

# TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS FÍSICAS

## INFORME DE AVANCE

**Evelyn G. Coronel**  
Maestrando

**Dra. Silvia Mollerach**  
Directora

**Miembros del Jurado**  
Dr. Diego Harari (Instituto Balseiro)

25 de Junio de 2020

Partículas y Campos – Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina



# Índice de símbolos

CR:	Rayos cósmicos ( <i>Cosmic Rays</i> )
SD:	Detector de Superficie ( <i>Surface Detector</i> )
EAS:	Lluvia Atmosférica Extendida ( <i>Extensive Air Shower</i> )
S(1000):	Señal a 1000 m del núcleo de la lluvia y al nivel del suelo
S(1000) <sub>w</sub> :	Señal de S(1000) corregida por la modulación del clima.
S <sub>38</sub> :	Señal a 1000 m del núcleo y al nivel del suelo si el ángulo cenital del evento fuera de 38°
S <sub>38,w</sub> :	Señal S <sub>38</sub> corregida por la modulación del clima
eV:	electrón Voltio, $1\text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$
EeV:	$1\text{ EeV} = 10^{18}\text{ eV}$
ICRC:	Conferencia Internacional de Rayos Cósmicos ( <i>International Cosmic Ray Conference</i> )



# Índice de contenidos

Índice de símbolos	ii
Índice de contenidos	v
Índice de figuras	vi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Acerca de todos los disparos del SD . . . . .	1
1.2. Acerca de los eventos . . . . .	2
1.2.1. Acerca del registro de hexágonos . . . . .	3
1.3. Acerca de la tesis de licenciatura . . . . .	3
<b>2. Métodos</b>	<b>4</b>
2.1. Cálculo de los coeficientes de Fourier para el análisis de anisotropía en ascensión recta	4
2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos . . . . .	4
2.1.2. Cálculo de Rayleigh en ascensión recta para una frecuencia dada . . . . .	7
<b>3. Dipolo en el rango 1 EeV - 2 EeV</b>	<b>9</b>
3.1. Características del conjunto de datos . . . . .	9
3.2. Pesos de los eventos para frecuencias de referencia . . . . .	11
3.2.1. Gráficos de los ajustes . . . . .	11
3.2.2. Tabla comparando los ajustes: . . . . .	13
3.3. Gráfico de la anisotropía . . . . .	13
<b>Bibliografía</b>	<b>15</b>



# Índice de figuras

1.1. Histograma de eventos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger .	2
2.1. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [1]. . . . .	6
2.2. Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo. . . . .	6
2.3. Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [2] y con el código escrito para este trabajo. . . . .	8
3.1. Diferencia entre las energías de entre la reconstrucción del 2017 y del 2019 . . . . .	10
3.2. Calibración de las energías del archivo de 2017 y el archivo del 2019 . . . . .	10
3.3. Variaciones de los hexágonos para frecuencias características en rango mencionado. . .	11
3.4. Ajuste de los pesos de los eventos para varias frecuencias a primer orden en ascensión recta . . . . .	12
3.5. Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos . . . . .	13
3.6. Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta. . . . .	14





# Capítulo 1

## Introducción

La parte superior de la atmósfera terrestre esta siendo constantemente bombardeada con partículas de energía del orden de los  $10^{10}$  eV para arriba. Estas partículas son conocidas como rayos cósmicos (RC) y han sido medidas desde mediados del año 1961 [3], pero los mecanismos que las producen y sus zonas donde se originan siguen siendo investigadas (citar experimentos).

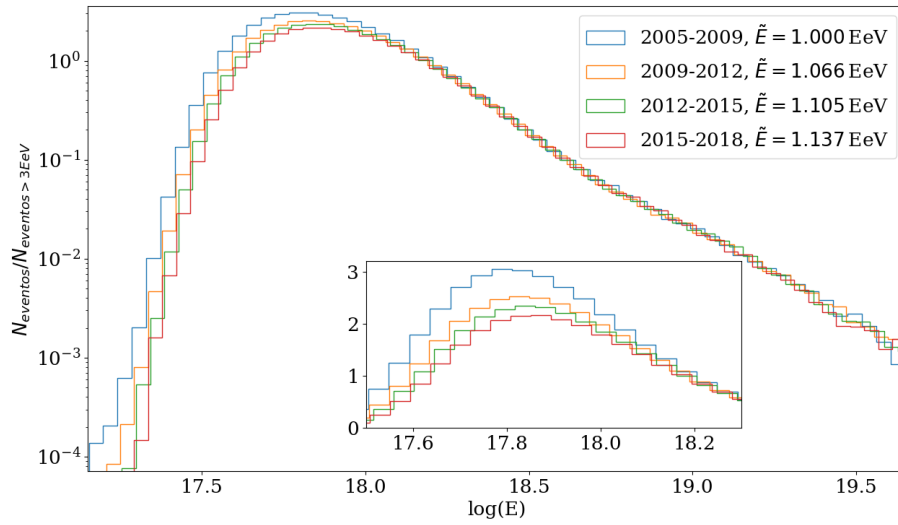
Por encima de una energía de  $\sim 10^{14}$  EeV, los RCs que llegan a la atmósfera producen cascadas de partículas secundarias que pueden llegar hasta la superficie de la Tierra. Estas cascadas son conocidas como lluvia atmosférica extendida o EAS. Estas lluvias contienen un componente electromagnética, que consiste en electrones, positrones y fotones, y una componente muónica que pueden ser medidas usando detectores de partículas sobre la superficie. Las partículas cargadas también pueden excitar moléculas de nitrógeno en el aire que producen fotones de fluorescencia, que pueden ser observadas por telescopios durante noches claras.

El observatorio Pierre Auger está ubicado en la ciudad de Malargüe, provincia de Mendoza. El mismo fue construido para detectar las partículas secundarias de la EAS producidas por RCs con energía por encima de 0,1 EeV. El observatorio posee un sistema híbrido de detección, ya que combina un arreglo de detectores de partículas superficiales y un conjunto de telescopios que detectan los fotones de fluorescencia.

Los análisis presentados en este trabajo fueron realizados con los eventos obtenidos por  $\sim 1600$  detectores Cherenkov, dispuestos en una superficie de  $\sim 3000 \text{ km}^2$  en un arreglo de forma hexagonal a una distancia de 1500 m entre sí, esta disposición de tanques se menciona como *arreglo principal*. Cada detector en un tanque cilindro con 12 toneladas de agua ultra-pura de 1,2 m de alto, en la parte superior del tanque tiene 3 foto-multiplicadores que monitorean la radiación Cherenkov en el agua. El conjunto del tanque con la electrónica de detector se menciona durante el trabajo como *Surface Detector* o *SD*. Cada detector está midiendo constantemente los fotones en el agua. Muchos de los estos fotones son producidos por ruido y otros por partículas secundarias de una EAS. Los SDs cuentan con algoritmos o reglas para discernir ruido de un evento causado por un rayo cósmico, estos son los algoritmos de disparo (cite).

### 1.1. Acerca de todos los disparos del SD

A medida que los tanques pasan más tiempo midiendo, también van perdiendo sensibilidad a los eventos de bajas energías. Esto es una desventaja del disparo estándar en los SDs en el rango 1 EeV - 2 EeV. En la Fig.1.1, para los datos presentados en el ICRC 2019, se observa como la energía media de los eventos para distintos rangos de tiempo va aumentando con el tiempo. Además que la proporción de eventos por debajo de 3 EeV disminuye.



**Figura 1.1:** Histograma de eventos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger

El análisis del trabajo de licenciatura fue realizado sobre los eventos medidos utilizando el disparo estándar del arreglo principal, cuya eficiencia varía con la energía del CR. Para el disparo estándar, los eventos con energía mayor a 3 EeV y  $\theta_{max} < 60^\circ$  o por encima de 4 EeV y  $\theta_{max} < 80^\circ$ , son detectados con una eficiencia del 100 %. Por lo tanto, el análisis de anisotropías en el rango de energía entre 1 EeV - 2 EeV, se requieren factores relacionados a la eficiencia del disparo en función de la energía. Estos factores son obtenidos de manera fenomenológica [2].

Para superar esta dificultad y para poder recuperar la sensibilidad para bajas energías, a partir del año 2013 se implementó otros algoritmos de disparo en los SDs, llamados ToTd y MoPS [5]. Estos algoritmos de disparo se mencionan en este trabajo como *todos los disparos*. La implementación de los ToTd y MoPS fue llevada a cabo mediante una actualización de la electrónica de los SDs para bajar el umbral de disparo, en particular para las señales de la componente electromagnética de la EAS, mejorando la reconstrucción mediante la separación fotón/hadrón para bajas energías. Con esta mejora, la eficiencia completa se alcanza a partir de una energía mayor a 1 EeV. De tal manera que, al estudiar los eventos en el rango 1 EeV - 2 EeV, no son necesarios los factores de eficiencia y sólo pueden afectar los cambios de la exposición del observatorio.

Una desventaja de todos los disparos sobre el disparo estándar, es que el último tiene una mayor cantidad de años medidos en el rango 1 EeV - 2 EeV, ya que se adquieren datos desde el año 2004 con ese algoritmo. Esto es conveniente ya que mientras más años han sido medidos es más factible efectos espúreos se cancelen. En cambio, para todos los disparos, el análisis de anisotropía con todos los disparos solo es posible desde el año 2013. Entre inicios del 2004 y finales del 2019, el conjunto de eventos del disparo estándar tiene 6 975 194 eventos sin clasificar. En cambio entre mediados del 2013 hasta fines del 2019, el archivo de eventos para todos los disparos tiene 13 739 351 eventos. El menor tiempo se compensa con la eficiencia de todos los disparos.

## 1.2. Acerca de los eventos

Se aplican cortes a los eventos para asegurar la eficiencia completa de los detectores. Estos cortes implican límites en ángulo cenital  $\theta$  de los eventos, en la cantidad de vecinos al tanque de mayor señal, además de restringirse a eventos medidos en condiciones normales, es decir, cuando los sistemas de comunicación del Observatorio funciona sin inconvenientes. De esta manera, podemos prescindir de

otros factores de corrección.

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. La calidad de la reconstrucción depende de la energía y del ángulo cenital  $\theta$  del evento. Para eventos por debajo de los 4 EeV, se consideran los eventos con  $\theta < 60^\circ$ , en cambio para eventos por encima de esta energía se consideran  $\theta < 80^\circ$ .
2. Los datos del evento son recopilados sin inconvenientes. Este filtro se conoce como *Bad period flag* o *ib*. Un valor de 1 indica un buen periodo.
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, es decir, que el tanque de mayor señal este en el interior de un hexágono de tanques activos. Estos eventos se conocen como *eventos 6T5*.

### 1.2.1. Acerca del registro de hexágonos

La cantidad de los hexágonos activos sobre el observatorio está relacionado con el filtro de eventos 6T5, que garantiza la calidad de la reconstrucción del evento. El observatorio lleva un registro de la cantidad de hexágonos activos cada 5 min, además de registrar las condiciones atmosféricas en distintas estaciones de clima sobre la superficie del observatorio.

## 1.3. Acerca de la tesis de licenciatura

Durante la tesis de licenciatura se analizaron los efectos de las condiciones atmosféricas durante el desarrollo de las EAS. Se analizaron los datos adquiridos durante en el periodo 2005-2018 por el arreglo principal. De esta manera, se extendió los periodos estudiados anteriormente en los siguientes trabajos [6], [7] y [8].

Los efectos atmosféricos afectan principalmente a la atenuación longitudinal y lateral de la componente electromagnética de la EAS, en particular dependen fuertemente de la temperatura y presión. Estos efectos del clima sobre los eventos se caracterizan por parámetros dependientes de la presión, densidad y temperatura del momento de la detección del evento. Los mismos también dependen del ángulo cenital de los eventos y se utilizan para corregir las señales registradas por los SDs. Las correcciones del clima utilizadas por la colaboración Pierre Auger fueron implementadas a partir del trabajo [8].

Durante el trabajo de la licenciatura se imitó el análisis de la modulación del clima sobre el periodo 2005-2015 de [8], obteniéndose resultados compatibles. También se estudió la modulación del clima mediante el valor del  $S_{38}$  sin la corrección propuesta por [8] aumentando el rango de tiempo analizado hasta el 2018. Se observó que los parámetros del clima obtenidos en este análisis sobre  $S_{38}$  son compatibles con los utilizados en la reconstrucción oficial.

# Capítulo 2

## Métodos

La información sobre el origen de los RCs puede ser obtenida mediante el estudio de sus direcciones de arribo, también mediante el espectro de energía y sus composición de masa (cite y cite), aunque se espera que la evidencia más directa de la localización de su origen sea mediante el estudio de la distribución de las direcciones de arribo. La búsqueda de anisotropías a grandes escalas angulares suelen ser hechas sobre las irregularidades de la distribución de eventos en ascensión recta  $\alpha$  ya que el arreglo principal tiene una exposición en función de este coordenada es casi constante [4].

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

Las anisotropías son variaciones pequeñas sobre el flujo casi isotrópico de CRs, por lo que eliminar todo factor espúreo en el análisis es importante. Podemos definir un peso  $w_i$  por cada evento  $i$ , que corrige la variación de la exposición direccional  $\Delta N_{cell}(\alpha^0)$  en función de la ascensión recta del cenit del observatorio  $\alpha^0$  durante el rango de tiempo estudiado. Estas variaciones pueden deberse al crecimiento del arreglo a través de los años, por caídas en la comunicación del observatorio con los SDs u otros motivos.

El factor  $\Delta N_{cell}(\alpha^0)$  tiene en cuenta que la exposición direccional el observatorio no es uniforme en tiempo sidéreo. Se obtiene sumando el número de celdas durante el periodo de medición, con eventos descartados con tiempo muerto debido a probables de alimentación o problemas de comunicación o adquisición. El número total de celdas en cada segmento de  $\alpha^0$  es normalizada a valor medio. Este término afecta solamente el análisis de Fourier en ascensión recta.

Si este efecto no es corregido, dan lugar a una aparente está dado por un error sistemático en la adquisición de datos y no por fluctuaciones sobre el flujo de CRs. (REDACTAR) Además esta variación puede modular el número de eventos en función del tiempo y aparecer como una anisotropía.

#### 2.1.1. Variaciones relativas de los hexágonos

(REDACTAR) Acá quiero que se entienda que estos pasos son para rango y frecuencias bien específicas.

Para calcular estos pesos  $w_i$ , se sigue el algoritmo presentado a continuación:

1. Se establecen una frecuencia  $f$  y un rango de tiempo a estudiar, por ejemplo la frecuencia solar  $f_{Solar} = 365,25$  ciclos por año entre los años 2013 y 2019.

2. Cada dato del registro de hexágonos, tomado en un momento  $t$  durante el rango seleccionado, se clasifica según la cantidad de horas desde un momento de referencia  $t_0$ . Esta referencia  $t_0$  es el 1 de Enero del 2005 a las 00:00:00 GMT, o 21 hs del 31 de Diciembre del 2004, según la hora local de Malargüe.

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

$$h = (t - t_0) \times \frac{360^\circ}{24\text{hs}} \times \frac{f}{f_{\text{Solar}}} + h_0 \quad (2.1)$$

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

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

$$h' = h \bmod 360 \quad (2.2)$$

donde la función *mod* representa la función módulo que devuelve un número real positivo. Con el valor de  $h'$  del dato, se asigna el mismo al segmento  $k$  que le corresponde, mediante la siguiente expresión

$$k = \left\lceil \frac{h'}{360} \times L \right\rceil \quad (2.3)$$

donde  $\lceil a \rceil$  representa la función techo <sup>1</sup>. Por ejemplo, si optamos por  $L = 24$  y un dato en particular resulta con  $h = 395^\circ$ , esto implica que  $h' = 35^\circ$  y que  $k = \lceil 2.3 \rceil = 3$ , por lo tanto, este registro corresponde al segmento en la 3ª posición.

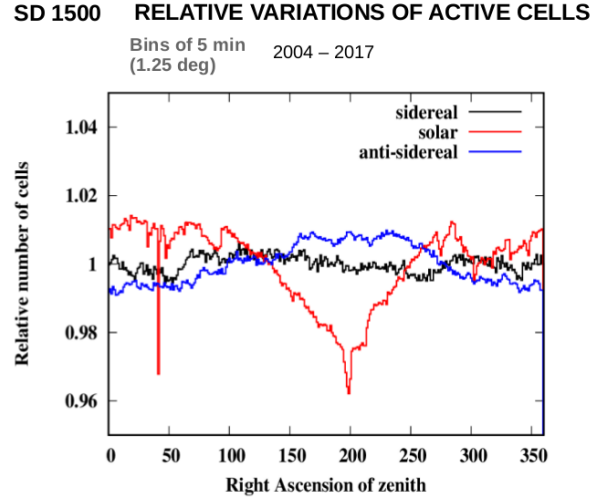
5. Una vez clasificados todos los datos del registro de hexágonos, se calcula la suma  $N_{\text{hex},j}$  de los datos que cayeron un segmento  $j$  dado. Para definir la variación relativa de hexágonos  $\Delta N_{\text{cell},k}$  de un segmento  $k$  en particular, se necesita la media de hexágonos por segmento  $\langle N \rangle$  para normalizar las variaciones.

$$\langle N \rangle = \sum_{i=1}^L \frac{N_{\text{cell},i}}{L} \quad \Delta N_{\text{cell},k} = \frac{N_{\text{cell},k}}{\langle N \rangle} \quad (2.4)$$

Se toman las frecuencia anti-sidérea ( $f_a = 364,25$  ciclos), solar ( $f_{\text{Solar}} = 365,25$  ciclos) y sidérea ( $f_{\text{sid}} = 366,25$  ciclos) como referencia. En la Fig.2.1 se muestran las variaciones relativas de los hexágonos en función de la ascensión recta del cenit del observatorio para las frecuencias mencionadas. Este análisis fue realizado en el marco del trabajo [1] con eventos del periodo 2004-2017.

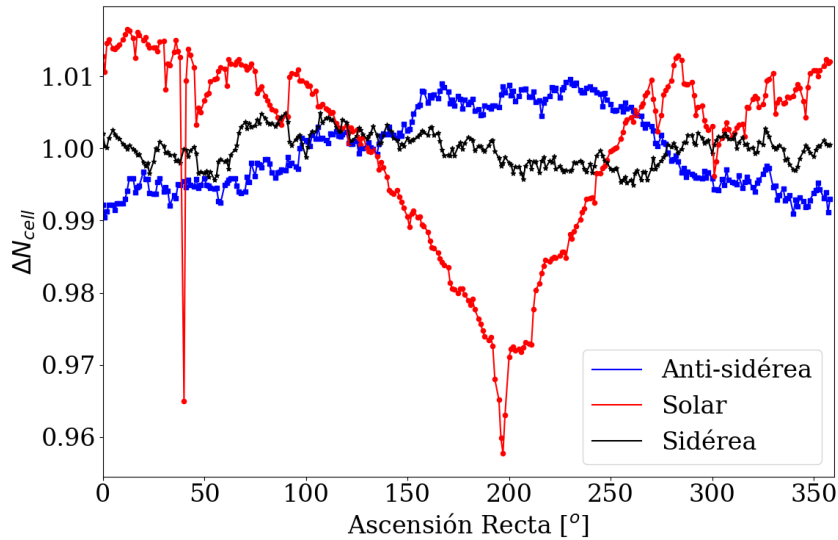
---

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



**Figura 2.1:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [1].

En la Fig.2.2 se observan los valores obtenidos de  $\Delta N_{cell,k}$  con el código escrito para este trabajo, en función de la ascensión recta del cenit para  $L = 288$  segmentos. Se analizó el conjunto de datos utilizado para obtener los resultados la Fig.2.1, con el fin de validar dicho código. Los datos se analizaron 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 observa que estos los resultados obtenidos son compatibles con la Fig.2.1



**Figura 2.2:** Valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo.

Para la frecuencia solar, se observa una variación apreciable con respecto al 1. Esto se debe a un problema en la

Para una representación fiel entre los registros de los hexágonos y los pesos de los eventos, se optó por clasificar los datos de los hexágonos en 288 segmentos, donde cada segmento tiene un ancho de  $1,25^\circ$ . Esto es conveniente ya que la actualización del registro de hexágonos se realiza una vez cada 5 min como se menciona en la sección 1.2.1. Esta tasa de actualización es equivalente a decir que la adquisición se realiza cada vez que el cenit del observatorio barre  $1,25^\circ$  en ascensión recta sobre la esfera celeste.

### 2.1.2. Cálculo de Rayleigh en ascensión recta para una frecuencia dada

Un procedimiento para estudiar anisotropías en la direcciones de los RCs es realizar un análisis de Fourier en ascensión recta  $\alpha$ . La distribución en ascensión recta  $\alpha$  del flujo de RCs  $I(\alpha)$  que llega al arreglo principal puede caracterizarse por las amplitudes  $r_k$  y fases  $\phi_k$  de su expansión en serie de Fourier al  $k$ -ésimo orden.

$$I(\alpha) = I_0 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k \cos [k(\alpha - \phi_k)] \right) = I_0 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\alpha + b_k \sin k\alpha \right) \quad (2.5)$$

donde  $a_k = r_k \cos \phi_k$  y  $b_k = r_k \sin \phi_k$ , y  $I_0$  es el flujo medio. La distribución  $I(\alpha)$  puede obtenerse a partir de la distribución de direcciones de arribo de los eventos observados. (REDACTAR) En este trabajo, se considera que todos los eventos  $N$  tienen una distribución uniforme en ascensión recta, es decir,  $dN/d\alpha = \sum_{i=1}^N \delta(\alpha - \alpha_i)$  [2].

Los análisis en ascensión recta están asociados a la frecuencia sidérea. Para realizar el análisis de los eventos en cualquier frecuencia arbitraria, es necesario modificar  $\alpha$  por  $\tilde{\alpha}$ . Esta nueva variable tiene la forma como se utiliza en el trabajo [2]:

$$\tilde{\alpha} = 2\pi f_x t_i + \alpha_i - \alpha_i^0(t_i) \quad (2.6)$$

donde  $f_x$  es la frecuencia arbitraria a estudiar,  $t_i$  es el momento en que ocurrió el evento y  $\alpha_i^0(t_i)$  es la ascensión recta del cenit del observatorio en el momento del evento. Si la frecuencia a analizar es la sidérea, el análisis con  $\alpha$  y  $\tilde{\alpha}$  arrojan los mismos parámetros  $r_k$  y  $\phi_k$ .

Por lo discutido en la sección anterior, puede existir una modulación debido a las variaciones de la exposición direccional. (REDACTAR) Clasificando a los eventos mencionados en la sección 3.1 según el valor de la ascensión recta y considerando que todos los eventos tienen un peso uniforme de  $w_i = 1$ , se dicen que los eventos fueron analizados *sin pesos*, donde no consideramos la corrección de la exposición. En caso contrario, se habla de análisis *con pesos* de los hexágonos y estos pesos se calculan como se menciona en la sección anterior.

Para realizar el análisis de frecuencias de los eventos, a primer orden en la expansión de Fourier, se siguen los siguientes pasos.

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 1.2, asigno cada evento  $i$  un valor  $h_i$ , definida en la Ec.2.1
3. En caso de considerar los pesos de los hexágonos, para asignar el peso correspondiente al evento, se asocia a un segmento  $k$ , calculado en la sección 2.1.1, mediante el valor de  $h'_i$  definido en la Ec. 2.2. Luego, el peso asignado  $w_i$  al evento  $i$  es:  $w_i = (\Delta N_{cell,k})^{-1}$ , caso contrario, se toman que todos los eventos tiene  $w_i = 1$ .
4. (REDACTAR) de tal forma que tenga información de la frecuencia, por ejemplo en  $h$  esta la info de la freq) Para el análisis en frecuencias, a partir del valor de  $h_i$  se asigna el ángulo  $\tilde{\alpha}_i$  definida en la Ec.2.6. La implementación en el código es de la siguiente manera:

$$\tilde{\alpha}_i = 2\pi \frac{h}{24} + \alpha_i - \alpha_{cenit,i} \quad (2.7)$$

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.

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:

$$a'_i = w_i \cos \tilde{\alpha}_i \quad b'_i = w_i \sin \tilde{\alpha}_i \quad (2.8)$$

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 definidos en el trabajo [9] mediante:

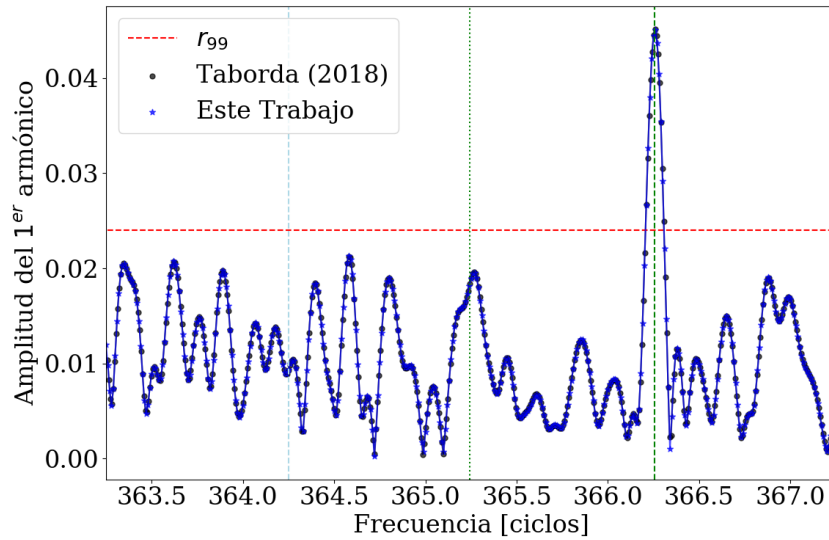
$$\mathcal{N} = \sum_i^{\text{Eventos}} w_i \quad a = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} a'_i \quad b = \frac{2}{\mathcal{N}} \sum_i^{\text{Eventos}} b'_i \quad (2.9)$$

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  $P(\tilde{r})$  y  $r_{99}$ . ((REDACTAR)) Cabe resaltar que el P99 depende solamente de los pesos de los eventos que se está estudiando. La interpretación de este valor es cual es la probabilidad de tener una amplitud mayor como una fluctuación de una distribución isotrópica., y el valor de amplitud  $r_{99}$  para que dicha probabilidad sea del 1 %.

$$\tilde{r} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \phi = \arctan \frac{a}{b} \quad (2.10)$$

$$P(\tilde{r}) = \exp(-\mathcal{N} \frac{\tilde{r}^2}{4}) \quad r_{99} = \sqrt{\frac{-4 \log(0,01)}{\mathcal{N}}} \quad (2.11)$$

Una forma de validar el código para el análisis de anisotropía es comparar los resultados del código con los obtenidos en otros trabajos [2]. En la Fig.2.3 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 1.2. En esta figura que los resultados obtenidos en [2] y con el código utilizado por este trabajo son indistinguibles.



**Figura 2.3:** Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [2] y con el código escrito para este trabajo.



## Capítulo 3

# Dipolo en el rango 1 EeV - 2 EeV

### 3.1. Características del conjunto de datos

Se debe tener cuenta que el archivo de evento para todos los disparos no es comparable con el conjunto de datos del ICRC 2019. Porque el primero es entre los años 2013 y 2019 y el segundo se adquieren usando el disparo estándar. Algo a considerar es que la colaboración cambió el algoritmo de reconstrucción de eventos en el 2019, con respecto al 2017.

En las Figs. 3.1a y 3.1b se muestra la diferencia entre el valor de energía entre eventos coincidentes entre las reconstrucciones del año 2017 y 2020. Puede apreciarse que la diferencia no esta centrada 0 y no aparenta tener una modulación del clima. Por lo tanto la diferencia se debe a una reconstrucción distinta de los eventos.

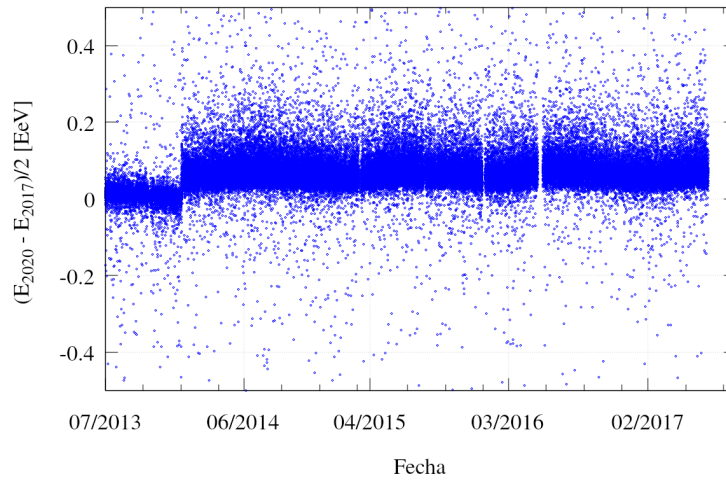
Puede verse en la Fig. 3.2 que la curva de calibración entre ambos archivos es distinta, ya que la coordenada al origen como la pendiente es difieren entre para ambos archivos. Esto implica que los valores A y B de la curva  $E = A \times (S_{38})^B$  son distintos para ambos conjunto de datos. Esto afectaría en primer lugar en el valor de la energía, y segundo a cualquier análisis que dependan de estos parámetros, como el análisis de la modulación del clima.

Además de los filtros aplicados mencionados en la sección 1.2, 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 2013 y las 12:00:00 GMT del 1 de enero de 2020. Se centró en este rango de tiempo, ya que el registro de eventos más reciente al que se tuvo para hacer este trabajo termina el 1 de Enero del 2020 a las 11:59:43 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.

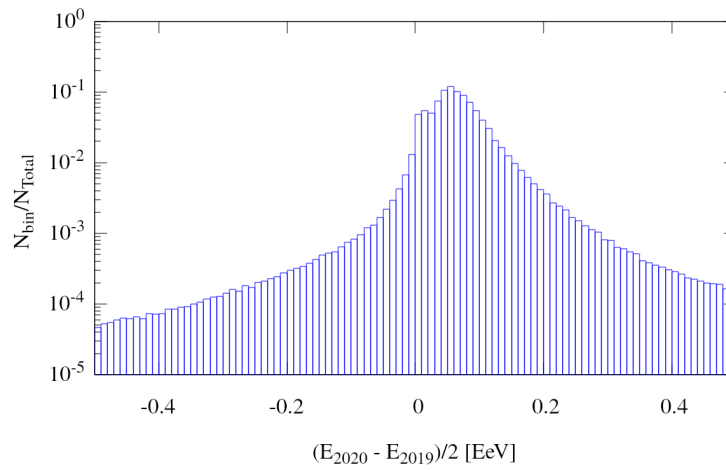
Un resumen de todos los filtros aplicados se encuentra a continuación

1. Son eventos obtenidos mediante todos los disparos.
2. Energía entre [1 EeV , 2 EeV)
3. Rango de tiempo:
  - Inicial: 1388577600 (Jueves, 1 de Enero de 2014 12:00:00 GMT)
  - Final: 1577880000 (Jueves, 1 de Enero de 2020 12:00:00 GMT)

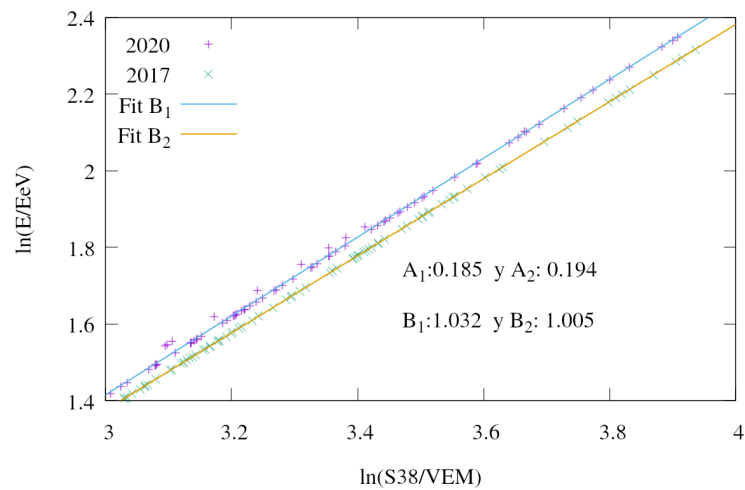
Aplicando estos filtros, se tienen 1081 844 eventos para estudiar en este rango de energía.



(a) Diferencia entre las energías

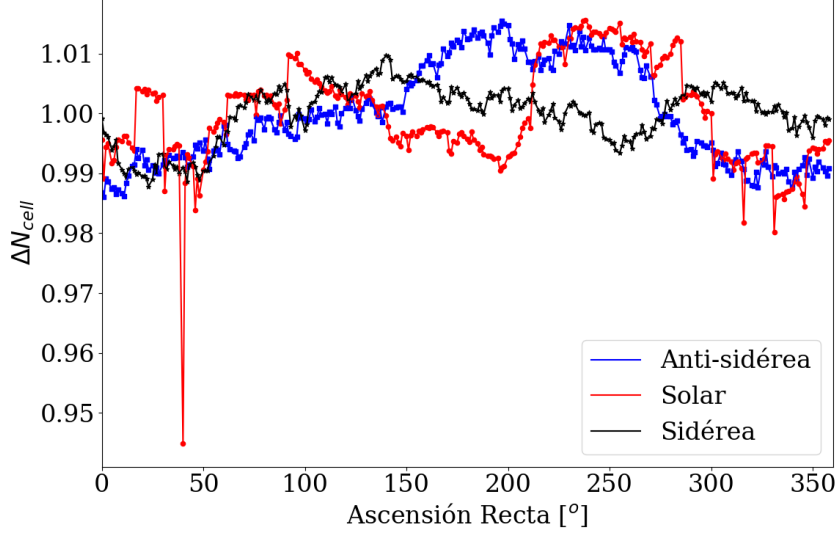


(b) Histograma de las diferencias

**Figura 3.1:** Diferencia entre las energías de entre la reconstrucción del 2017 y del 2019**Figura 3.2:** Calibración de las energías del archivo de 2017 y el archivo del 2019

### 3.2. Pesos de los eventos para frecuencias de referencia

En la Fig. 3.3 se muestran los valores de  $\Delta N_{cell,k}$  en el rango donde se consideran los eventos.



**Figura 3.3:** Variaciones de los hexágonos para frecuencias características en rango mencionado.

A cada una de estas frecuencias, se ajusta una función del tipo  $f(x) = a \cdot \cos(\alpha - \phi) + 1$ , con el se busca aproximar la amplitud  $a$  y el desfase  $\phi$  de las curvas de los pesos en función de la ascensión recta  $\alpha$ . Los ajustes se observan en las Figs. 3.4a, 3.4b y 3.4c.

#### 3.2.1. Gráficos de los ajustes

Para verificar los valores de amplitud y fase en la frecuencia sidérea, se ajusta una función del tipo

$$f(RA) = a \cos(2\pi(\omega RA + \phi)) + c \quad (3.1)$$

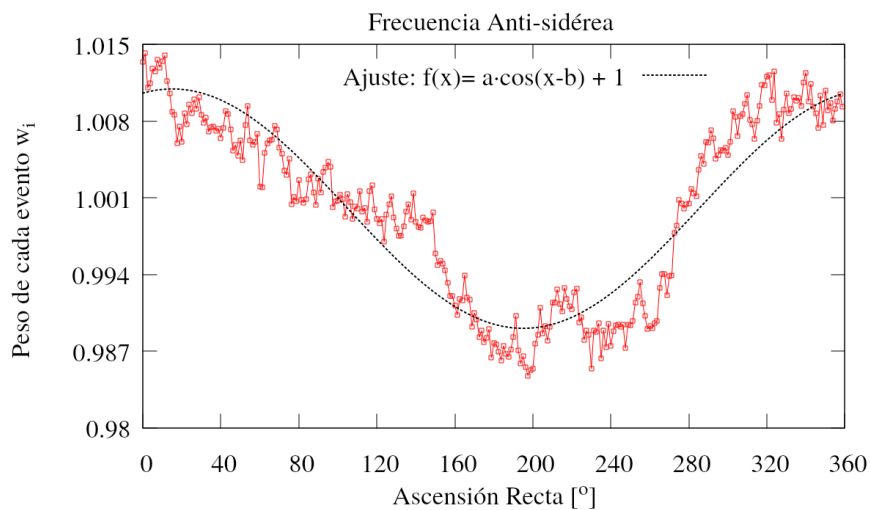
a la variación de los hexágonos por ángulos de ascensión recta  $RA$ , así como también a la variación de los pesos de los eventos en ascensión recta <sup>1</sup>. En el ajuste, se dejan libres los parámetros de la amplitud  $a$ , desfase  $\phi$  y offset  $c$ , en cambio la frecuencia  $\omega = 1$ , ya que los valores de ascensión recta  $0^\circ$  y  $360^\circ$  son equivalentes y estamos trabajando con el primer armónico. La variación y el ajuste puede verse en las Figs.

Los valores de los ajustes, comparados con el análisis de Rayleigh se muestran en la Tabla 3.1. SE observa que el valor de la amplitud para el caso de la variación de los pesos es más cercana al que se obtuvo en el análisis de Rayleigh. Esto puede deberse que los pesos están normalizados por la integral de todos los hexágonos dada un frecuencia, por lo que si existe alguna constante multiplicativa en la cantidad de hexágonos, la amplitud la tabla para la primera columna puede no ser igual a la segunda columna.

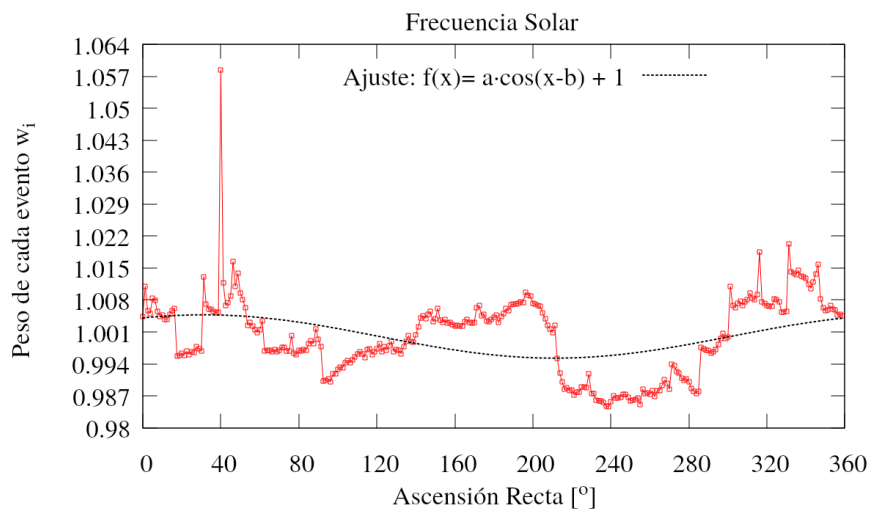
	Hexágonos	Pesos de los eventos	Rayleigh con peso
Fase $\phi$ :	284.874	285.099	329.865
Amplitud $a$ :	0.00784107	0.00384774	0.004676

**Tabla 3.1:** Fase y amplitud del ajuste del primer armónico en ascensión recta en los hexágonos y pesos de los eventos para la frecuencia sidérea

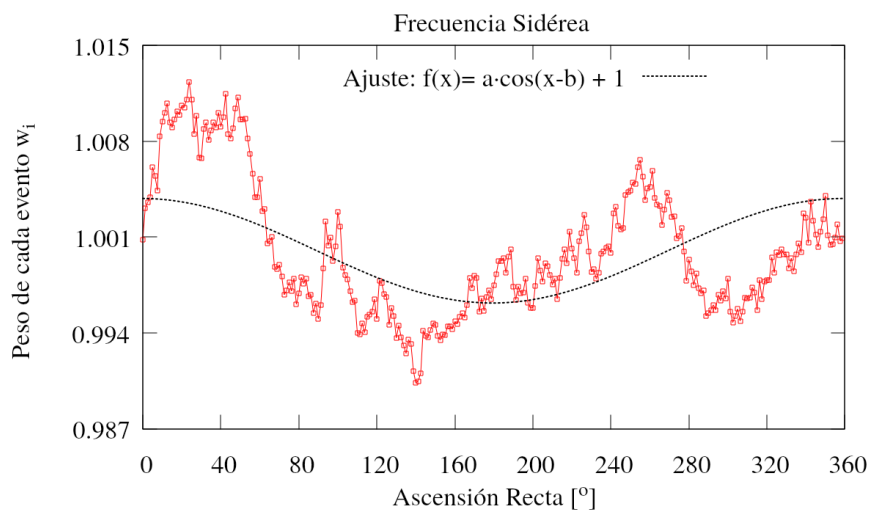
<sup>1</sup>El peso de los eventos es la inversa del peso de los hexágonos



(a) Frecuencia anti-sidérea



(b) Frecuencia solar



(c) Frecuencia sidérea

**Figura 3.4:** Ajuste de los pesos de los eventos para varias frecuencias a primer orden en ascensión recta

### 3.2.2. Tabla comparando los ajustes:

	Anti-sidérea	Solar	Sidérea
Amplitud $a$	$0,0109 \pm 0,0003$	$0,0038 \pm 0,0003$	$0,0047 \pm 0,0007$
Fase $\phi$	$15 \pm 1$	$360 \pm 5$	$31 \pm 8$

**Tabla 3.2:** Parámetros obtenidos del ajuste a primer orden en  $\alpha$  sobre los pesos.

## 3.3. Gráfico de la anisotropía

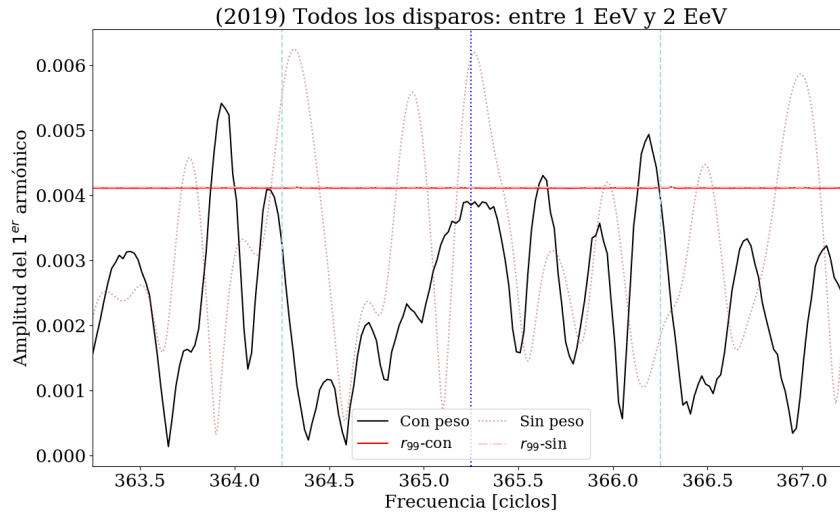
En las figuras de esta sección se muestran el análisis en ascensión recta para los eventos de observatorio considerando las variaciones de la exposición.

Los mismos se hicieron en el mismo intervalo de tiempo para poder compararlos entre sí.

	Con Peso	Sin peso
Frecuencia:	366.25	366.25
Fase:	329.865	292.312
$P(r)$ :	0.76398 %	26.6838 %
Amplitud:	0.004676	0.00243515

**Tabla 3.3:** Fase,  $r_{99}$  y  $P_{99}$  del análisis de anisotropía entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020

### Análisis de anisotropías en ascensión recta



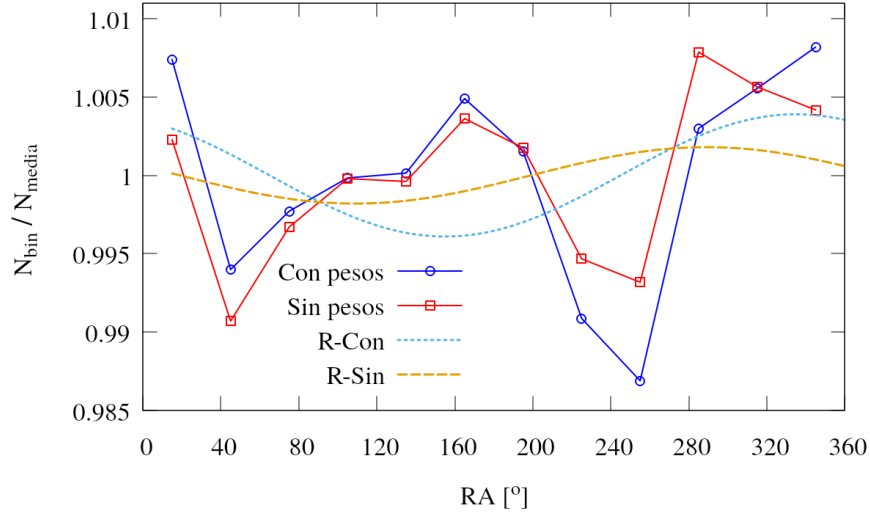
**Figura 3.5:** Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos

	Solar (sin peso)	Solar (con peso)	Sidérea (sin peso)	Sidérea (con peso)
Fase $\phi$	251	288	289	335
Amplitud $r$	0.0061	0.0038	0.0018	0.0039

**Tabla 3.4:** Comparación de los parámetros de fase y amplitud para las frecuencias sidérea y solar, analizando sin pesos y con los pesos de los hexágonos con el análisis de Rayleigh

### Bineado de eventos

Considerando que estamos trabajando con la frecuencia solar al hacer el análisis con pesos, se obtiene la siguiente distribución de eventos en función de su ascensión recta.



**Figura 3.6:** Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta.

	Con Peso	Sin peso	Con Peso	Sin peso
Frecuencia:	366.21	366.21	~366.505	366.506
Fase:	151.032	121.695	~190	73.8188
$P(r)$ :	0.289882 %	46.9691 %	~96 %	0.24013 %
Amplitud:	0.00512146	0.0018417	~0.0006	0.00520328

**Tabla 3.5:** Fase,  $r_{99}$  y  $P_{99}$  del análisis de anisotropía entre en 1 de Enero del 2014 y el 1 de Enero del 2020

# Bibliografía

- [1] 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>.
- [2] Taborda, O. Estudios de anisotropías a grandes escalas angulares de los rayos cósmicos de alta energía detectados por el observatorio Pierre Auger. Proyecto Fin de Carrera, Instituto Balseiro, 7 2018.
- [3] Linsley, J., Scarsi, L., Rossi, B. Extremely energetic cosmic-ray event. *Phys. Rev. Lett.*, **6** (9), 485, 1961.
- [4] Aab, A., Abreu, P., Aglietta, M., Al Samarai, I., Albuquerque, I., Allekotte, I., et al. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above  $8 \times 10^{18}$  ev. *Science*, **357** (6357), 1266–1270, 2017.
- [5] Pierre Auger Collaboration. Plans for a proposal to upgrade the Pierre Auger Observatory. Pierre Auger Collaboration, 2013.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Linsley, J. Fluctuation effects on directional data. *Phys. Rev. Lett.*, **34**, 1530–1533, Jun 1975. URL <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.34.1530>.

