

## 4.12. COMUNICACIÓN BREVE 12

### Modelamiento para el número muones en función de la energía y el ángulo de entrada del protón incidente.

*Gabriel Ortega – Jhon Revelo.*

[gabrielortega550@gmail.com](mailto:gabrielortega550@gmail.com) - [jhonrevelo22@gmail.com](mailto:jhonrevelo22@gmail.com) Universidad de Nariño.

#### **Resumen.**

En este trabajo se presenta el resultado del análisis estadístico generado por la simulación realizada en el programa CORSIKA, el cual, simula cascadas atmosféricas extendidas que son producto de la interacción de rayos cósmicos con las partículas que componen la atmósfera. Se modificó la simulación, de tal forma que contabilice el número de muones que se generan en cada cascada atmosférica, variando la energía y el ángulo de incidencia del rayo cósmico primario.

**Palabras claves.** Muones, rayos cósmicos, CORSIKA.

- **Presentación del problema.**

En el presente trabajo se pretende realizar un modelo de regresión para ver la dependencia del número de muones generados en cada cascada atmosférica, variando la energía y el ángulo de incidencia.

- **Marco de referencia conceptual.**

Se denominan rayos cósmicos primarios a las partículas que inciden en la atmósfera terrestre procedente del espacio, compuestos principalmente de protones. La energía con la que llegan estas partículas es muy variada, va desde energías inferiores a los TeV, a grandes energías superiores a los  $10^{20}$  eV las cuales, superan a la energía de las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo. Tras interactuar con un núcleo atmosférico, producen una cascada de partículas compuesta por rayos  $\gamma$ , electrones, muones, neutrinos, hadrones, etc, que son los llamados rayos cósmicos secundarios. Las partículas secundarias colisionan con partículas de la atmósfera, dando origen a nuevas partículas. Este proceso se repite generando una cascada, en la cual se pierde energía con cada interacción, hasta que alcanza una energía límite que impide nuevas interacciones. En cada cascada puede generarse alrededor de  $10^{11}$  partículas. La mayoría de las partículas que alcanzan la superficie terrestre son muones procedentes de interacciones nucleares.

- **Metodología.**

Para la realización de este proyecto se utilizarán los datos de muones generados a partir de una simulación que se realizó en el programa CORSIKA el cual se especializa en simular cascadas atmosféricas extendidas, producto de la interacción de rayos cósmicos en la atmósfera.

Para obtener un modelo significativo que explique los datos se hará uso del paquete estadístico STATGRAPHICS que nos facilita las herramientas para la generación del modelo, en el cual se tiene como variable dependiente el NUMERO DE MUONES GENERADOS y como variables independientes el ANGULO DE INCIDENCIA del protón y la ENERGIA de entrada del mismo.

- **Análisis de datos.**

Haciendo un análisis descriptivo de los datos encontramos que existen diferencias significativas entre el Número de muones y la variable Energía, el resultado es el siguiente.

Modelo para la variable ENERGÍA.

Para la creación de un modelo de regresión se utilizó el programa de STATGRAPHICS y la herramienta relacionar, esta herramienta nos brinda la posibilidad de escoger entre varios modelos alternativos en función del R-cuadrada

**TABLA 1**

Tabla de modelos alternos		
Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Multiplicativa	0,9224	85,07%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,9197	84,59%
Exponencial	0,9132	83,39%
Log-Y Cuadrado-X	0,9071	82,29%
Curva S	-0,8628	74,44%

*Tabla 1: tabla de modelos alternos para número de muones en función de la energía.*

Los modelos para energía tienen valores de R-Cuadrado superiores al 80%, por lo que se puede crear un modelo que exprese significativamente la variabilidad de los datos, dado que el modelo “Multiplicativo” tiene el mayor valor R-Cuadrado se seleccionó este y se obtuvo el siguiente modelo:

$$\# \text{ de muones} = \exp(2,0566 + 1,63174 * \ln(\text{ENERGÍA}))$$

Con los siguientes parámetros

- Coefficiente de Correlación = 0,922359
- R-cuadrada = 85,0745 por ciento
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 85,0683 por ciento
- Error estándar del est. = 0,875526
- Error absoluto medio = 0,711073
- Estadístico Durbin-Watson = 0,720284 (P=0,0000)
- Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,639129

De estos parámetros es importante resaltar el valor “R-cuadrada” que nos dice el porcentaje de variabilidad de los datos explicada por el modelo, dado que este parámetro tiene un valor de 85.0745% se concluye que el modelo obtenido es estadísticamente significativo y puede utilizarse para realizar predicciones entre la variable número de muones y la variable energía.

También se hizo un modelo de regresión múltiple el cual no logra representar de manera adecuada todos los datos, por tal razón hemos optado por usar un modelo de regresión de Poisson, esto con el fin de obtener un modelo de dos variables que pueda explicar una buena parte de la variabilidad de los datos, para esto se usó la herramienta relacionar del programa STATGRAPHICS, usando un modelo de Poisson de primer orden con las 2 variables se obtuvo el siguiente modelo:

$$\# \text{ de muones} = \exp(5,99484 + 0,0478233 * \text{ENERGÍA} - 0,0264657 * \text{ÁNGULO})$$

Con los siguientes parámetros:

Porcentaje de desviación explicado por el modelo = 84,789

Porcentaje ajustado = 84,789

El estadístico porcentaje de desviación explicado por el modelo es similar al valor R-cuadrada habitual que hemos venido trabajando, por lo tanto se puede decir que este modelo explica el **84,78%** de la variabilidad de los datos y puede considerarse como un modelo estadísticamente significativo y usarse para realizar predicciones.

- **Conclusiones.**

- Se concluye del análisis que el número de muones varía significativamente con respecto a la variación de la energía.
- Se encontró que no es posible crear un modelo de regresión lineal múltiple significativo que nos diga a variación del número de muones en función del ángulo y la energía
- El modelo de regresión de Poisson explica satisfactoriamente un 84% por ciento de la variabilidad de los datos y podría ser usado en futuras investigaciones y para realizar predicciones acerca del número de muones encontrados.

**Bibliografía.**

1. THOMAS K. GAISSER, TODOR STANEV. High-energy Cosmic Rays. arXiv:astroph/ 0510321. 2005.
2. R. A. MILLIKAN AND G. H. CAMERON. High frequency rays of cosmic origin iii measurements in snow-fed lakes at high altitudes. Physical Review, 28(5):851-868 1926.
3. J. RODRIGUEZ. Simulación de un detector de partículas segmentado para muones atmosféricos. **2016**