

Estudio del Flujo de Rayos C3smicos en torno a la Ocurrencia de Sismos

Eduardo Tirado
en colaboraci3n con: **Eduardo Mendoza y David Godos**
etirado@inaoep.mx

Instituto Nacional de Astrof3sica 3ptica y Electr3nica

Introducción

- Los terremotos a lo largo de la historia han inspirado temor desde los primeros días de la presencia del hombre en el planeta Tierra. Al mismo tiempo han intentado predecirlos basándose en lo que nuestros antepasados pudieron ver: el Sol, la Luna, las estrellas, el clima, etcetera.

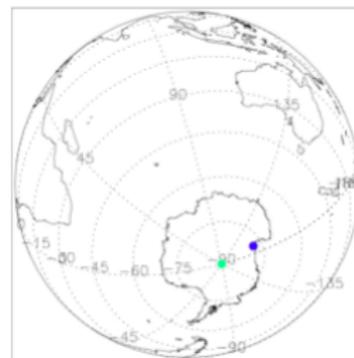
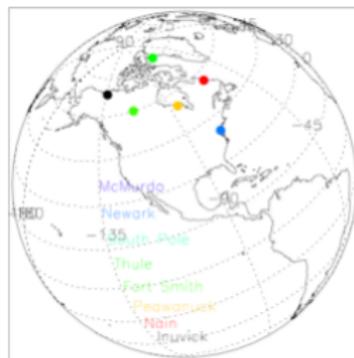
Introducción

- Hasta la actualidad persisten los intentos por predecir la actividad sísmica, basado principalmente en el comportamiento solar y lunar. Cabe mencionar que existen numerosas publicaciones sobre la existencia de una posible correlación entre los ciclos solares y los terremotos.¹
- Dada la complejidad de los eventos que contribuyen a la actividad sísmica y dado que nuestro conocimiento es muy limitado de ellos, es bastante ingenuo afirmar que un sólo evento pueda causar actividad sísmica.

¹A. L. Morozova, et.al. (1999) Variations of the Cosmic Ray Fluxes as a Possible Earthquake Precursor.

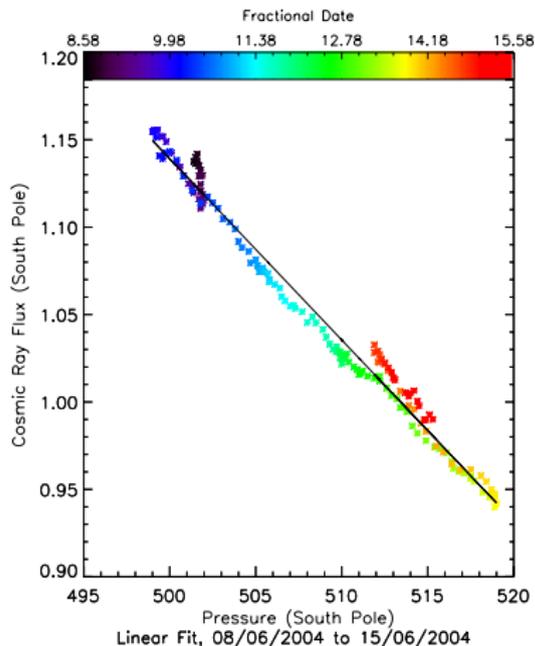
Red de Monitores de Neutrones, Bartol Research Institute

- La Universidad de Delaware cuenta actualmente con 8 monitores de neutrones distribuidos alrededor del planeta que toman datos los cuales son publicados con una resolución de 1 hora.
- Dado que se encuentran a diferentes latitudes, se tienen datos que corresponden a diferentes valores de la rigidez magnética.



Relación entre el Flujo de Rayos Cósmicos y la Presión Atmosférica

- Las variaciones de la presión atmosférica (PA) generan variaciones del flujo de rayos cósmicos (FRC).
- Para eliminar dicha influencia se estima CRF como función de la PA, con base en un ajuste lineal.

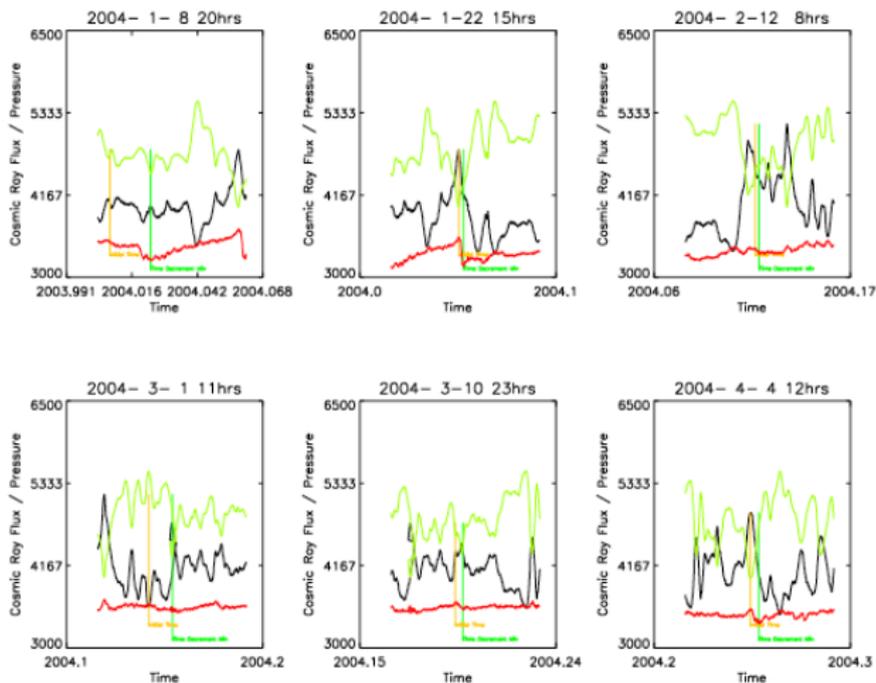


Relación entre el Flujo de Rayos Cósmicos y la Presión Atmosférica

- De la Figura se ve que FRC sigue una función lineal con la PA^2 que se ajusta muy bien a una recta. Se realizaron diversas gráficas de este tipo para estudiar el comportamiento que podría ser considerado como **de fondo**.
- Es decir, en los que la relación entre el flujo de rayos cósmicos y la presión atmosférica no registra la influencia de sismos o de actividad solar.

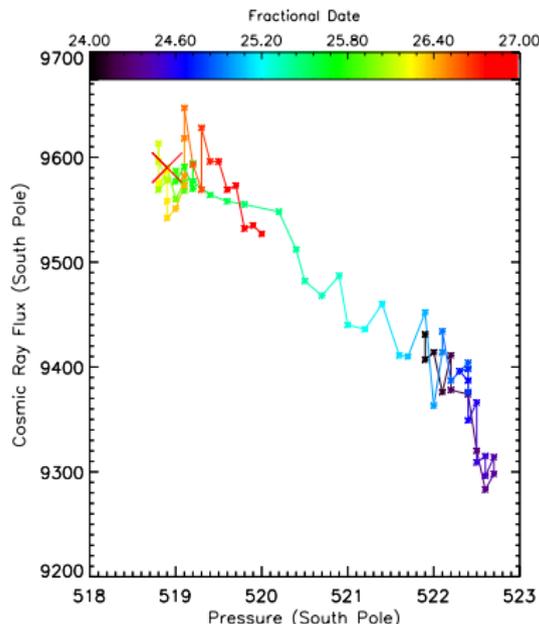
²De Mendonça R.R.S, et.al. (2013) Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements.

Estudio del FRC y PA e identificación de variaciones debidas a la actividad solar

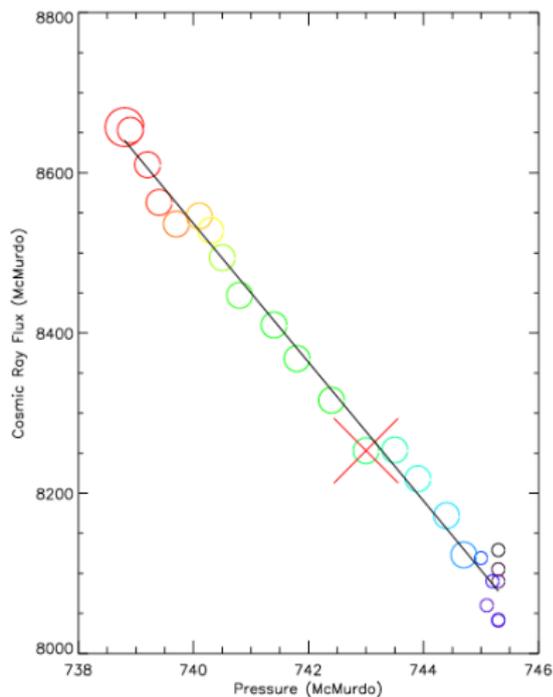
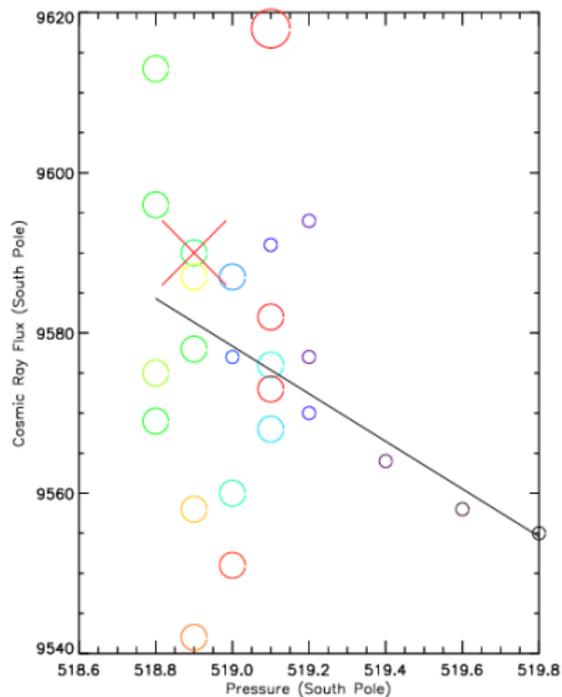


Relación entre el FRC y la presión atmosférica en tiempos cercanos a sismos

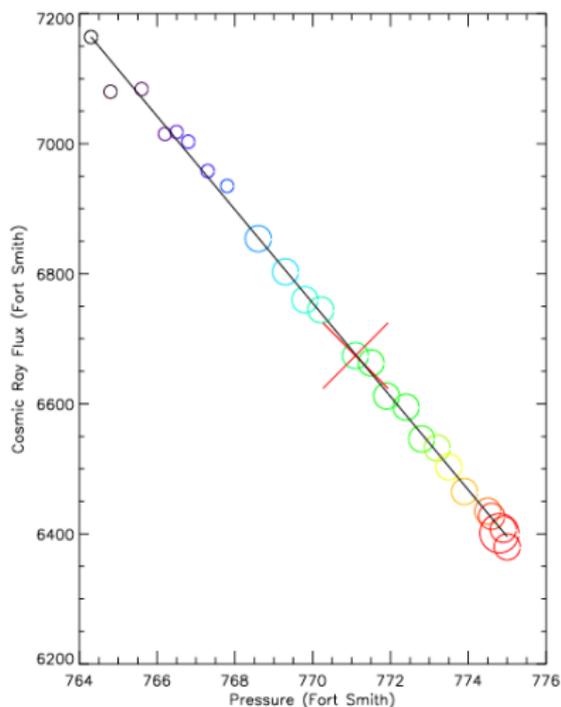
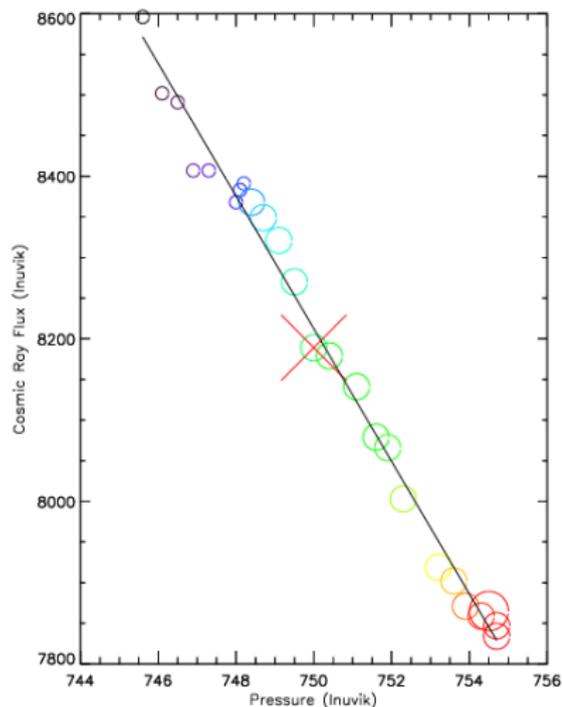
- Al realizar las gráficas del FRC y la PA para tiempos próximos a sismos, se observan variaciones de la pendiente del ajuste lineal.
- En la Figura se muestra la correspondiente gráfica para tiempos en torno y durante el terremoto del 26 de diciembre de 2004, en Indonesia.



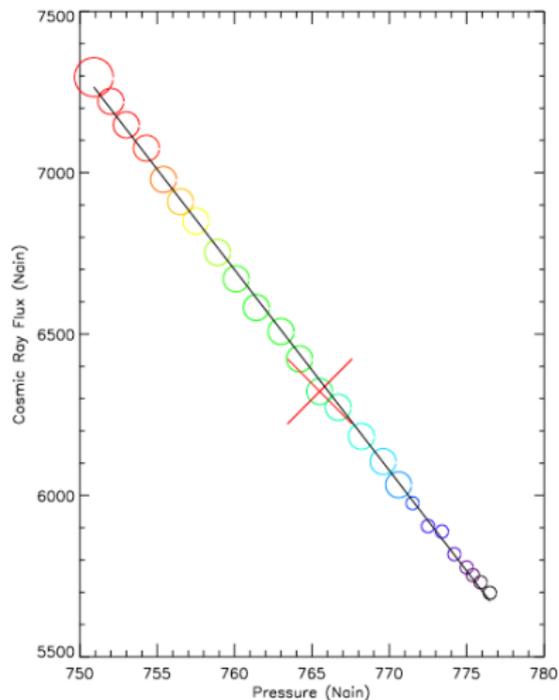
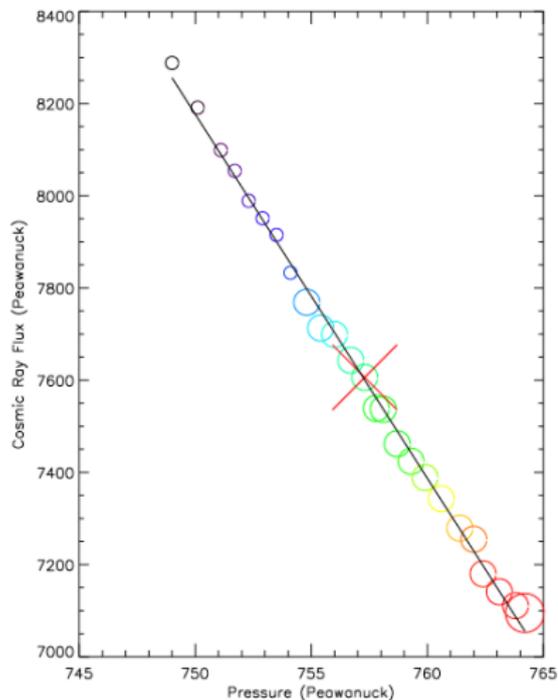
Diferentes monitores de neutrones en tiempos cercanos al sismo del 26 de diciembre 2004



Diferentes monitores de neutrones en tiempos cercanos al sismo del 26 de diciembre 2004



Diferentes monitores de neutrones en tiempos cercanos al sismo del 26 de diciembre 2004



Análisis Estadístico

- Para calcular la medida de la relación lineal entre dos variables (flujo de rayos cósmicos y la presión atmosférica) se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson, el cual se define como:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

donde σ_{XY} es la covarianza de (X, Y) , σ_X y σ_Y son las desviaciones estándar de cada variable.

- Una interpretación del coeficiente de correlación de Pearson es, un índice que se utiliza para medir el grado de relación de dos variables.
- El valor del índice de correlación toma valores en el intervalo $[-1, 1]$, y el signo nos indica el sentido de la relación.

Cálculo del Coeficiente de Correlación

Dado que la mayor variación que se observa en la pendiente del ajuste lineal es para el monitor de neutrones en South Pole, se calcula su coeficiente de correlación:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = -0,303758 \quad (2)$$

También se calcula dicho coeficiente para una estación de referencia, en este caso el monitor de neutrones ubicado en Nain, en donde se observa que al parecer no existe influencia debida al sismo:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = -0,999413 \quad (3)$$

Interpretación del Coeficiente de Correlación

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.
- Si $r = -1$ existe una correlación negativa perfecta.

Prueba de Bondad de Ajuste

- Se realiza una prueba de hipótesis de la **importancia del coeficiente de correlación** para decidir si la relación lineal en los datos de la muestra es lo suficientemente fuerte como para usarla para modelar la relación en la población.
- La prueba de hipótesis nos permite decidir si el valor del coeficiente de correlación poblacional ρ es **cercano a cero** o **diferente de cero**.

Hipótesis Nula:

El coeficiente de correlación de la población NO ES significativamente diferente de cero. NO HAY una relación lineal significativa (correlación) entre X e Y en la población.

Hipótesis Alternativa:

El coeficiente de correlación de la población ES significativamente DIFERENTE DE CERO. HAY UNA RELACIÓN LINEAL SIGNIFICATIVA (correlación) entre X e Y en la población.

Cálculo del valor- p

Si el valor- p es menor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$):

→ **Decisión:** Se rechaza la hipótesis nula.

Si el valor- p NO es menor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$):

→ **Decisión:** NO se rechaza la hipótesis nula.

El valor- p se calcula utilizando una distribución t de Student, mediante

$$t = \frac{\rho\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (4)$$

Cálculo del valor- p

Recordemos que el coeficiente de correlación para el monitor de neutrones de Nain es:

$$\rho = -0,999413$$

Para el monitor de neutrones de South Pole:

$$\rho = -0,303758$$

Entonces los valores de la prueba estadística son:

$$t_{\text{Nain}} = \frac{(-.999413)\sqrt{23}}{\sqrt{1 - (-0.999413)^2}}$$

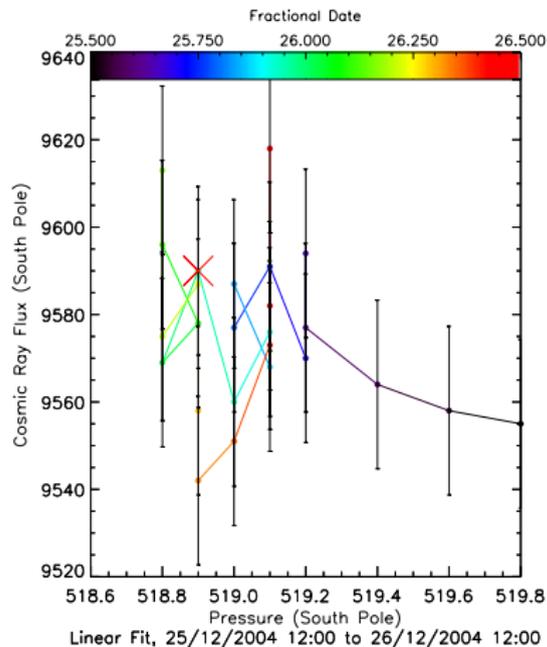
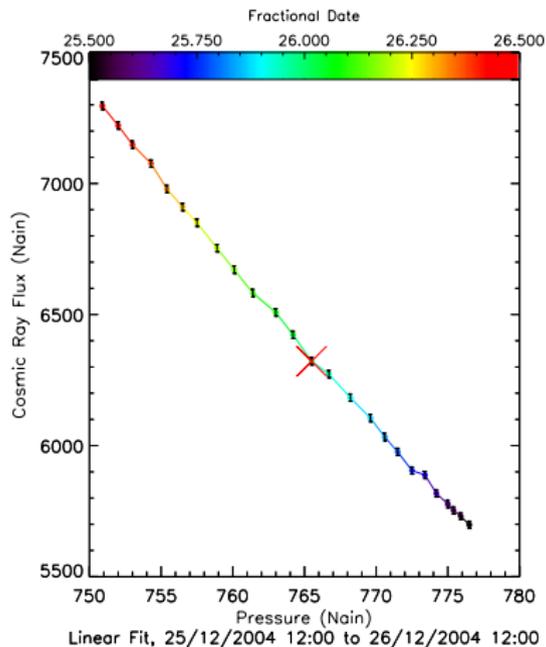
$$t_{\text{South Pole}} = \frac{(-0.303758)\sqrt{23}}{\sqrt{1 - (-0.303758)^2}}$$

Resultados de la Prueba de Hipótesis

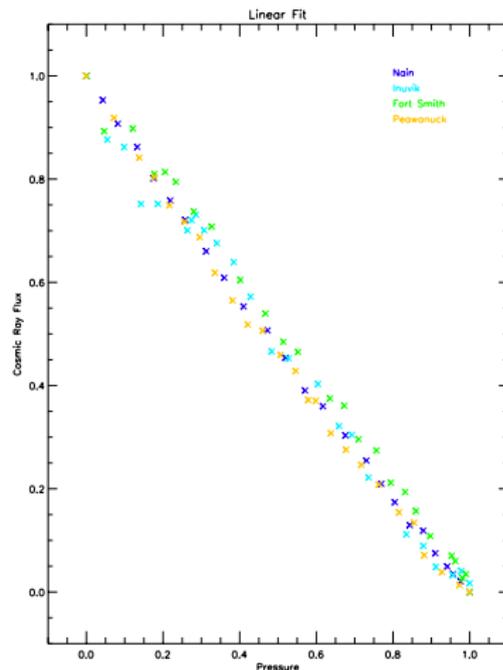
Para un valor de significancia $\alpha = 0,05$, se tiene lo siguiente:

- Para el monitor de neutrones de Nain, el valor- p es: $< .00001$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, esto quiere decir que **hay una relación lineal significativa**.
- Para el monitor de neutrones de South Pole, el valor- p es: $.14214$, por lo tanto no se rechaza nuestra hipótesis nula, esto nos indica que **NO hay una relación lineal significativa**.

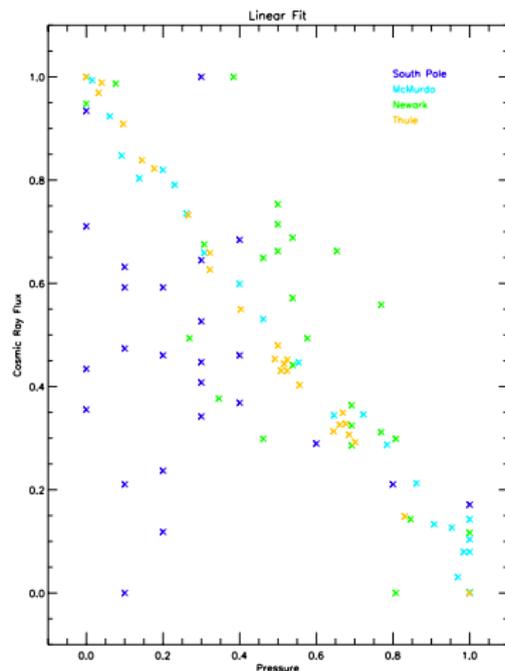
Comparación del FRC y la PA en tiempos cercanos al sismo para Nain y South Pole



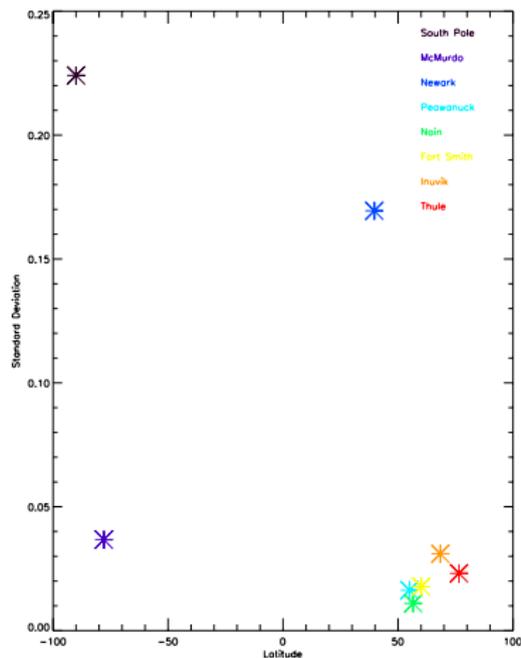
Comportamiento del Ajuste Lineal para distintos Monitores de Neutrones



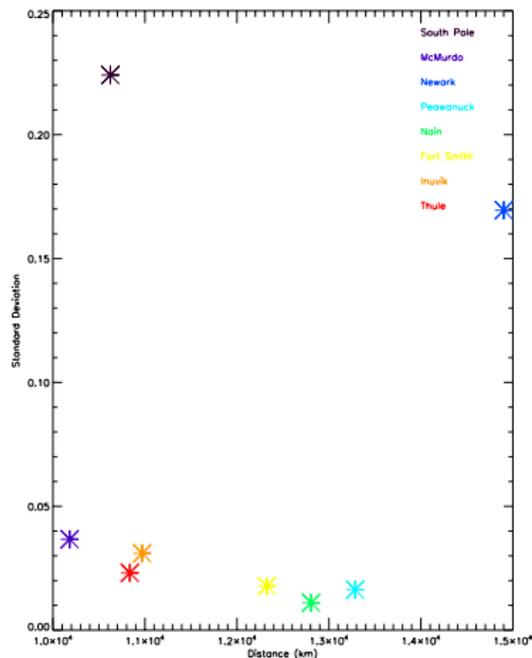
Comportamiento del Ajuste Lineal para distintos Monitores de Neutrones



Comportamiento de la Desviación Estándar con respecto a la Latitud



Comportamiento de la Desviación Estándar con respecto a la Distancia



Con los datos obtenidos se observa una tendencia en la desviación estándar para 6 monitores de neutrones, y otros 2 no se ajustan (South Pole y Newark), por lo que se requiere analizar datos de más monitores de neutrones.

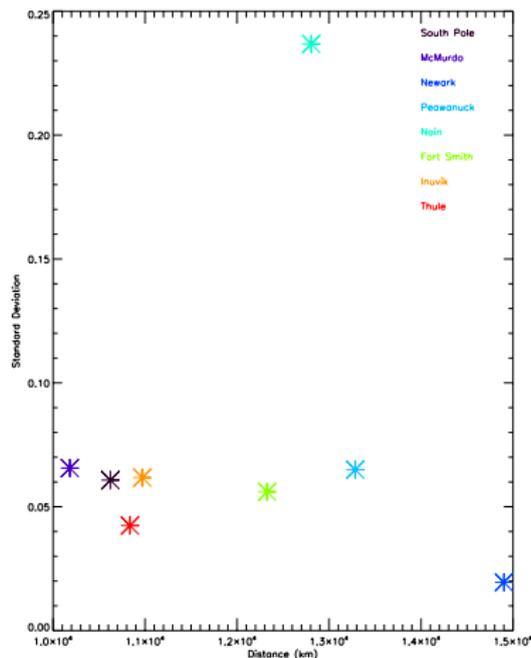
Trabajo a Futuro

- Revisar otros monitores de neutrones para el sismo registrado el 26 de diciembre de 2004.
- Realizar una nueva estadística para otros sismos con datos de diferentes monitores de neutrones.
- Analizar diferentes factores externos que pudieran afectar el flujo de rayos cósmicos como la actividad solar en tiempos cercanos a terremotos.
- Estudiar como son las variaciones de la pendiente del ajuste lineal del flujo de rayos cósmicos y la presión atmosférica con respecto a un fondo en el que no se registren cambios significativos en la anticorrelación lineal.

Gracias por su Atención

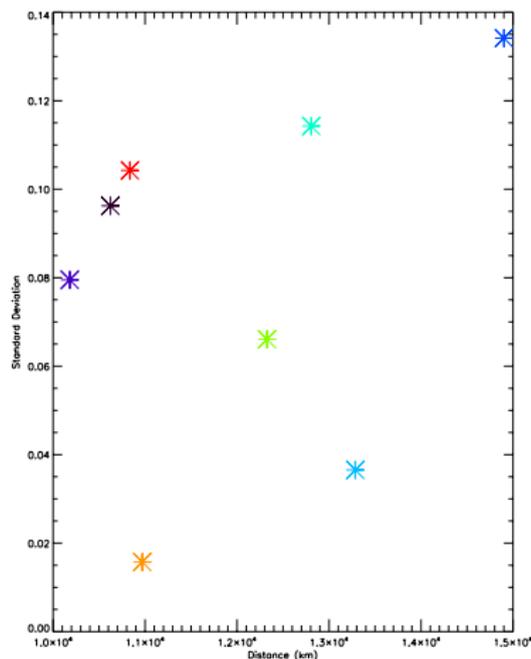


Desviación Estándar con respecto a la distancia, 10 de diciembre 2004



Desviación Estándar con respecto a la distancia,

16 de diciembre 2004



Referencias

- Sergey Pulinetz and Kirill Boyarchuk, Ionospheric Precursors of Earthquakes, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
- Volodichev NN, Kuzhevskii BM, Nechaev OY, Panasyuk MI, Podorolskii AN, Shavrin PI (2000) Solar-lunar-terrestrial links: Peaks of neutron emission and seismic activity. Solar Syst. Res. 34: 173-175.
- Volodichev NN, Podorolskii AN, Levin BV, Kuzhevskii BM (2001) Correlation of Appearance of Large Series of Earthquakes with the Phases of New and Full Moons. Vulkanol. Sesimol. No.1: 60-67
- Sobolev GA, Shestopalov IP, Kharin EP (1998) Implications of Solar Flares for the Seismic Activity of the Earth. Izvestiya, Phys. Solid Earth 34: 603-607
- Sobolev GA, Zakrzhevskaya NA, Kharin EP (2001) On the Relation between Seismicity and Magnetic Storms. Izvestiya. Phys. Solid Earth 37: 917-927