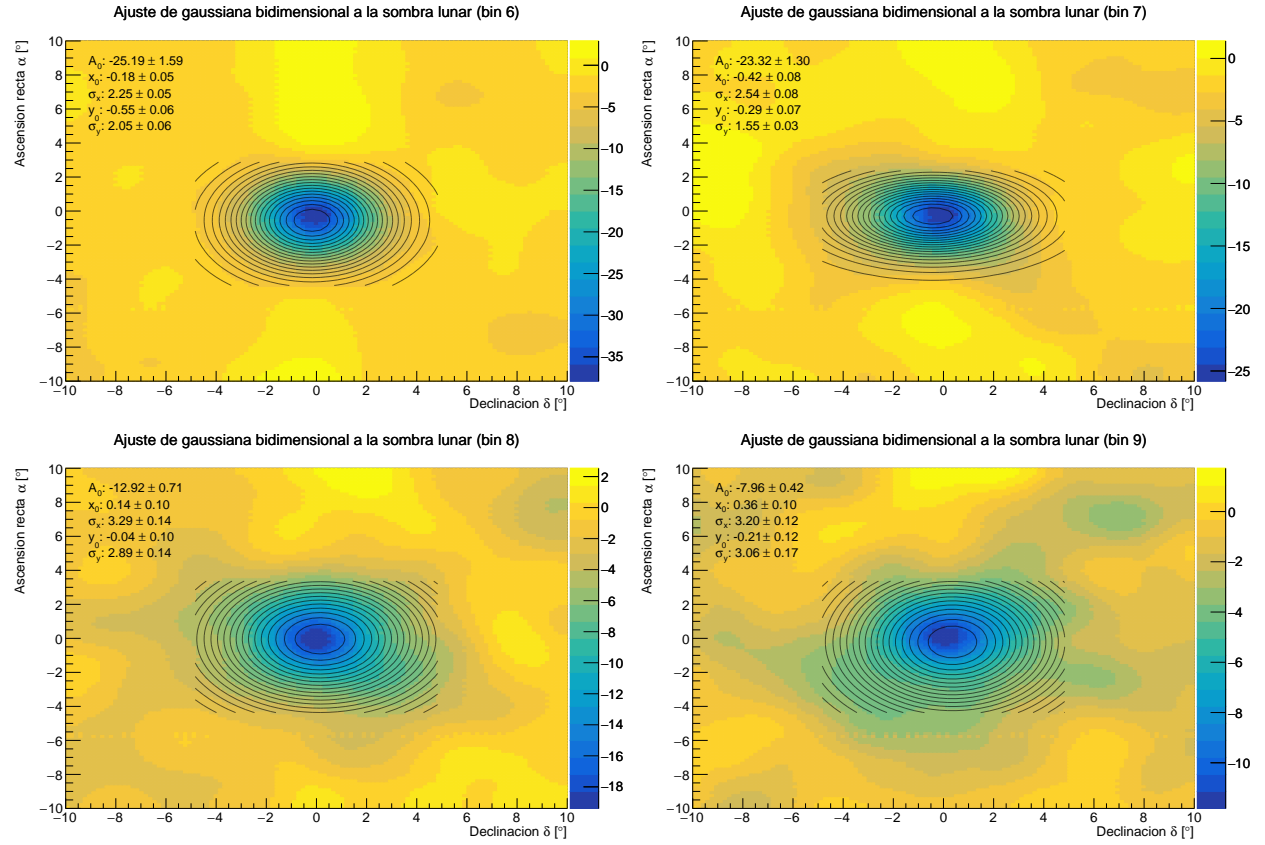
Nótese que, como es de esperarse, el mayor déficit de significancia fue alcanzado en los mapas sin cortes (ver *Resultados y análisis*). Esto se verificó para los estimadores *protonlhe* y *nn*. En el mismo sentido, al aplicar cortes se obtienen mapas que presentan una ligera variación y en algunos casos disminución en el ancho de la sombra. En el presente trabajo, esto sólo se verificó para el estimador *protonlhe_charge*.

Debido a estos resultados, si se busca hacer estudios de la composición de rayos cósmicos secundarios en cascadas atmosféricas usando la influencia de objetos astrofísicos (como lo es la Luna) para estimar algún parámetro es conveniente tomar datos de eventos muy energéticos filtrados con cortes de calidad.

A. Apéndice

Figura A.1: Mapas de la Luna para todos los bins de energía con el estimador *protonlhe_charge*. Los parámetros del ajuste de una gaussiana bidimensional (Eq. (1)) se muestran, en cada caso, en la esquina superior izquierda.





Referencias

- [1] HAWC Collaboration, *La Red Hawc*. [En línea]. URL: <https://www.hawc-observatory.org/support/redhawc.php>
- [2] S. BenZvi, *Measuring TeV cosmic rays at the High Altitude Water Cherenkov Observatory*, EPJ Web of Conferences, vol. 105, p. 01003 (2015).
- [3] LHC. *Taking a closer look at LHC*. [En línea]. URL: https://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.energy
- [4] R. Engel, D. Heck, & T. Pierog, *Extensive air showers and hadronic interactions at high energy*, Annual Review of Nuclear and Particle Science, vol. 61, no. 1, pp. 467–489 (2011).
- [5] D. García Aguilar, *Medición del cociente protón - anti protón a energías de TeV con HAWC*, Programa de Posgrado en Astrofísica (2021).
- [6] A. U. Abeysekara et al. (HAWC Collaboration), *Observation of the Crab Nebula with the HAWC Gamma-Ray Observatory*, Astro-phys. J. 843, 39 (2017).
- [7] A. U. Abeysekara et al. (HAWC Collaboration), *The HAWC Gamma-Ray Observatory: Sensitivity to Steady and Transient Sources of Gamma Rays*, Braz. J. Phys. 44 (2014).
- [8] M. J. Gerhardt, *Gamma/Hadron Separation for the HAWC Observatory*, Michigan Technological University (2017).
- [9] A. U. Abeysekara et al. (HAWC Collaboration), *Constraining the \bar{p}/p Ratio in TeV Cosmic Rays with Observations of the Moon Shadow by HAWC*, Phys. Rev. D 97, 102005 (2018).