

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Acerca de la tesis de licenciatura

En el trabajo de tesis de licenciatura se analizaron los efectos de las variaciones de los parámetros del clima sobre el desarrollo en la atmósfera de las lluvias atmosféricas. Se analizaron datos del arreglo de detectores espaciados 1500 m entre sí, conocido como *arreglo principal*, del Observatorio Pierre Auger en el periodo 2005-2018, extendiendo así los periodos de tiempo estudiados anteriormente en los siguientes trabajos [1], [2] y [3]. Se emuló los resultados de la corrección de la modulación del clima sobre el periodo 2005-2015 de la colaboración Pierre Auger [3], obteniéndose resultados compatibles. Se observó que posterior a la corrección, la modulación del clima se vio disminuida. Para eventos con energía mayor a 2 EeV, esta modulación es despreciable.

En el mismo trabajo, se estudió la modulación del clima mediante el valor del  $S_{38}$  sin la corrección propuesta por trabajos anteriores. Se observó que los parámetros del clima obtenidos de estos datos son compatibles con los utilizados en la reconstrucción oficial. Se realizó una corrección de los efectos atmosféricos a la energía con estos coeficientes, observándose que la modulación era despreciable para energías mayores a 2 EeV al igual que la reconstrucción oficial.

### 1.2. Acerca del archivo con todos los disparos

El análisis anterior fue realizado sobre los eventos medidos por el arreglo principal utilizando el disparo estándar. Este disparo tiene una eficiencia completa para eventos de energía mayor a 2,5 EeV. Por lo que el análisis de anisotropías en el rango de energía entre 1 EeV - 2 EeV, requiere factores relacionados a la eficiencia función de la energía que se obteniendo de manera fenomenológica [4].

Para superar esta dificultad, a partir del año 2013 se implementó otros protocolos de disparo en el arreglo principal, llamados Mops y ToTs. Con esta mejora, la eficiencia completa se alcanza para una energía mayor a 1 EeV. De esta manera se aumenta la cantidad de eventos a estudiar en el rango 1 EeV - 2 EeV y no son necesarios factores relacionados a la eficiencia. La desventaja es que el disparo estándar tiene una mayor cantidad de datos ya que se adquieren datos desde el año 2004 con ese protocolo.

### 1.3. Acerca de los eventos

Para poder prescindir de los factores de corrección a los datos de los eventos, se aplican cortes a los datos para asegurar la eficiencia completa de los detectores. Por eso se implementan límites en

ángulo cenital, en la cantidad de vecinos al tanque de mayor señal, además de restringirse a los datos fueron medidos en condiciones normales, es decir cuando los sistemas de comunicación del Observatorio funciona sin inconvenientes.

A partir de los registros de eventos del arreglo principal con todos los disparos, se consideran solamente los eventos que cumplan las siguientes características:

1. Ángulo cenital  $\theta < 60^\circ$
2.  $ib = 1$  *Bad period flag*. Un valor de 1 indica un buen periodo en el cual los datos son recopilados sin inconvenientes.
3. Buena reconstrucción de la lluvia atmosférica asociada al evento
4. La cantidad de vecinos alrededor del tanque con mayor señal sea de 6 tanques.

## 1.4. Cálculo de los coeficientes de Fourier para el análisis de anisotropía en ascensión recta

### 1.4.1. Variaciones relativas de los hexágonos

Los pesos de los eventos son importantes para el cálculo de anisotropías, ya que las mismas son pequeñas y eliminar todo factor espúreo en el análisis es importante. Para una representación fiel entre los registros de los hexágonos y los pesos de los eventos, se optó por utilizar 288 segmentos ya que si consideramos para 24 hrs del día, cada segmento tiene un ancho de 5 min. Esto es conveniente ya que la actualización tanto del clima como de los hexágonos se realiza una vez cada 5 min.

Se establecen una frecuencia a estudiar  $f$  y el rango de tiempo de análisis, por ejemplo la frecuencia solar  $f_{Solar} = 365,25$  ciclos en un año entre los años 2013 y 2020.

Existe un registro del Observatorio de los hexágonos 6T5 que se actualiza cada 5 min. Cada dato tomado durante el rango seleccionado, se clasifica según la cantidad de horas  $t$  desde un momento de referencia  $t_0$ . Esta referencia  $t_0$  es el 1 de Enero del 2004 a las 00 : 00 : 00 GMT, o 21 hrs del 31 de Diciembre del 2003, según la hora local de Malargüe.

Podemos asociar una coordenada angular  $h$  a  $t$  y  $f$  utilizando la siguiente expresión

$$h = t \times \frac{360}{24} \times \frac{f}{f_{Solar}} + h_0 \quad (1.1)$$

El factor  $f/f_{Solar}$  sirve para hacer un escaleo de las horas entre diferentes frecuencias. Se usa como referencia la  $f_{Solar}$  dado que las horas (solares) se basan en esta frecuencia, y el valor de  $h_0 = 31,4971$  representa la ascensión recta del cenit en el momento utilizado como referencia.

Para simplificar el cálculo del peso de los hexágonos, se divide los  $360^\circ$  de la ascensión recta en  $L$  segmentos de  $360/L$  hrs cada uno. Para clasificar un dato se toma el valor  $h$  y se calcula

$$h' = h \bmod 360 \quad (1.2)$$

donde la función *mod* representa la función módulo. Luego con el valor de  $h'$  se asigna al dato con el segmento  $k$  correspondiente.

$$k = \left\lceil \frac{h'}{360} \times L \right\rceil \quad (1.3)$$

done  $\lceil a \rceil$  representa la función techo <sup>1</sup>. Por ejemplo, si optamos por  $L = 24$  y un registro en particular

<sup>1</sup>La función techo da como resultado el número entero más próximo por exceso

resulta con  $h = 395^\circ$ , esto implica que  $h' = 35$  hr y  $k = \lceil 2,3 \rceil = 3$ , por lo tanto, este registro corresponde al segmento en la 3ª posición.

Una vez clasificado todos los datos del registro de hexágonos, se calcula la suma  $N_{hex,j}$  de los registros de hexágonos que cayeron un segmento  $j$  dado.

Para definir la variación relativa de hexágonos  $\Delta N_{cell,k}$  de un segmento  $k$  en particular, se necesita la media de hexágonos por segmento:

$$\langle N \rangle = \sum_{i=1}^L \frac{N_{hex,i}}{L}, \quad (1.4)$$

una vez obtenido este valor, podemos calcular  $\Delta N_{cell,k}$ , como

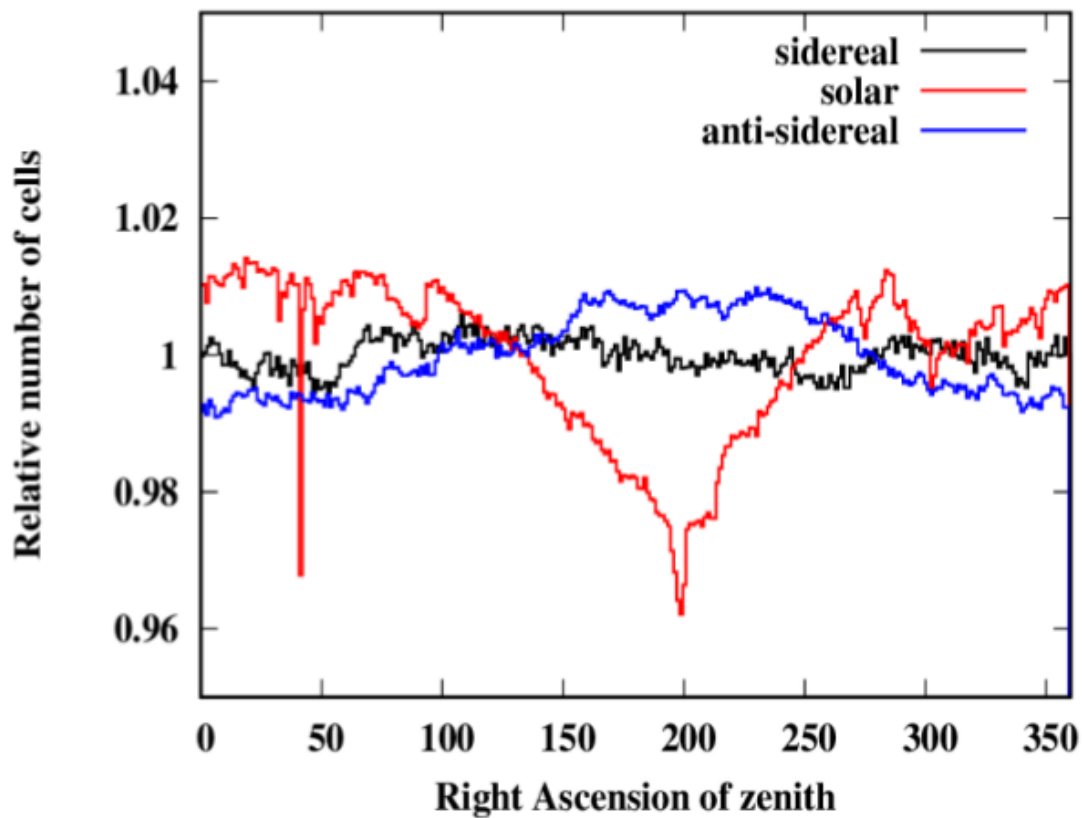
$$\Delta N_{cell,k} = \frac{N_{cell,k}}{\langle N \rangle} \quad (1.5)$$

En la Fig.1.1 se muestran las variaciones relativas de los hexágonos en función de la ascensión recta del cenit del observatorio para las frecuencias sidérea, solar y antisidérea. Este análisis fue realizado en el marco del trabajo [5] en el periodo 2004-2017.

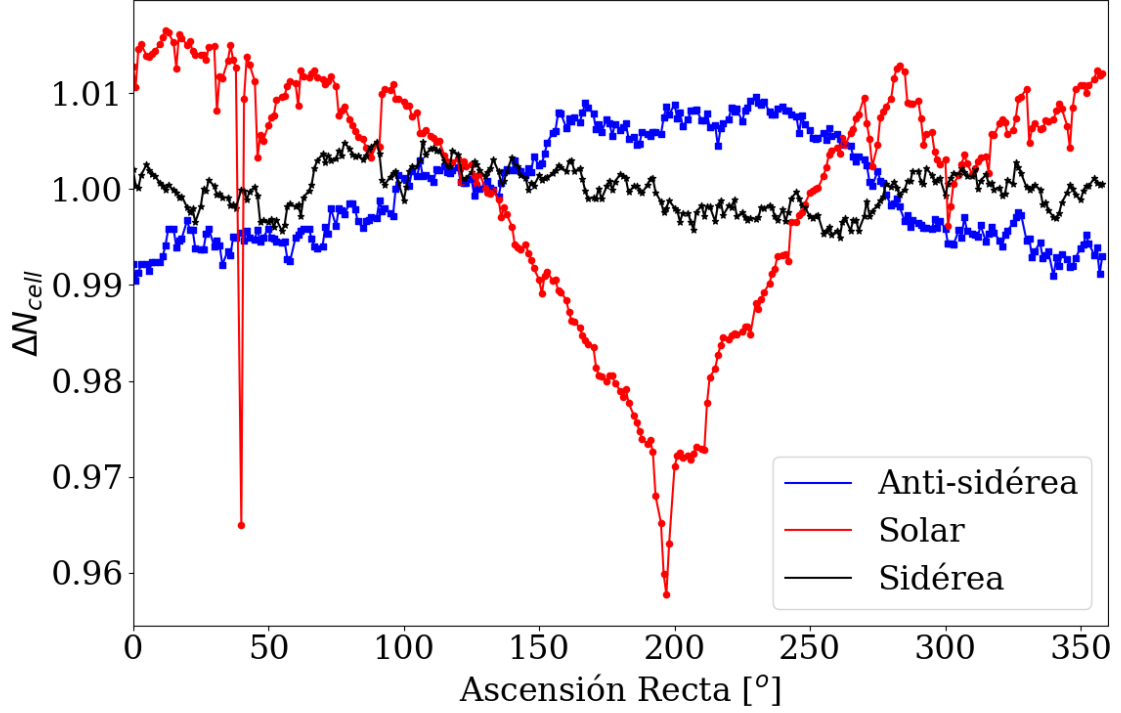
En la Fig.1.2 se observa valores obtenidos de  $\Delta N_{cell,k}$  en función de la ascensión recta del cenit para  $L = 288$  segmentos con el programa escrito para este informe, utilizando el mismo conjunto de datos que el utilizado para obtener los resultados la Fig.1.1 desde el 1 de Enero del 2004 a las 00 : 00 : 00 hrs GMT hasta el 1 de Enero del 2017 a las 00 : 00 : 00 hrs GMT. Se observa que estos los resultados obtenidos son compatibles con la Fig.1.1

## SD 1500 RELATIVE VARIATIONS OF ACTIVE CELLS

Bins of 5 min  
(1.25 deg) 2004 – 2017



**Figura 1.1:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [5].



**Figura 1.2:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo.

#### 1.4.2. Cálculo de Rayleigh para una frecuencia dada

1. Fijando un rango de tiempo y un rango de energía en el cual se desea estudiar la anisotropía, se establece una frecuencia en particular  $f$  a analizar.
2. Con los eventos ya filtrados según el criterio de la sección 1.3, asigno cada evento  $i$  un valor  $h_i$ , definida en la Ec.1.1
3. Para asignar el peso correspondiente al evento, se asocia a un segmento  $k$ , calculado en la sección 1.4.1, mediante el valor de  $h'_i$  definido en la Ec. 1.2. Luego, el peso asignado  $w_i$  al evento  $i$  es

$$w_i = (\Delta N_{cell,k})^{-1}$$

4. Para el análisis en frecuencias, a partir del valor de  $h_i$  se asigna un ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  como:

$$\tilde{\alpha}_i = 2\pi \frac{h}{24} + \alpha_i - \alpha_{cenit,i} \quad (1.6)$$

donde  $\alpha_i$  representa la ascensión recta del evento y  $\alpha_{cenit,i}$  la ascensión recta en el cenit del observatorio en el momento del evento. A partir de este ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  se realiza en análisis en frecuencias.

5. Para calcular los coeficientes de Fourier del primer armónico  $a$  y  $b$ , se siguen los siguiente pasos:

a) Por cada evento  $i$  se calculan los siguientes valores:

$$a'_i = w_i \cos \tilde{\alpha}_i \quad (1.7)$$

$$b'_i = w_i \sin \tilde{\alpha}_i \quad (1.8)$$

- b) Una vez que se obtuvieron los valores de  $a'_i$  y  $b'_i$  para todos los eventos en el rango de tiempo estudiado, se calculan los coeficientes mediante:

$$\mathcal{N} = \sum_i^{Eventos} w_i \quad (1.9)$$

$$a = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{Eventos} a'_i \quad (1.10)$$

$$b = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{Eventos} b'_i \quad (1.11)$$

6. Con los coeficientes es posible calcular la amplitud de la frecuencia estudiada  $\tilde{r}$  y la fase  $\phi$ . Otros parámetros calculados para el análisis son la probabilidad  $P(\tilde{r})$  de que la amplitud obtenida sea producto de una variación de ruido, y el valor de amplitud  $r_{99}$  para que dicha probabilidad sea del 1 %.

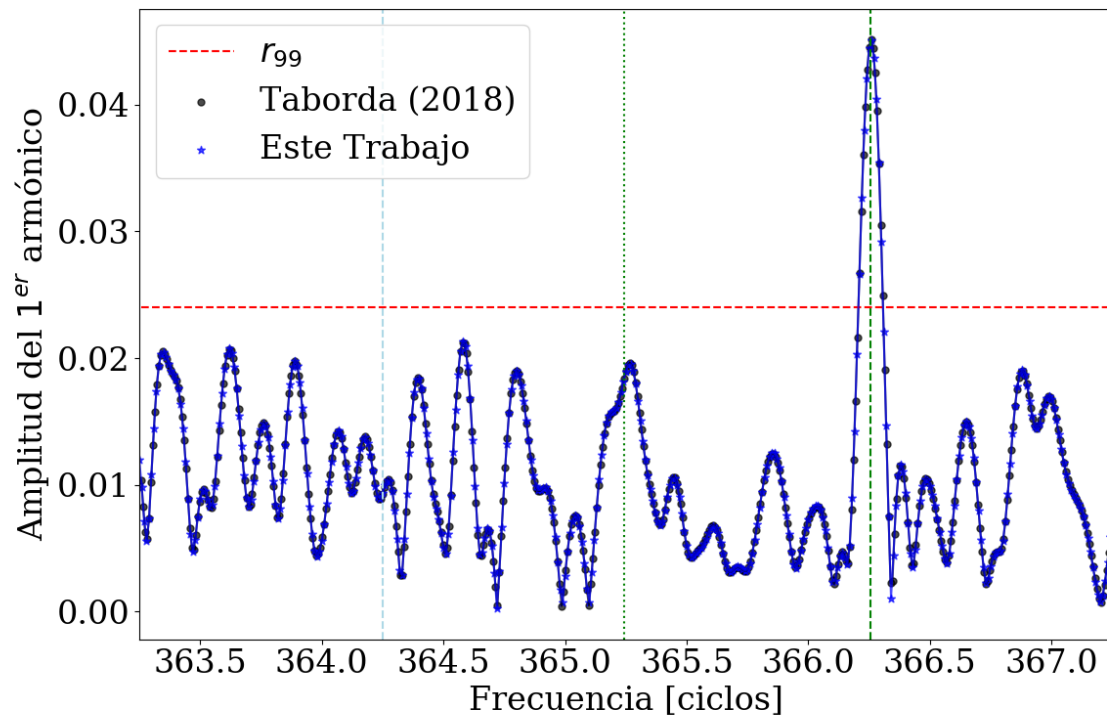
$$\tilde{r} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1.12)$$

$$\phi = \arctan \frac{a}{b} \quad (1.13)$$

$$P(\tilde{r}) = \exp(-\mathcal{N} \frac{\tilde{r}^2}{4}) \quad (1.14)$$

$$r_{99} = \sqrt{\frac{-4 \log(0,01)}{\mathcal{N}}} \quad (1.15)$$

Una forma de validar el código para el análisis de anisotropía es comparar los resultados del código con los obtenidos en otros trabajos [4]. En la Fig.1.3 se muestra el análisis hecho sobre el mismo conjunto de eventos. Estos eventos fueron adquiridos con el disparo estándar desde el 1 de Enero del 2004 a las 00 : 00 : 00 GMT hasta el 1 de Enero del 2017 a las 00 : 00 : 00 GMT. Se consideraron los eventos por encima de 8 EeV que además cumplan las condiciones dadas en la sección 1.3. En esta figura que los resultados obtenidos en [4] y con el código utilizado por este trabajo son indistinguibles.



**Figura 1.3:** Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [4] y con el código escrito para este trabajo.

## Capítulo 2

# Dipolo en el bin 1 EeV - 2 EeV

### 2.0.1. Características del conjunto de datos

Además de los filtros aplicados mencionados en la sección 1.3, se aplican filtros adicionales sobre la energía y el rango de tiempo. Para estudiar los eventos en esta sección, consideramos los eventos entre 1 EeV y 2 EeV de energía y que ocurrieron entre las 12 : 00 : 00 GMT del 1 de enero de 2004 y las 12 : 00 : 00 GMT del 1 de enero de 2020. Se optó por elegir ese rango de tiempo, dado que el registro de eventos más reciente al que se tuvo para hacer este trabajo termina el 1 de Enero del 2020 a las 8 : 59 : 43 GMT, además de para estudiar una cantidad entera de años, se optó por considerar los eventos desde el 1 de Enero del 2013 a las 12 : 00 : 00 GMT.

Un resumen de todos los filtros aplicados se encuentra a continuación

1. Son eventos obtenidos mediante todos los disparos.
2. Energía entre [1 EeV , 2 EeV)
3. Rango de tiempo:
  - Inicial: 1388577600 (Thursday, 1 January 2014 12:00:00 GMT)
  - Final: 1577880000 (Thursday, 1 January 2020 12:00:00 GMT)
4. Ángulo cenital  $\theta < 60^\circ$
5. 6T5
6.  $ib = 1$  Bad period flag. Un valor de 1 indica un buen periodo

Aplicando estos filtros, se tienen 1081 844 eventos para estudiar en este rango de energía.

### 2.0.2. Grafico de la anisotropia

Lo de agregar un desfase adrede al valor de  $h$  se puede hacer porque ya que para definir el valor del peso del evento, solo tiene que se debe ser consistente los valores de  $h$ . Lo que no estoy teniendo en cuenta al hacer esta afirmación es que es cuando calculo la coordenada angular sobre la que hago el analisis en frecuencia

$$\tilde{\alpha}_i = 2\pi \frac{h}{24} + \alpha_i - \alpha_{cenit,i}, \quad (2.1)$$

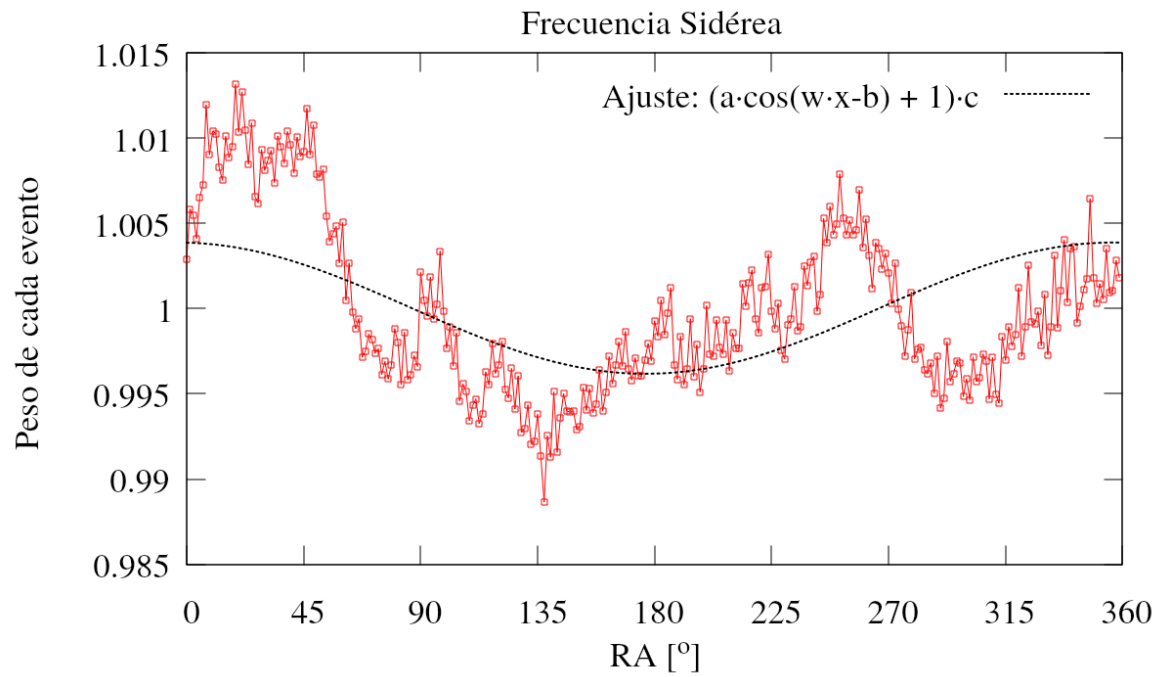
tiene en cuenta el valor de  $h$ . Probe en cambiar este desfase de 2 hr a otros valores arbitrarios para ver que pasaba. Lo que obtuve fue que la amplitud  $r$  en el analisis de anisotropia se mantiene igual, pero la fase cambia. Los valores que muestro a continuación son dejando el desfase de  $h$  como 2 hr.



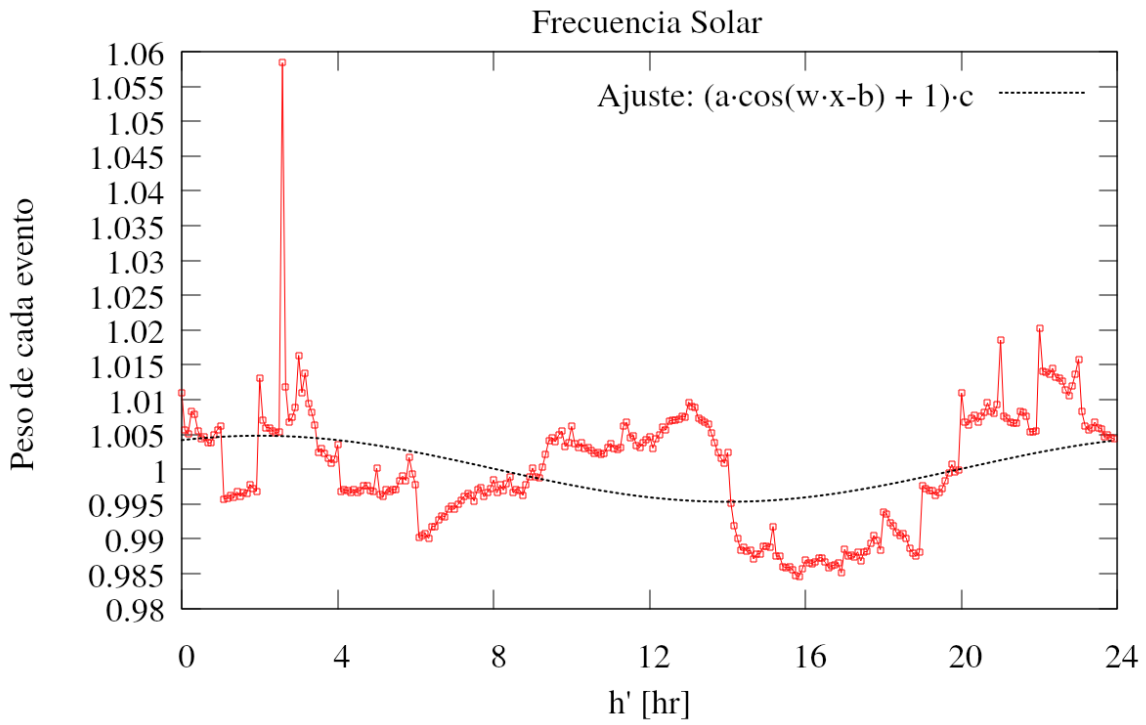
Tabla comparando:

	Solar	Siderea
Fase $\phi$	30(7)	356(5)
Amplitud $a$	0.0047(6)	0.0038(6)

**Tabla 2.1:** tabla

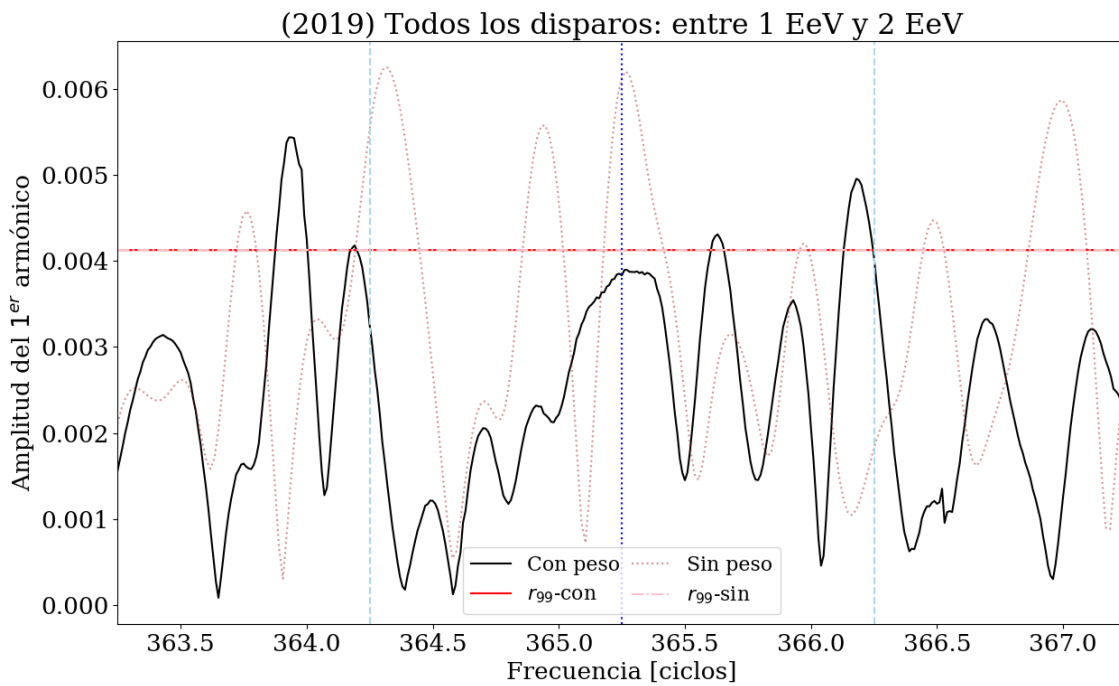


**Figura 2.1:** El ajuste hecho a la frecuencia sidérea usando el valor de  $h$  para clasificar.



**Figura 2.2:** El ajuste hecho a la frecuencia sidérea usando el valor de la ascensión recta para clasificar.

### Análisis de anisotropías en ascensión recta



**Figura 2.3:** Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos

	Solar (sin peso)	Siderea (sin peso)
Fase $\phi$	224.681	335.104
Amplitud $r$	0.00706339	0.00404635

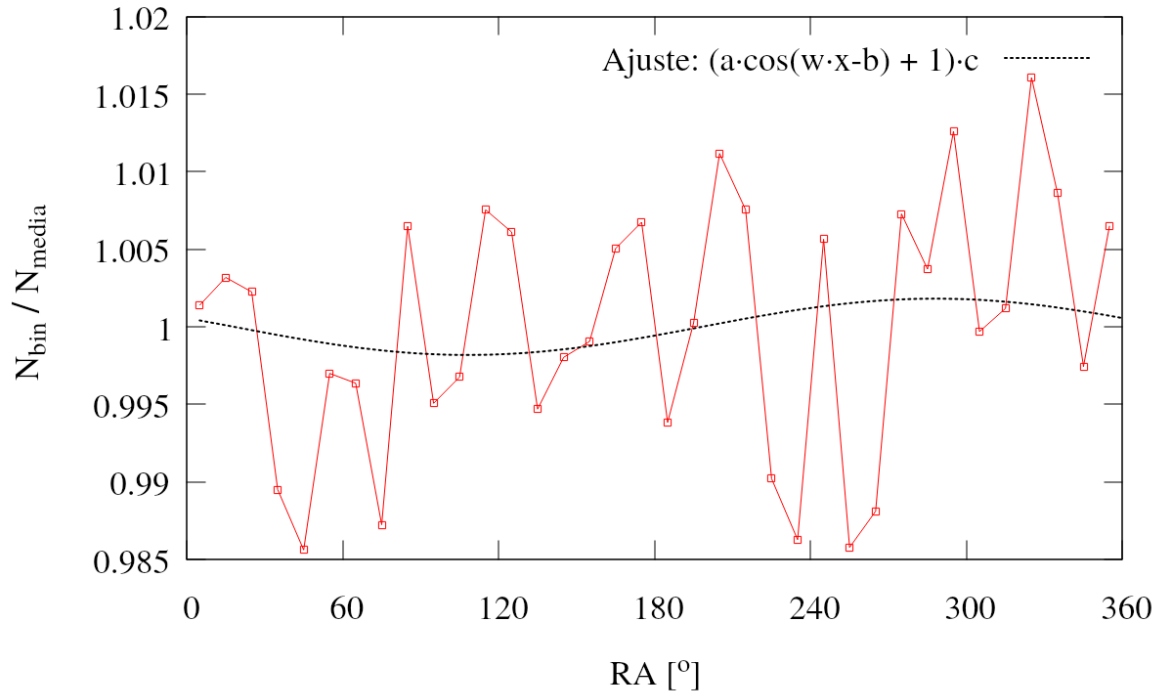
**Tabla 2.2:** Tabla

	Solar (con peso)	Siderea (con peso)
Fase $\phi$	286.567	335.104
Amplitud $r$	0.00383264	0.00404635

**Tabla 2.3:** Tabla

### Bineado de eventos (va a ir al final)

Clasificando a los eventos mencionados en la sección 2.0.1 según el valor de la ascensión recta



**Figura 2.4**

Si realizamos un ajuste de una función del tipo  $f(x) = c \cdot (1 + a \cdot \cos(\omega x - \phi))$ , se obtiene los siguientes valores

Fase  $\phi$  : 288(60)<sup>o</sup>

Amplitud  $a$ : 0.002(2)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sí, el error es del 100 % para el ajuste.

## Apéndice A

# Cosas para hacer: Mails con Mollerach

Fecha: 27/05/2020

el test que queriamos hacer para ver si son compatibles las amplitudes de Fourier del primer armonico con y sin peso con la modulacion de los pesos no estaria funcionando. La idea es que si sumas vectorialmente un vector con amplitud igual a amplitud del primer armonico sin pesos apuntando en la direccion de la fase sin pesos mas otro vector con amplitud igual a la del fit a los pesos de los eventos apuntando en la fase del maximo del coseno, el vector suma deberia tener amplitud igual a la amplitud del analisis de fourier con pesos y apuntar en la direccion de la fase de ese analisis. No se en cual de los pedazos estara el error.

Fecha 15-06-2020

- Es que cada evento va pesado con los hexagonos del momento en que el evento fue registrado. El RA del cenit de Malargue en ese momento te dice cual es la correspondencia con el bin de los hexagonos que hay que usar. No se puede a ojo sumar o restar 2hs o lo que sea.
- A lo mejor no te estoy entendiendo bien lo que decir de las 2hs que agregaste, pero no hay nada arbitrario en la frecuencia siderea, hay que poner todo consistentemente.

# Bibliografía

- [1] Abraham, J., Abreu, P., Aglietta, M., Aguirre, C., Ahn, E., Allard, D., *et al.* Atmospheric effects on extensive air showers observed with the surface detector of the pierre auger observatory. *Astroparticle Physics*, **32** (2), 89–99, 2009.
- [2] Abreu, P., Aglietta, M., Ahlers, M., Ahn, E., Albuquerque, I. F. d. M., Allard, D., *et al.* Description of atmospheric conditions at the pierre auger observatory using the global data assimilation system (gdas). *Astroparticle Physics*, **35** (9), 591–607, 2012.
- [3] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I., Allekotte, I., *et al.* Impact of atmospheric effects on the energy reconstruction of air showers observed by the surface detectors of the Pierre Auger Observatory. *Journal of Instrumentation*, **12** (02), P02006, 2017.
- [4] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger, 2017.
- [5] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Albuquerque, I. F. M., Albury, J. M., *et al.*, I. A. Large-scale cosmic-ray anisotropies above 4 EeV measured by the pierre auger observatory. *The Astrophysical Journal*, **868** (1), 4, nov 2018. URL <https://doi.org/10.3847/2F1538-4357%2Faae689>.

