

# Capítulo 1

## Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de la componente muónica de la distribución lateral de cascadas atmosféricas a partir de simulaciones con AIRES. Se realiza un ajuste de la distribución lateral de muones a una función de tipo NKG modificada, y se grafican los parámetros del ajuste en función de la energía primaria. Se comparan los parámetros obtenidos como resultado de distintas partículas primarias, diferentes modelos de interacciones hadrónicas y distintos ángulos de incidencia. También se calcula un aproximado de la cantidad de muones de cascadas atmosféricas que podrían observarse en HAWC.

### 1.1. Distribución lateral de muones

La distribución lateral de muones  $\rho_\mu(r)$  contiene información sobre la energía primaria  $E_0$ , la masa primaria  $A$ , el ángulo zenital  $\theta$  y la edad de la cascada [1]. Se simularon cascadas atmosféricas con  $12 < \log(E_0/\text{eV}) < 14$ ,  $A = 1$  (protones),  $A = 56$  (núcleos de hierro) y  $0^\circ < \theta \leq 45^\circ$ ; limitando el estudio a eventos cuyos muones puedan ser detectados por el observatorio HAWC. De acuerdo a la condición necesaria para que los muones produzcan radiación Cherenkov en el agua

$$\beta_\mu > \frac{1}{n_{\text{agua}}}, \quad (1.1)$$

donde  $\beta_\mu = v_\mu/c$  es la velocidad del muón relativa a la rapidez de la luz y  $n_{\text{agua}}$  es el índice de refracción del agua, la energía umbral para que los muones puedan detectarse en HAWC es  $E_{th} \approx 159,80$  MeV, por lo que se han filtrado los resultados de las simulaciones tomando en cuenta solamente muones con energías  $E_\mu > E_{th}$ .

En la Figura 1.1 se presentan las distribuciones laterales obtenidas para tres energías primarias:  $10^{12}$ ,  $10^{13}$  y  $10^{14}$  eV. Las cascadas fueron iniciadas por protones y núcleos de hierro con un ángulo zenital de incidencia  $\theta$  entre 0 y  $45^\circ$ . En términos generales se observa el com-

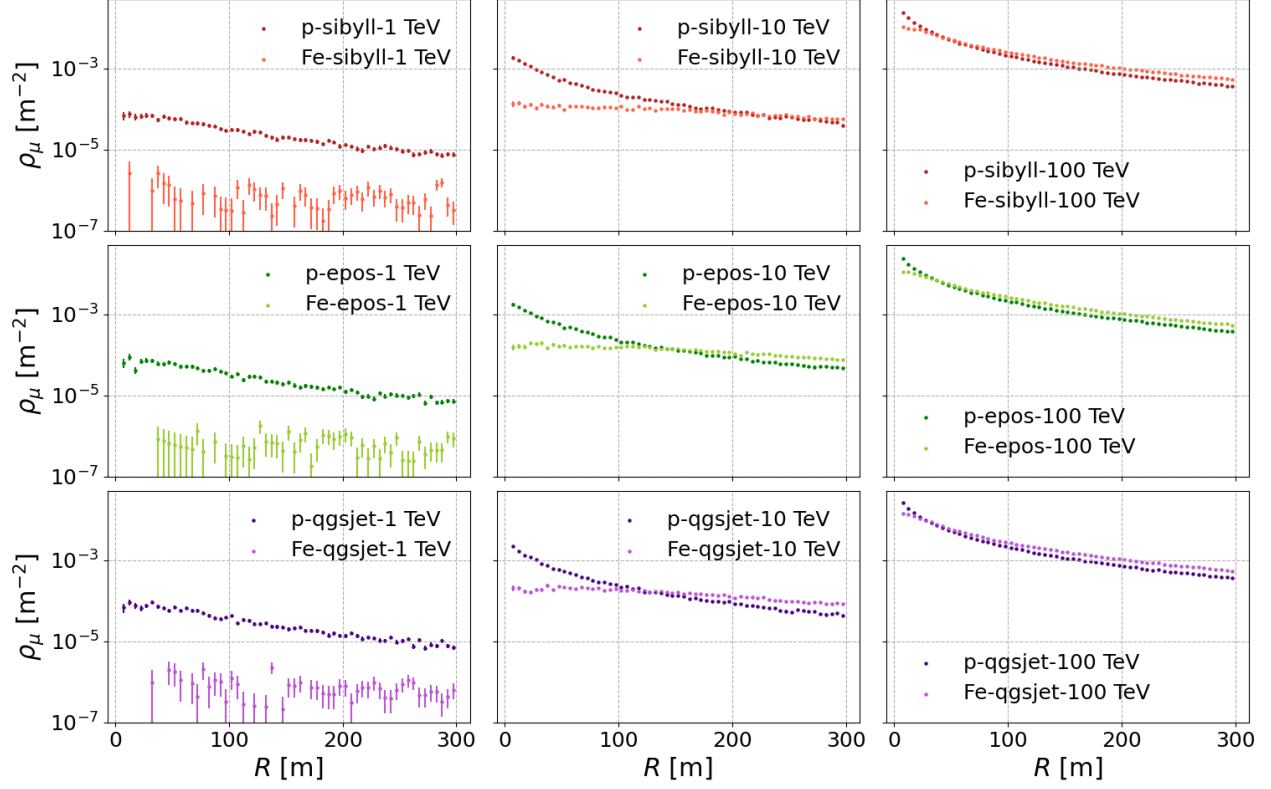


FIGURA 1.1: Densidad de muones en función de la distancia  $R$  a partir del eje de la cascada. Se muestran resultados de cascadas de protones (p) y núcleos de hierro (Fe) con tres energías primarias (aumentando de izquierda a derecha: 1, 10 y 100 TeV) y de los tres modelos de interacciones hadrónicas de altas energías (de arriba a abajo: Sibyll 2.3d, EPOS-LHC y QGSJETII-04).

portamiento esperado: la densidad de muones decrece con la distancia radial  $R$ , es decir que al estar más lejos del eje de la cascada se encuentran menos muones; también los valores de densidad de muones aumentan al incrementar la energía primaria (de izquierda a derecha en la figura). Por otro lado, es notable que en el rango radial que se está considerando ( $R < 300$  m) a bajas energías las cascadas iniciadas por protones presentan más muones que las iniciadas por núcleos de hierro, sin embargo a medida que la energía aumenta los resultados de ambas se incereptan, de manera que a 100 TeV la curva del hierro se encuentra por encima de la de un protón en casi todo el rango de  $R$ .

Adicionalmente, las distribuciones laterales de muones obtenidas se han contrastado con resultados publicados por otros autores que han realizado las simulaciones con el programa CORSIKA; esto permite comprobar de cierta manera que los resultados que se han obtenido con AIRES son de hecho razonables y similares a los que se consiguen con CORSIKA. Dichas comparaciones se presentan en las Figuras 1.2 y 1.3 superponiendo las distribuciones laterales de este trabajo (designadas con el nombre AIRES en las gráficas) con las de Gupta et al. (2005), Mitchell et al. (2019) y Parsons y Schoorlemmer (2019), que realizaron simulaciones con características similares, aunque con algunas diferencias en el ángulo zenital, la altura del suelo y la energía umbral de los muones.

En la primera gráfica (Figura 1.2) se presentan resultados utilizando el modelo QGSJET. Los resultados de Gupta et al. (línea negra con marcadores circulares vacíos) corresponden a cascadas de 300 TeV [2] que, al tener mayor energía primaria, se encuentran por encima de la curva de AIRES de 100 TeV, la energía máxima considerada en este trabajo. Además se muestran resultados de 10 TeV de Mitchell et al. [3] (línea gris con marcadores triangulares vacíos) donde se observan menores densidades que en los resultados de AIRES para la misma energía primaria, lo cual se atribuye al ángulo zenital de incidencia de las cascadas, que en [3] es  $20^\circ$  mientras que la curva de AIRES corresponde a cascadas con ángulos zenitales entre  $0$  y  $20^\circ$ , a la energía umbral de 10 GeV y la altura menor (1800 m frente a 4100 m de HAWC).

Igualmente, en la Figura 1.3 se muestran los resultados de Parsons y Schoorlemmer (2019), cuyas simulaciones están en el mismo rango de energía y en la misma ubicación (el observatorio HAWC) [4] que las de AIRES. En este caso, las graficas reflejan resultados obtenidos con el modelo EPOS-LHC. Se observa que las densidades de muones de [4] son más altas con respecto a las del presente trabajo. Similar al caso anterior, esta discrepancia entre resultados de cascadas con la misma energía (y a la misma altura) se explica por el ángulo de incidencia, ya que en la publicación han simulado con CORSIKA cascadas totalmente verticales ( $\theta = 0$ ), de las cuales llegan al suelo una mayor cantidad de partículas.

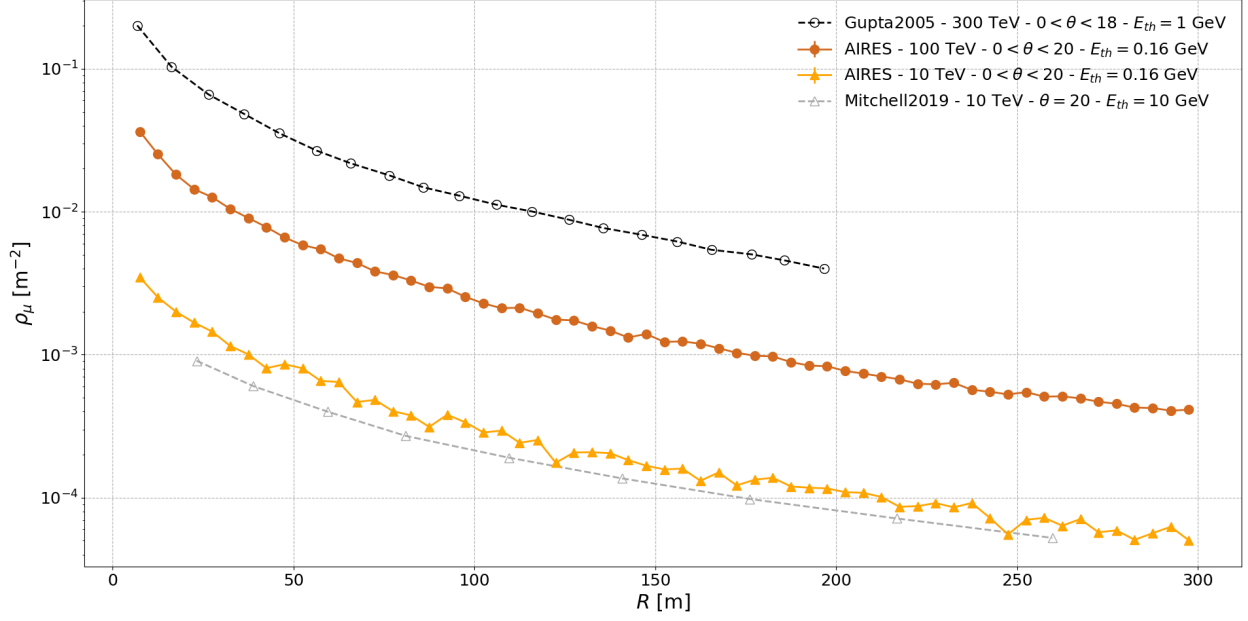


FIGURA 1.2: Comparación de los resultados obtenidos con AIRES (líneas naranja) de la distribución lateral de muones a 100 y 10 TeV con resultados de otros autores: Gupta et al. (2005) [2] y Mitchell et al. (2019) [3], a 300 TeV y 10 TeV, respectivamente. La discrepancia en las curvas de 10 TeV se atribuye al ángulo  $\theta$  de incidencia de las cascadas simuladas y a la altura de observación.

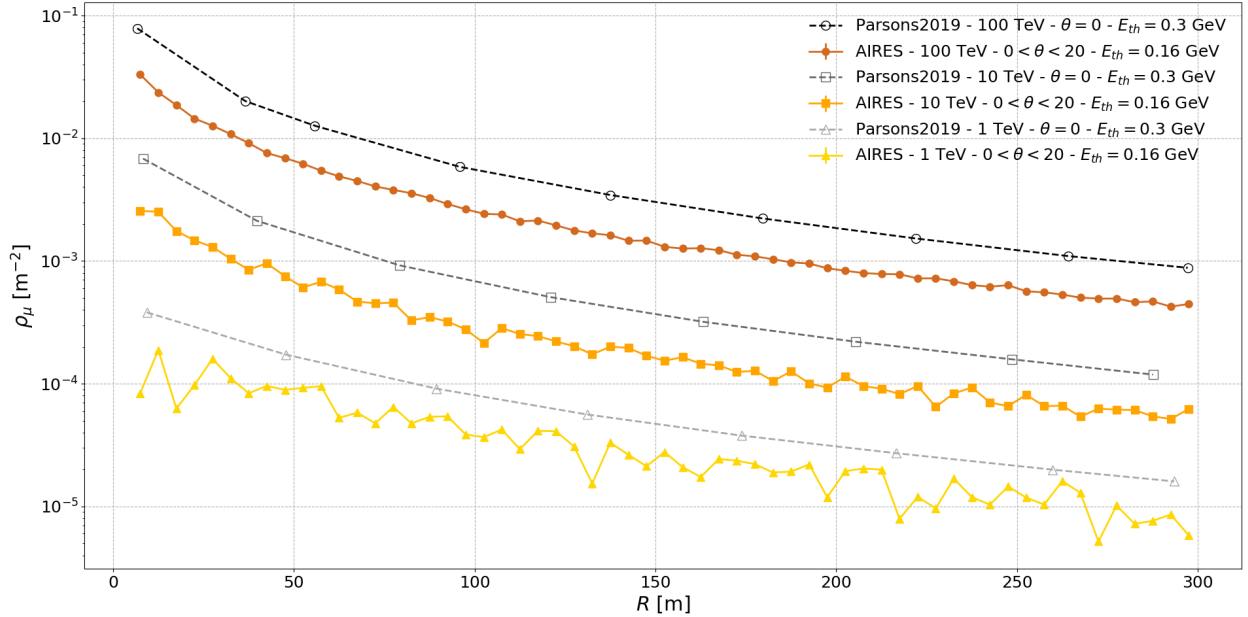


FIGURA 1.3: Comparación de los resultados obtenidos con AIRES (líneas naranja) de la distribución lateral de muones a 100, 10 y 1 TeV con resultados de Parsons y Schoorlemmer (2019) [4] con las mismas energías. Las discrepancias se atribuyen al ángulo  $\theta$  de incidencia de las cascadas.

### 1.1.1. Ajustes a una función de tipo NKG

Cada una de las distribuciones laterales de muones obtenidas se ajustó a una función de tipo NKG modificada, utilizada por la colaboración HAWC para ajustar la distribución lateral de la carga efectiva en cascadas iniciadas por rayos gamma [5] y por rayos cósmicos [6]:

$$\rho_\mu(r) = A \left( \frac{r}{r_M} \right)^{s-3} \left( 1 + \frac{r}{r_M} \right)^{s-4,5}, \quad (1.2)$$

donde  $r_M$  es el radio de *Molière* a la altura de HAWC (124.21 m), mientras que  $A$  y  $s$  son parámetros libres del ajuste. El parámetro  $A$  es una amplitud (o constante de normalización) que está relacionada con el número de partículas ( $N_\mu$  en este caso) en un área determinada, y  $s$  está relacionado con la edad de la cascada, es decir la etapa del desarrollo de la misma; un valor de  $s < 1$  indica que la cascada aún no alcanza su máximo, en  $s = 1$  la cascada está en el máximo y en  $s > 1$  la cascada ya tuvo su máximo y se está atenuando. En la Figura 1.4 se muestran los datos de tres energías primarias junto con las curvas resultantes del ajuste. En las siguientes secciones se presentan los parámetros  $A$  y  $s$  en función de la energía primaria de las cascadas.

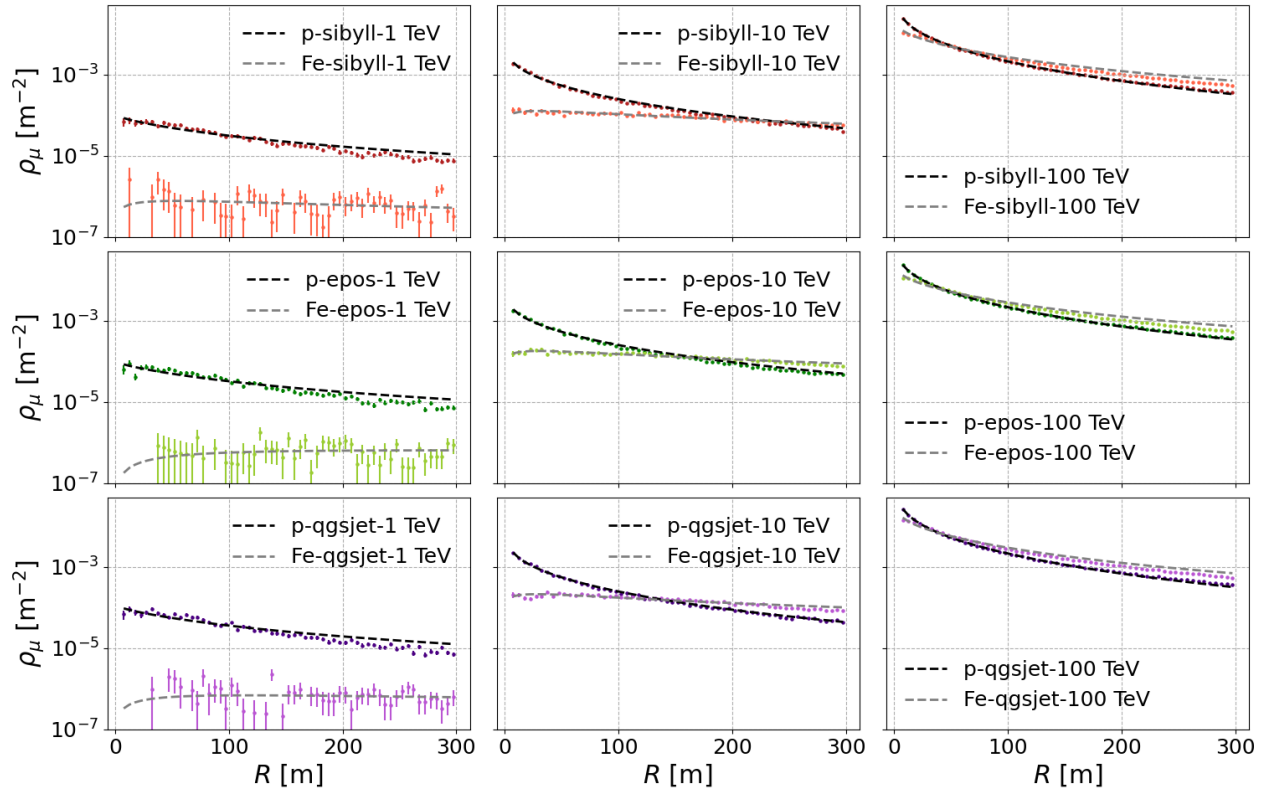


FIGURA 1.4: Resultados de la Figura 1.1 junto con la curva resultante del ajuste a la función  $\rho_\mu(r)$  de tipo NKG modificada (líneas discontinuas) de la ecuación (1.2).

## 1.2. Parámetros del ajuste

Con los parámetros  $A$  y  $s$  se caracterizan las distribuciones laterales y su evolución con la energía primaria. En esta sección se explora dicha evolución desde diferentes perspectivas: primero se evalúa la influencia de los modelos de interacciones hadrónicas utilizados en las simulaciones, luego se comparan los resultados de cascadas con distinta partícula primaria y por último se explica el efecto del ángulo zenital de incidencia del rayo cósmico.

En términos generales, lo que se aprecia en los resultados es que  $A$  es un parámetro que crece con la energía primaria, es decir que a mayor energía una cascada atmosférica contiene más muones debido a que hay más energía disponible en su componente hadrónica. Por su parte el parámetro  $s$  muestra el comportamiento opuesto, disminuyendo con  $E$ , dando a entender que a medida aumenta la energía primaria se observan cascadas más “jóvenes”, en concordancia con que la profundidad del máximo  $X_{\max}$  es mayor.

### 1.2.1. Modelos de interacciones hadrónicas

Los tres modelos de interacciones hadrónicas de altas energías utilizados (Sibyll 2.3d, EPOS-LHC y QGSJETII-04) abordan los aspectos de las interacciones de diferente manera. En particular, los aspectos de las interacciones hadrónicas que impactan más directamente el desarrollo de las cascadas atmosféricas son la sección eficaz, la multiplicidad y la inelasticidad; las diferencias entre los modelos son debidas principalmente a las extrapolaciones que realizan a interacciones p-aire y  $\pi$ -aire a partir de datos experimentales de interacciones p-p [7]. La intención de comparar los resultados de diferentes modelos, en este caso, es evaluar la distribución lateral de la componente muónica como una observable con la cual se pueda discriminar entre ellos.

En las Figuras 1.5 y 1.6 se han superpuesto los resultados de los modelos para los parámetros  $A$  y  $s$ , respectivamente, en función de la energía primaria. En las cascadas iniciadas por protones, el parámetro  $A$  obtenido con los tres modelos coincide muy bien, de manera que las tres curvas son prácticamente indistinguibles; el caso del parámetro  $s$  es muy parecido. Por otro lado, para las cascadas producidas por Fe los resultados de  $A$  también están bastante cercanos, aunque sí se observa que la curvas se van separando a medida que aumenta la energía primaria; para el parámetro  $s$  las incertezas a bajas energías son bastante grandes, de manera que no se aprecian diferencias, sin embargo al incrementar la energía la curva de QGSJET se observa ligeramente por debajo que las de los otros modelos.

Para visualizar más claramente las diferencias entre los resultados de los tres modelos de

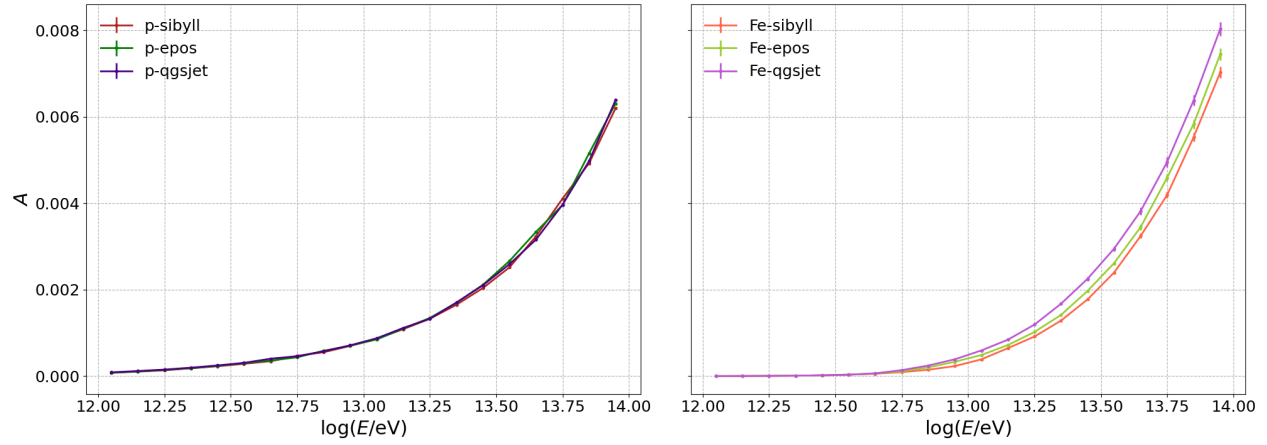


FIGURA 1.5: Resultados del parámetro  $A$  obtenido en el ajuste de la distribución lateral simulada a la ecuación (1.2). Se superponen los resultados de los tres modelos hadrónicos para cascadas de protones (izquierda) y hierro (derecha), observando que en el primer caso no se presentan diferencias significativas entre ellos, mientras de para Fe es posible apreciar pequeñas diferencias a partir de  $10^{13}$  eV.

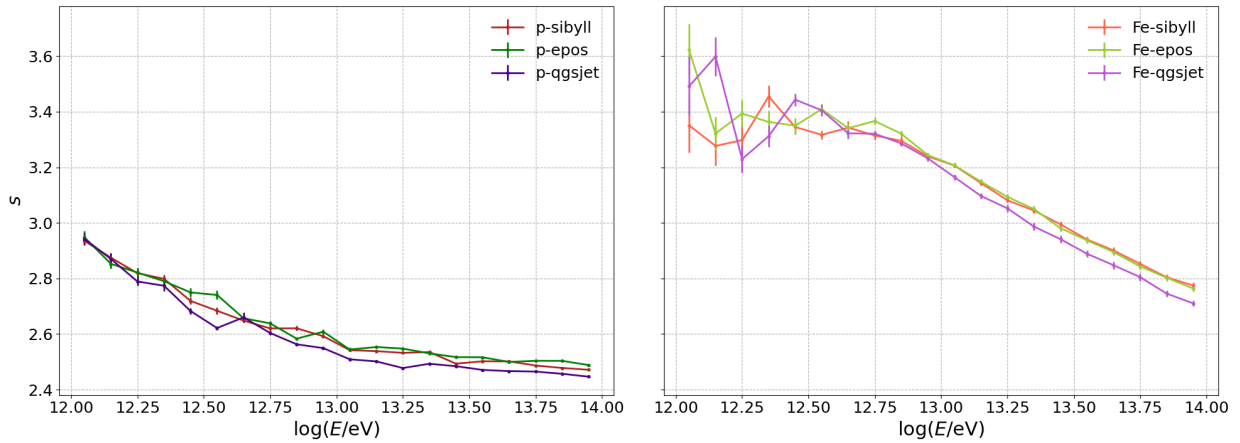


FIGURA 1.6: Resultados del parámetro  $s$  obtenido en el ajuste de la distribución lateral simulada a la ecuación (1.2). Se superponen los resultados de los tres modelos hadrónicos para cascadas de protones (izquierda) y hierro (derecha). A energías  $> 10^{13}$  eV la curva del modelo QGSJETII-04 se aprecia ligeramente por debajo de los otros dos.

interacciones hadrónicas para los parámetros del ajuste, en la Figura 1.7 se grafica la razón entre los valores obtenidos con cada uno de ellos. En las cascadas de protones las máximas diferencias son del 17 % entre QGSJET y SIBYLL en el parámetro  $A$ , y 5 % entre QGSJET y EPOS en el parámetro  $s$ . Por otro lado, se observan que en las cascadas de hierro las máximas diferencias están entre los modelos QGSJET y SIBYLL, con 68 % y 10 % en los parámetros  $A$  y  $s$ , respectivamente.

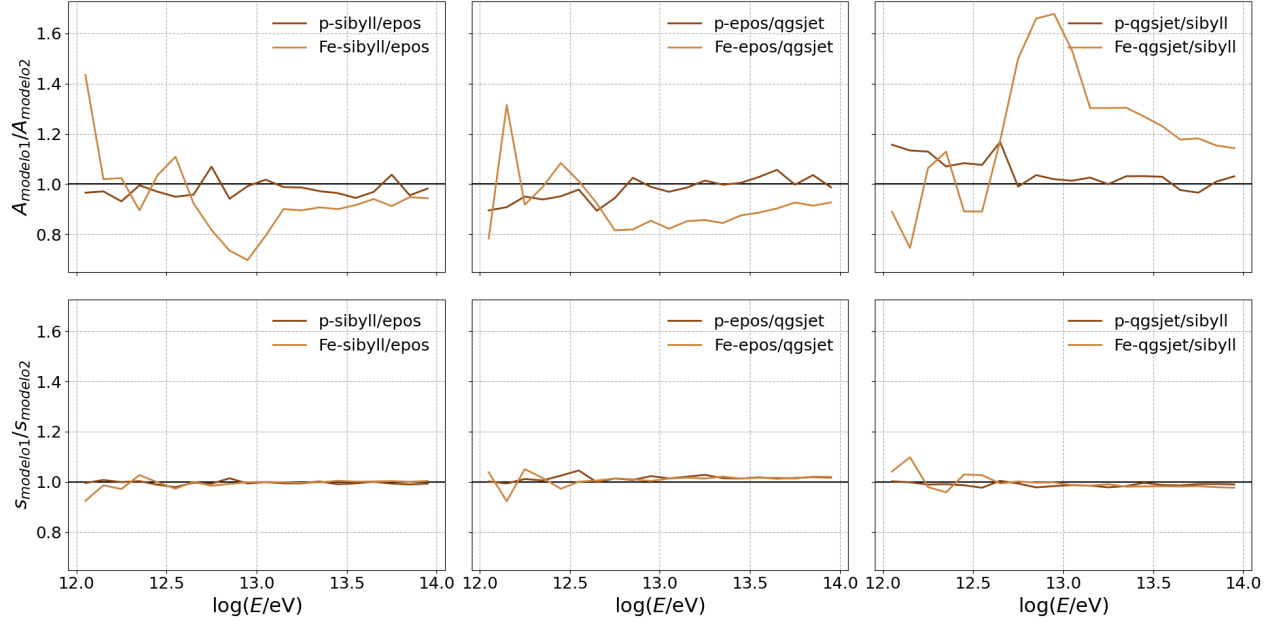


FIGURA 1.7: Razones entre los resultados de los diferentes modelos de interacciones hadrónicas. Se observa que las mayores diferencias corresponden a las cascadas iniciadas por núcleos de hierro.

### 1.2.2. Composición primaria

Distinguiendo entre cascadas de la misma energía iniciadas por protones e iniciadas por núcleos de hierro, se espera que en las últimas se produzcan mayor cantidad de muones, de acuerdo a la ecuación [CC: ref{eq: NmuA}](#), marco teorico (Modelo Heitler-Matthews). Sin embargo, en los resultados del parámetro  $A$ , relacionado con  $N_\mu$ , se observa que las cascadas de protones contienen más muones hasta una energía entre  $\approx 25$  y  $40$  TeV, a partir de la cual la curva de las cascadas de hierro indica una mayor cantidad de muones. Esto se atribuye a las distancias consideradas en estas simulaciones ( $R < 300$  m), ya que si bien las cascadas iniciadas por Fe producen más muones en total, éstas se extienden más lateralmente debido a la distribución de la energía primaria entre los nucleones que participan en las interacciones, por lo que la mayoría de muones estarían a mayores distancias del eje.



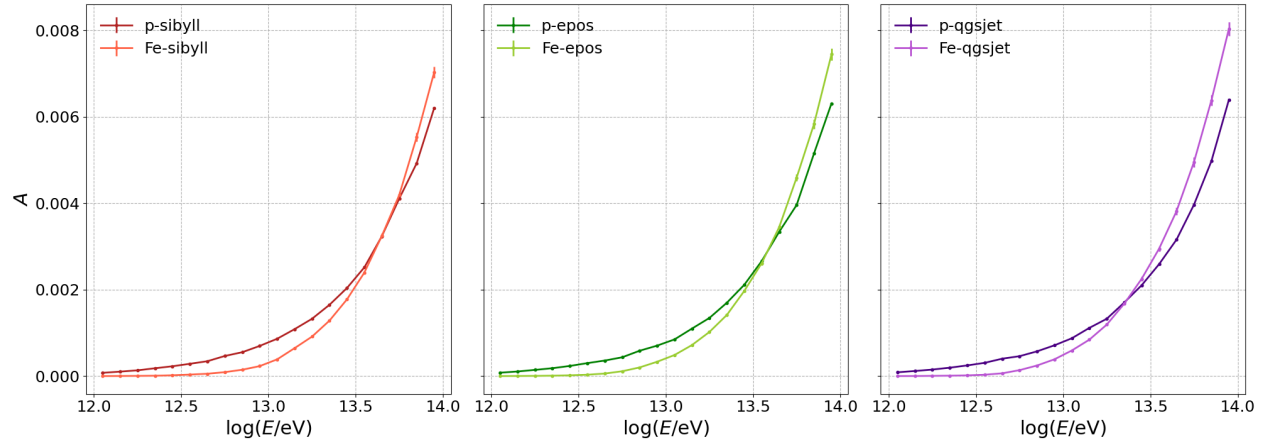


FIGURA 1.8: Se superponen los resultados del parámetro  $A$  para cascadas de protones y hierro, con el fin de observar el efecto de la masa de la partícula primaria. A bajas energías se observa la curva de p sobre la de Fe, sugiriendo un mayor número de muones a las distancias radiales consideradas.

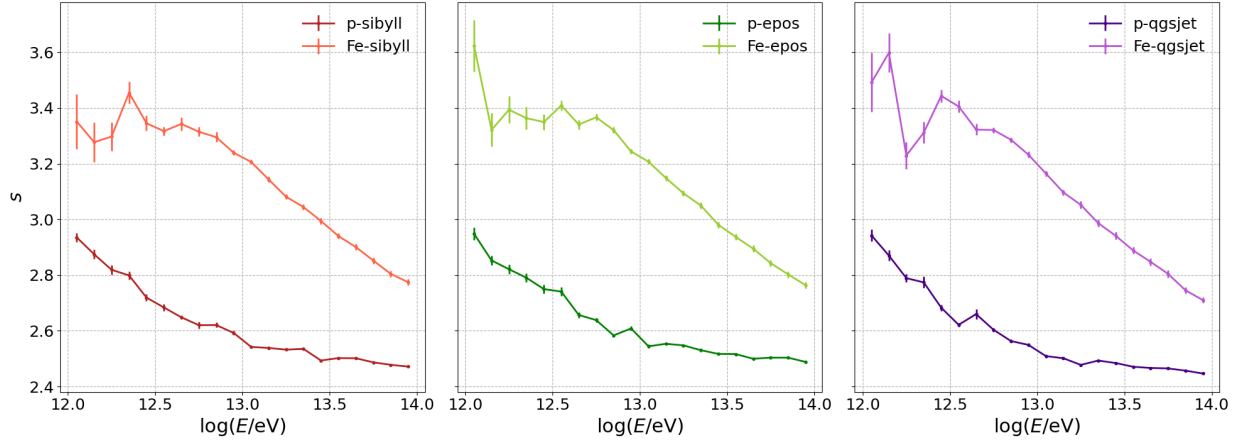


FIGURA 1.9: Se superponen los resultados del parámetro  $s$  para cascadas de protones y hierro. Estas últimas presentan mayores valores de  $s$ , aludiendo a una mayor edad de las cascadas de Fe.

Por otro lado, en los resultados del parámetro  $s$  es evidente la distinción entre cascadas iniciadas por una partícula ligera y una pesada. Los mayores valores de  $s$  para cascadas de Fe en todo el intervalo de energía indican cascadas más “viejas”, ya que éstas se desarrollan más rápido con respecto a las de protones, alcanzando su máximo a menores profundidades atmosféricas, como se expresa en la ecuación  $\text{CC: } \text{ref}\{\text{eq: XmaxA}\}$ . Además se puede ver que las curvas tienen formas distintas, ya que la de protones tiene una pendiente menor, disminuyendo más lento con la energía que las cascadas de hierro.

### 1.2.3. Ángulo de incidencia

Se simularon cascadas atmosféricas con ángulo zenital  $\theta$  entre 0 y  $45^\circ$ . Para poder analizar el efecto de  $\theta$  sobre la distribución lateral de muones, el intervalo se ha dividido en dos subintervalos:  $0^\circ < \theta < 20^\circ$  (cascadas verticales) y  $20^\circ < \theta < 45^\circ$  (cascadas inclinadas). En general, una cascada inclinada atraviesa mayor cantidad de materia en la atmósfera que su contraparte vertical, en consecuencia al llegar al suelo está más avanzada en su desarrollo. Por lo mismo, al pasar más atmósfera hay mayores pérdidas de energía en el medio, implicando que el número de partículas de la cascada es menor.

En las Figuras 1.10 y 1.11 se grafican los resultados de los parámetro  $A$  y  $s$ , respectivamente, habiendo realizado independientemente los ajustes a la función 1.2 para las cascadas de ambos subintervalos. El comportamiento de las curvas individuales es similar a los resultados de todo el intervalo que se reportan en secciones anteriores. En la gráfica del parámetro  $A$  se observa que efectivamente la curva resultante de las cascadas verticales está por encima de la correspondiente a las inclinadas, coincidiendo con la idea de que en una cascada inclinada estarían presentes menor cantidad de partículas, afectando la componente hadrónica y por consiguiente al número de muones a nivel del suelo.

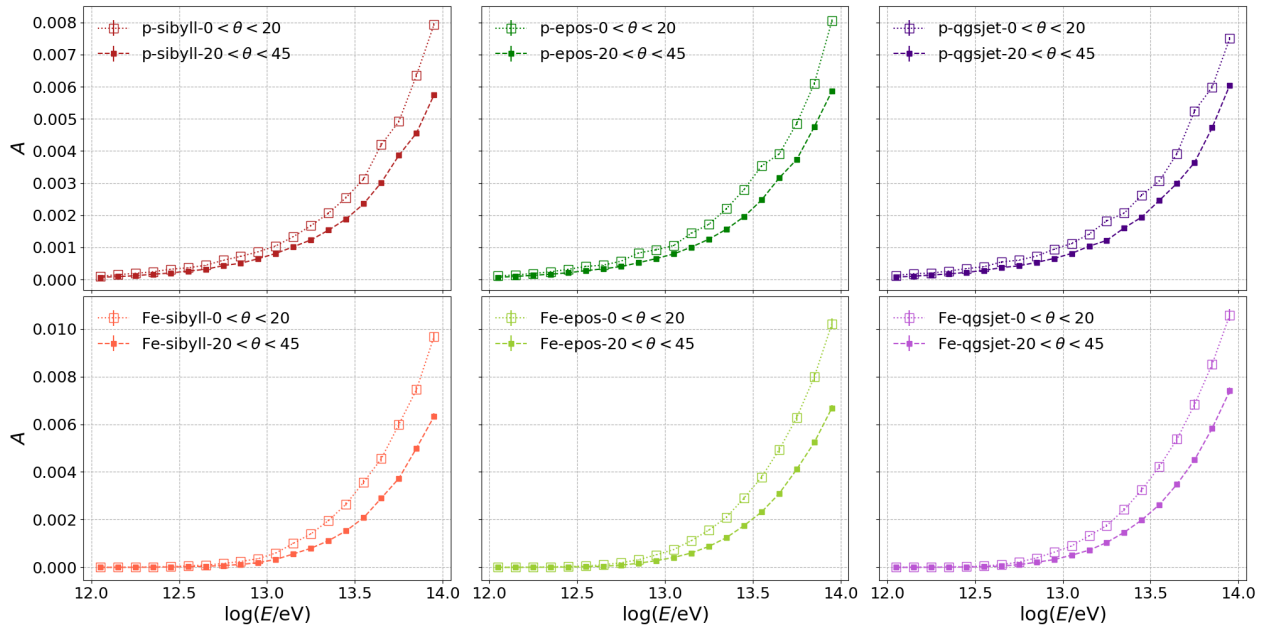


FIGURA 1.10: Resultados del parámetro  $A$ , segmentando el grupo de cascadas en verticales e inclinadas. A partir de  $E = 10^{13}$  eV, se ve que los valores  $A$  para las cascadas verticales son mayores que para las inclinadas, esto debido a la menor cantidad de materia que debe atravesar.

Asimismo, los resultados del parámetro  $s$  indican mayor edad para las cascadas inclinadas; en el caso de cascadas iniciadas por protones éste es el caso para todo el rango de energía

primaria, mientras que para las de hierro comienza a ser evidente a partir de los 10 TeV, esto debido principalmente a las mayores incertezas a bajas energías. Este resultado es también conforme a lo que se esperaba respecto al efecto del ángulo zenital sobre el desarrollo de una cascada; al llegar al nivel del suelo las cascadas verticales son más “jóvenes” que las inclinadas porque han atravesado menos atmósfera, y por tanto están menos desarrolladas.

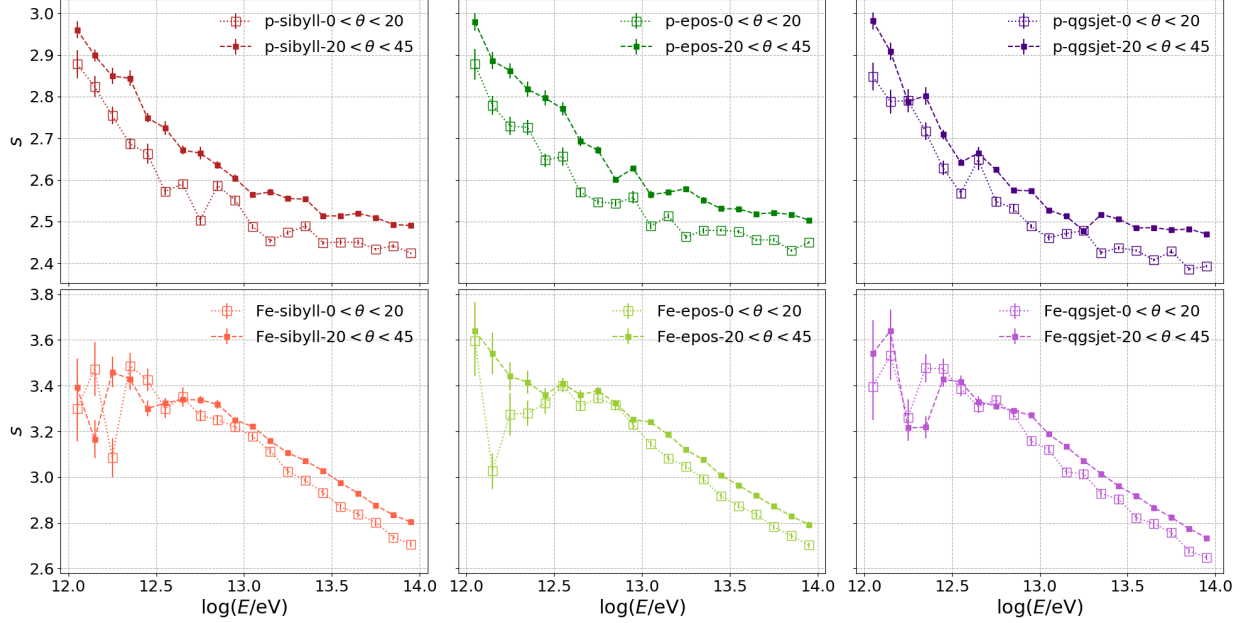


FIGURA 1.11: Resultados del parámetro  $s$  en cascadas verticales e inclinadas. Se observa que las cascadas más desarrolladas (mayor  $s$ ) son las verticales, sin embargo en el caso del Fe esto no es evidente hasta energías  $> 10^{13}$  eV.

### 1.3. Número de muones

Además de las distribuciones laterales, se ha calculado una aproximación del número de muones  $N_\mu$  que podrían ser detectados en la superficie cubierta por el observatorio HAWC. El arreglo de detectores de agua Cherenkov de HAWC cubre un área de 22000 m<sup>2</sup>. Por simplicidad se ha supuesto que el eje de las cascadas está sobre la zona central del observatorio y se ha contado  $N_\mu$  sobre un área circular de  $\approx 15400$  m<sup>2</sup> (radio de 70 m). En la Figura 1.12 se representa esquemáticamente la disposición de los tanques del observatorio y se indica el perímetro de la superficie circular para la que se calculó el número de muones.

En primer lugar se extrajo el número de muones con  $r < 70$  m directamente de los resultados de las simulaciones. Posteriormente, se calculó el número de muones a partir de

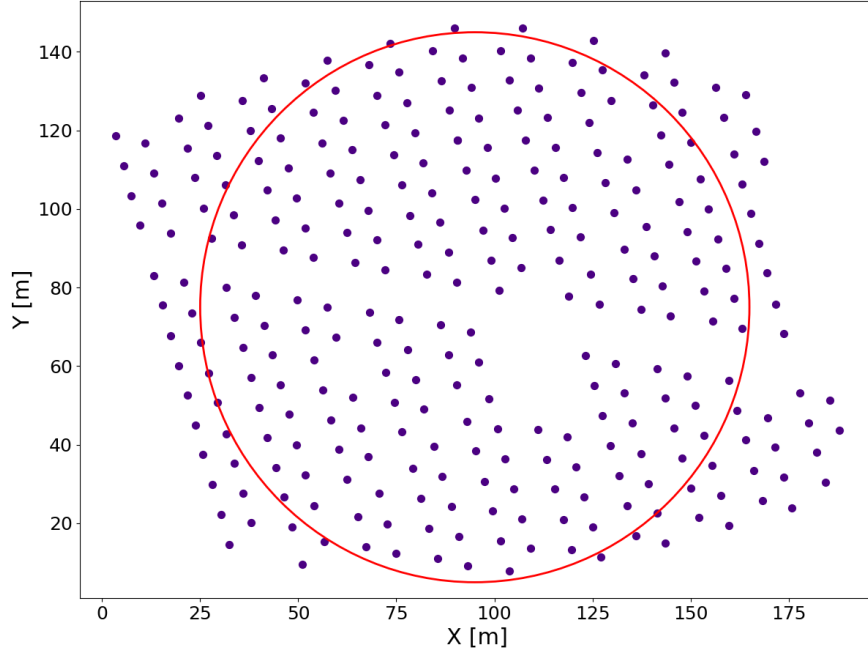


FIGURA 1.12: Esquema de la disposición de los detectores de agua Cherenkov que conforman HAWC. Cada punto representa un tanque. La superficie encerrada en la circunferencia roja ( $R = 70$  m) es el área utilizada para calcular un aproximado del número de muones producidos en cascadas atmosféricas que podrían detectarse en el observatorio.

la función 1.2 de la forma

$$N_{\mu} = 2\pi \int_0^R r \rho_{\mu}(r) dr, \quad (1.3)$$

con  $R = 70$  m. Se observa en la Figura 1.13 que calculando  $N_{\mu}$  a partir de la función de  $\rho(r)$  de tipo NKG, con los parámetros que se obtuvieron del ajuste, se consiguen números menores que los que produce la simulación, siendo más notorio a partir de una energía primaria de  $\approx 32$  TeV.

Como una medida de qué tan bien ajusta la función de tipo NKG a los valores que se han extraído de AIRES, en la Figura 1.14 se muestran las razones entre los resultados de los ajustes y los resultados de las simulaciones, donde se confirma que utilizando la ecuación 1.3 se obtienen, en general, menores valores de  $N_{\mu}$ . En promedio, los errores del ajuste relativos a los valores simulados son aproximadamente 9 % para las cascadas de protones y 10 % para las de hierro, mientras que los valores máximos de error los presenta el modelo QGSJET con 19 % y 23 % respectivamente para cascadas de protones y de núcleos de hierro.

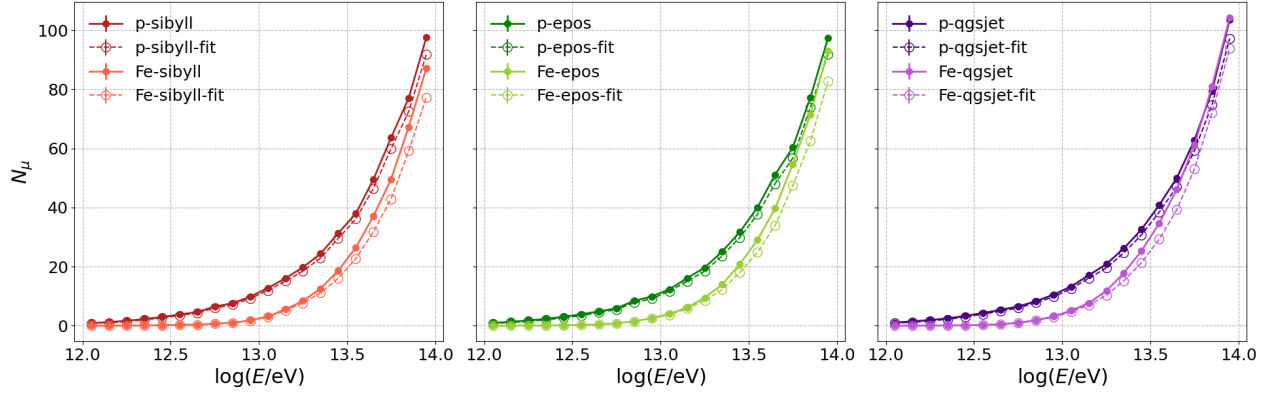


FIGURA 1.13: Número de muones que podrían detectarse en HAWC. Se exponen los resultados directos de las simulaciones (líneas sólidas y marcadores rellenos) y los resultados de integrar numéricamente la función de tipo NKG (1.2) (líneas discontinuas y marcadores vacíos). En el cálculo se obtiene menor número de muones.

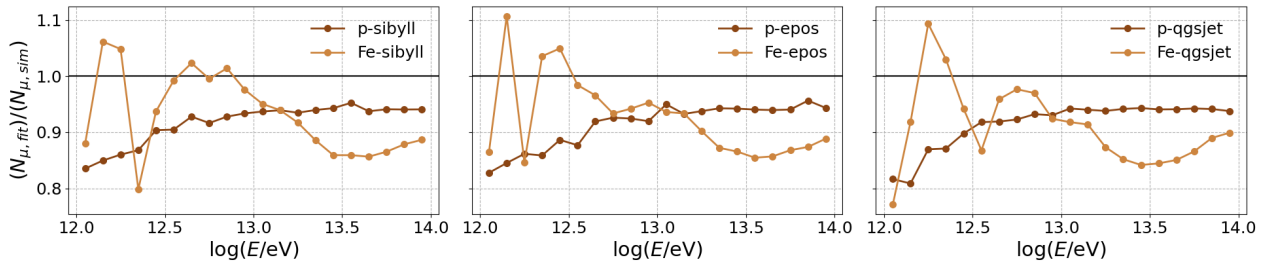


FIGURA 1.14: Razones entre  $N_{\mu,fit}$ , el número de muones calculado numéricamente con la ecuación 1.3 a partir del ajuste y  $N_{\mu,sim}$ , el número de muones obtenido directamente de las simulaciones.

# Referencias

- <sup>1</sup>J. Albrecht, L. Cazon, H. Dembinski, A. Fedynitch, K.-H. Kampert, T. Pierog, W. Rhode, D. Soldin, B. Spaan, R. Ulrich y M. Unger, “The Muon Puzzle in cosmic-ray induced air showers and its connection to the Large Hadron Collider”, 1-55 (2021).
- <sup>2</sup>S. K. Gupta, Y Aikawa, N. V. Gopalakrishnan, Y Hayashi, N Ikeda, N Ito, A Jain, A. V. John, S Karthikeyan, S Kawakami, T Matsuyama, D. K Mohanty, P. K. Mohanty, S. D. Morris, T Nonaka, A Oshima, B. S. Rao, K. C. Ravindran, M Sasano, K Sivaprasad, B. V. Sreekantan, H Tanaka, S. C. Tonwar, K Viswanathan y T Yoshikoshi, “GRAPES-3 - A high-density air shower array for studies on the structure in the cosmic-ray energy spectrum near the knee”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **540**, 311-323 (2005).
- <sup>3</sup>A. M. W. Mitchell, H. P. Dembinski y R. D. Parsons, “Potential for measuring the longitudinal and lateral profile of muons in TeV air showers with IACTs”, Astroparticle Physics **111**, 23-34 (2019).
- <sup>4</sup>R. D. Parsons y H Schoorlemmer, “Systematic Differences due to High Energy Hadronic Interaction Models in Air Shower Simulations in the 100 GeV-100 TeV Range”, (2019).
- <sup>5</sup>K. Malone, *HAWC OBSERVATORY Energy Estimation via Ground Parameter*, inf. téc. November (2018), págs. 1-17.
- <sup>6</sup>J. A. Morales-Soto, J. C. Arteaga-Velázquez y J. D. Álvarez, “The lateral distribution function of cosmic-ray induced air showers studied with the HAWC observatory”, en Proceedings of Science, vol. 358 (2019).
- <sup>7</sup>T. Pierog, “Review of Model Predictions for Extensive Air Showers”, en Proceedings of 2016 International Conference on Ultra-High Energy Cosmic Rays (UHECR2016) (2018).