

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) _w :	Señal de S(1000) corregida por la modulación del clima.
S ₃₈ :	Señal a 1000 m del núcleo y al nivel del suelo si el ángulo cenital del evento fuera de 38°
S _{38,w} :	Señal S ₃₈ 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
1. Introducción	1
1.1. Acerca de todos los disparos del SD	2
1.2. Acerca de los eventos	3
1.2.1. Acerca del registro de hexágonos	3
1.3. Acerca de la tesis de licenciatura	3
2. Métodos	4
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	5
2.1.2. Cálculo de Rayleigh en ascensión recta para una frecuencia dada	7
3. Dipolo en el rango 1 EeV - 2 EeV	9
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
Bibliografía	15

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 [8].	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 está siendo constantemente bombardeada con partículas provenientes del espacio, con energías de los 10^{10} eV para arriba. Estas partículas son conocidas como rayos cósmicos (RC) y han sido medidas desde los años 60s [1]. Aunque el área lleva tiempo siendo estudiada, los mecanismos que producen los RCs y las zonas del espacio donde se originan los mismos siguen siendo investigadas por distintos experimentos.

Por encima de una energía de 10^{14} eV, los RCs que llegan a la atmósfera pueden interactuar con las moléculas de la misma, y así producir cascadas de partículas secundarias. Dependiendo de la energía del primario, es decir el RC que generó la lluvia, estas partículas pueden ser medidas usando detectores sobre la superficie de la Tierra. Esta cascada es conocida como lluvia atmosférica extendida o *EAS* y está compuesta por una componente electromagnética, que consiste en electrones, positrones y fotones, y una componente muónica. Las partículas secundarias cargadas también pueden excitar moléculas de nitrógeno en el aire que producen fotones de fluorescencia y pueden ser observados 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 las EASs producidas por RCs, con energía por encima de 0,1 EeV. La adquisición de datos empezó en el año 2004. El observatorio posee un sistema híbrido de detección, ya que combina un arreglo de detectores de partículas sobre la superficie y un conjunto de telescopios que detectan los fotones de fluorescencia. Cuando el observatorio registra una EAS que llega a la superficie y reconstruye la dirección de llegada del RC, se dice que se ha detectado un *evento*.

Los análisis presentados en este trabajo fueron realizados con los eventos obtenidos por ~ 1600 detectores Cherenkov, dispuestos sobre de $\sim 3000 \text{ km}^2$ a 1500 m entre sí. Un conjunto de 7 detectores adyacentes, es decir una en el medio y 6 en los lados, forman una celda hexagonal. Esta disposición de tanques se menciona como *arreglo principal*. Cada detector consiste en un tanque cilíndrico con 12 toneladas de agua ultra-pura de 1,2 m de alto. En la parte superior del tanque están instalados 3 foto-multiplicadores que monitorean la radiación Cherenkov en el agua. El conjunto del tanque y la electrónica de detección se menciona durante este trabajo como *Surface Detector* o *SD*. Cada detector está midiendo constantemente los fotones en el agua. Muchos de 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.

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, además que la proporción de eventos por debajo de 3 EeV disminuye.

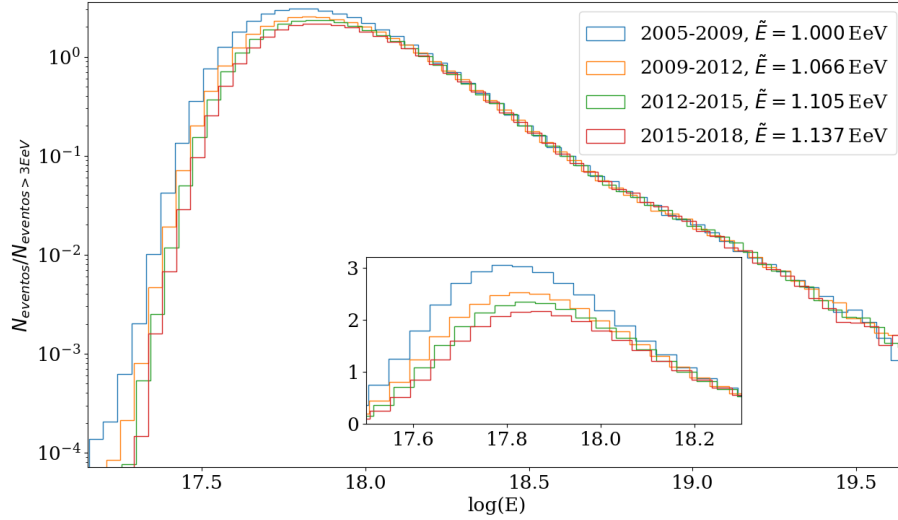


Figura 1.1: Histograma de eventos por rango de tiempo medido por el Observatorio Pierre Auger

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 ángulo cenital $\theta_{max} < 60^\circ$ o por encima de 4 EeV y $\theta_{max} < 80^\circ$, son detectados con una eficiencia del 100 %. Por lo tanto, el análisis en el rango de energía entre 1 EeV - 2 EeV requiere factores relacionados con la eficiencia del disparo en función de la energía. Estos factores son obtenidos de manera fenomenológica [2].

Para superar esta dificultad y 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 [3]. 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 así la reconstrucción de eventos mediante la separación fotón/hadrón para bajas energías [3]. 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 direccional 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 este algoritmo. Esto es conveniente ya que mientras más años han sido medidos es más factible que los efectos espúreos se cancelen. En cambio, para todos los disparos, el análisis 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 sin clasificar, por lo que el menor tiempo de medición se compensa con la eficiencia del disparo.

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 θ 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 funcionan 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 θ 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 hasta $\theta < 80^\circ$.
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. El tanque de mayor señal está 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 celdas activas 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 [4], [5] y [6].

Los efectos atmosféricos afectan principalmente a la atenuación de la componente electromagnética de la EAS, en particular depende fuertemente de la temperatura y presión. Estos efectos se caracterizan por parámetros dependientes del ángulo cenital del evento y por la presión, densidad y temperatura al momento de su detección. Los parámetros mencionados 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 [6] en el 2017.

Durante el trabajo de la licenciatura se imitó el análisis de la modulación del clima sobre el periodo 2005-2015 del trabajo [6], obteniéndose resultados compatibles. También se estudió la modulación del clima mediante el valor de la señal medida por los SDs, S_{38} , sin la corrección propuesta por [6], además de extender 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 la distribución de las direcciones de arribo de los eventos. Las irregularidades sobre el flujo casi isotrópico de los RCs, en un rango de energía, pueden deberse a zonas del espacio donde se producen más RCs que en otras, estas irregularidades se conocen como anisotropías.

La búsqueda de anisotropías a grandes escalas angulares suele ser hecha sobre las irregularidades de la distribución de eventos en ascensión recta α , ya que el arreglo principal tiene una exposición en función de esta coordenada es casi constante [7].

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

Las anisotropías son variaciones pequeñas, por lo que eliminar todo factor espúreo en el análisis es importante. Las anisotropías en ascensión recta aparecen

La frecuencia sidérea, como ya se mencionó antes, es la frecuencia en la cual las anisotropías reales en la distribución en ascensión recta de los RCs deberían aparecer. La frecuencia solar es importante para chequear la existencia de efectos sistemáticos asociados a particularidades propias del experimento y/o de las condiciones atmosféricas. La frecuencia anti-sidérea es una frecuencia arbitraria que se encuentra a la misma distancia (1 ciclo/año) de la solar que la frecuencia sidérea pero en el lado opuesto. La frecuencia anti-sidérea adquirió cierta relevancia por los trabajos de Farley y Storey [89] en los que se mostraba, para un modelo específico, que la mezcla de modulaciones.

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 α^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 del 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 α^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:

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

El factor f/f_{Solar} sirve para hacer un cambio de escala temporal entre los periodos de distintas frecuencias. Se usa como referencia la f_{Solar} dado que las horas (solares) se basan en esta frecuencia, y el valor de $h_0 = 31,4971^\circ$ 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° 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 ¹. 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 $N_{hex,j}$ de los datos 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 $\langle N \rangle$ para normalizar las variaciones.

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

Se toman las frecuencia anti-sidérea ($f_a = 364,25$ ciclos), solar ($f_{Solar} = 365,25$ ciclos) y sidérea ($f_{sid} = 366,25$ 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 [8] con eventos del periodo 2004-2017.

¹La función techo da como resultado el número entero más próximo por exceso

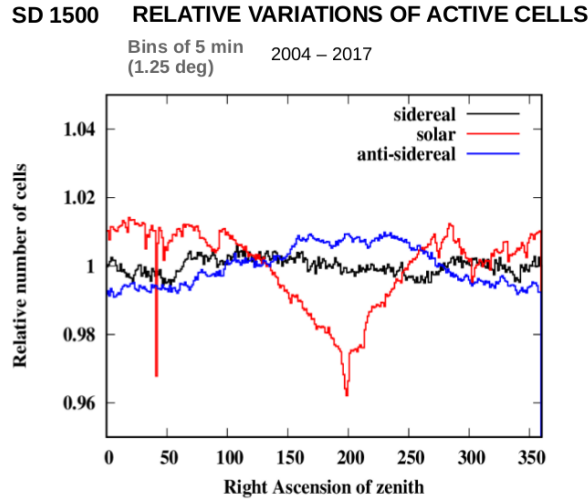


Figura 2.1: Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias obtenidas en el trabajo [8].

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

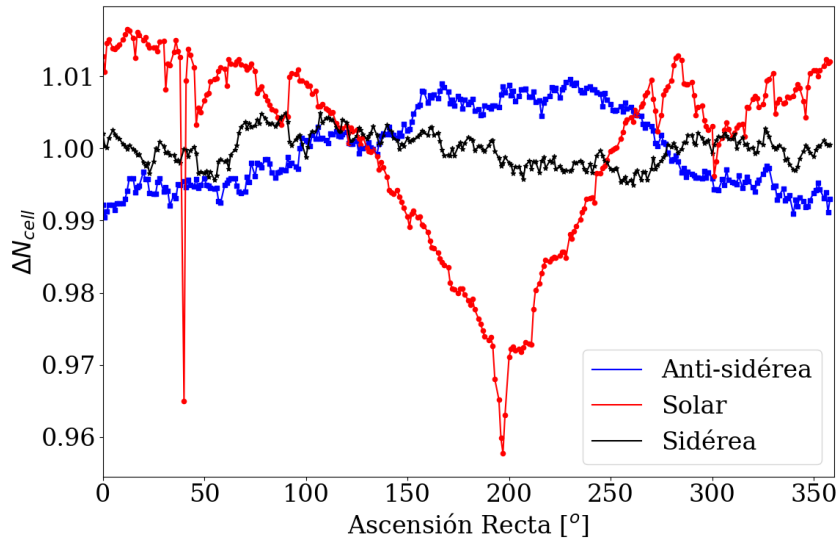


Figura 2.2: Valores de $\Delta N_{cell,k}$ en el rango 2004-2017 para distintas frecuencias utilizando el código escrito en este trabajo.

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 α . La distribución en ascensión recta α del flujo de RCs $I(\alpha)$ que llega al arreglo principal puede caracterizarse por las amplitudes r_k y fases ϕ_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 α 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 α y $\tilde{\alpha}$ arrojan los mismos parámetros r_k y ϕ_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 α_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 ϕ . 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.

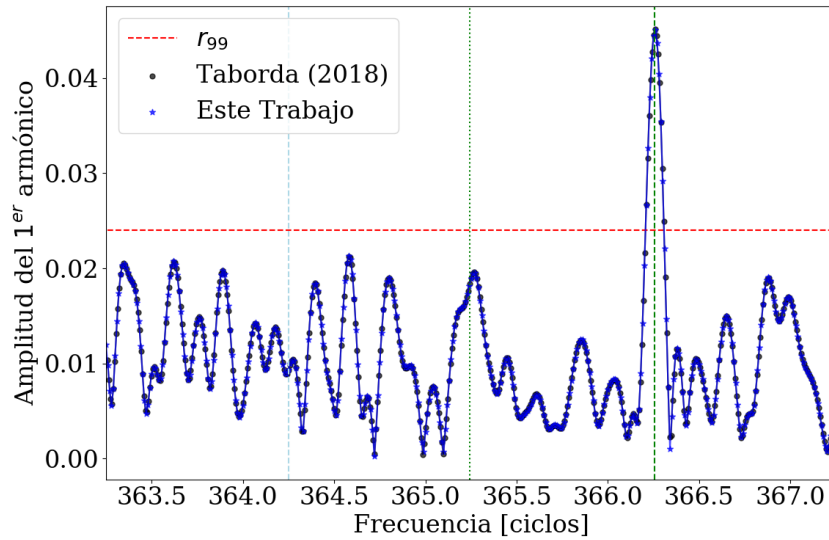


Figura 2.3: Comparación entre los análisis de anisotropía hechos para el mismo conjunto de datos, con el código de [2] y con el código escrito para este trabajo.

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.

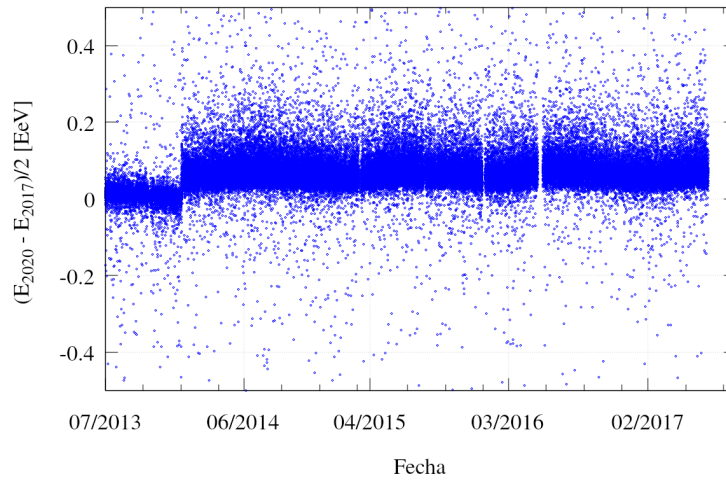
Puede verse en la Fig. 3.2 que la curva de calibración entre ambos archivos es distinta, ya que la coordenada al origen como la pendiente es difieren entre para ambos archivos. Esto implica que los valores A y B de la curva $E = A \times (S_{38})^B$ son distintos para ambos conjunto de datos. Esto afectaría 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.

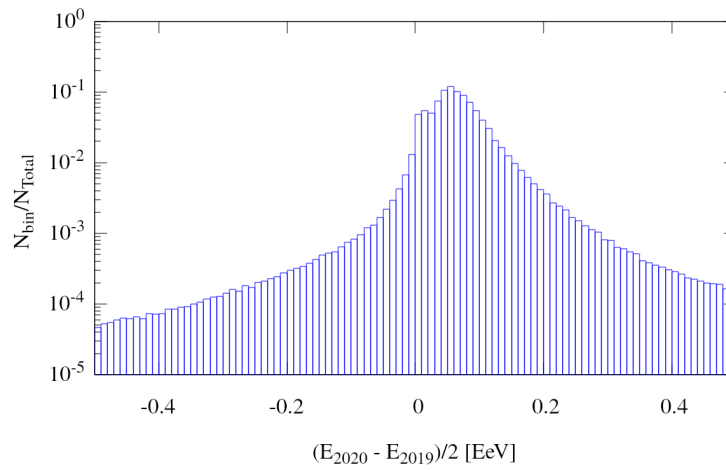
Un resumen de todos los filtros aplicados se encuentra a continuación

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)

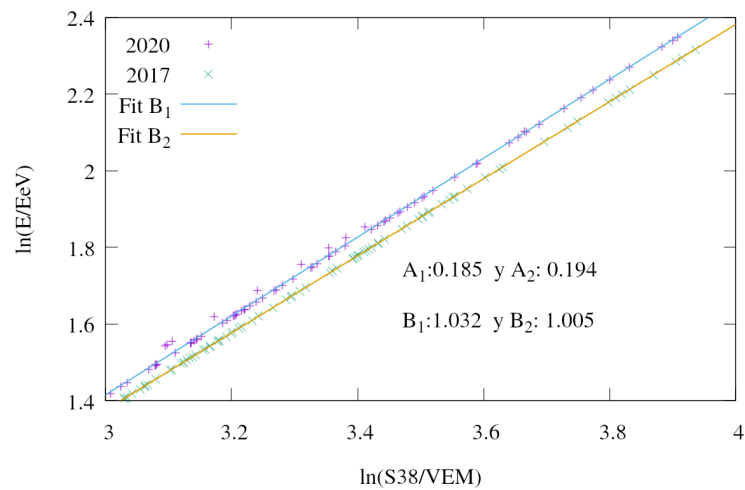
Aplicando estos filtros, se tienen 1081 844 eventos para estudiar en este rango de energía.



(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.

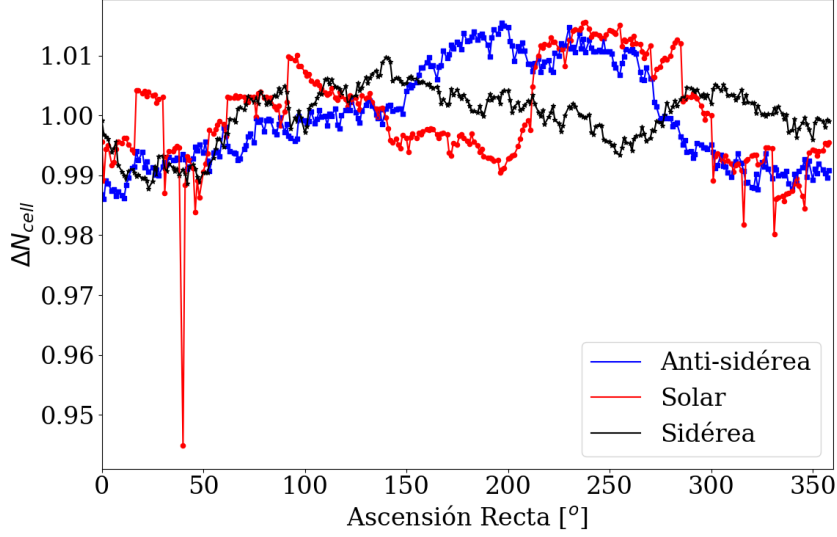


Figura 3.3: Variaciones de los hexágonos para frecuencias características en rango mencionado.

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 ϕ de las curvas de los pesos en función de la ascensión recta α . 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

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

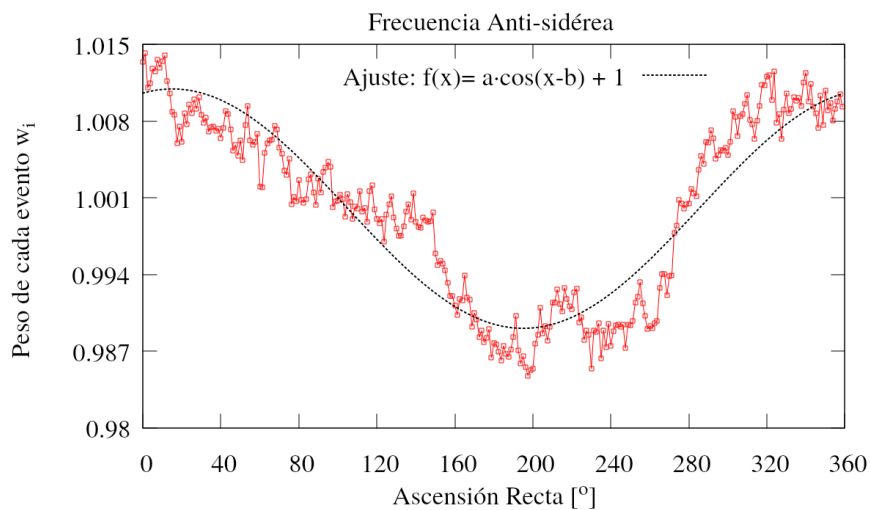
a la variación de los hexágonos por ángulos de ascensión recta RA , así como también a la variación de los pesos de los eventos en ascensión recta ¹. En el ajuste, se dejan libres los parámetros de la amplitud a , desfase ϕ y offset c , en cambio la frecuencia $\omega = 1$, ya que los valores de ascensión recta 0° y 360° 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.

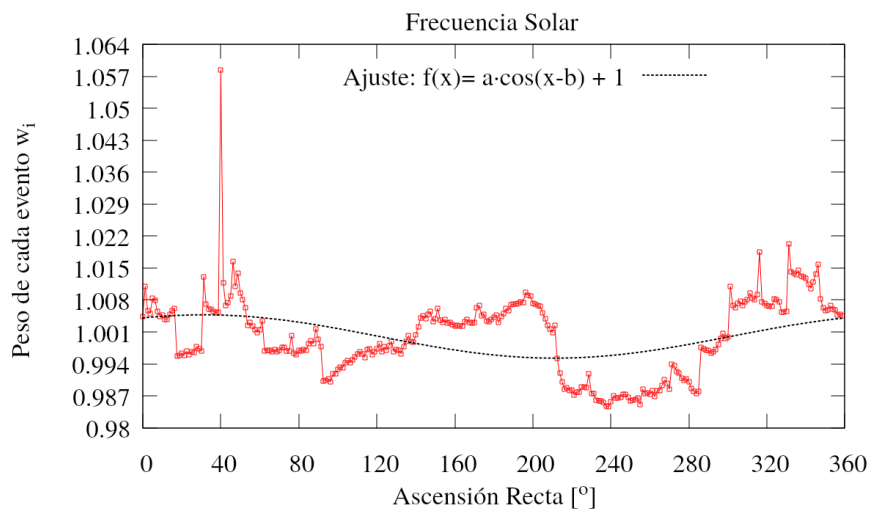
	Hexágonos	Pesos de los eventos	Rayleigh con peso
Fase ϕ :	284.874	285.099	329.865
Amplitud a :	0.00784107	0.00384774	0.004676

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

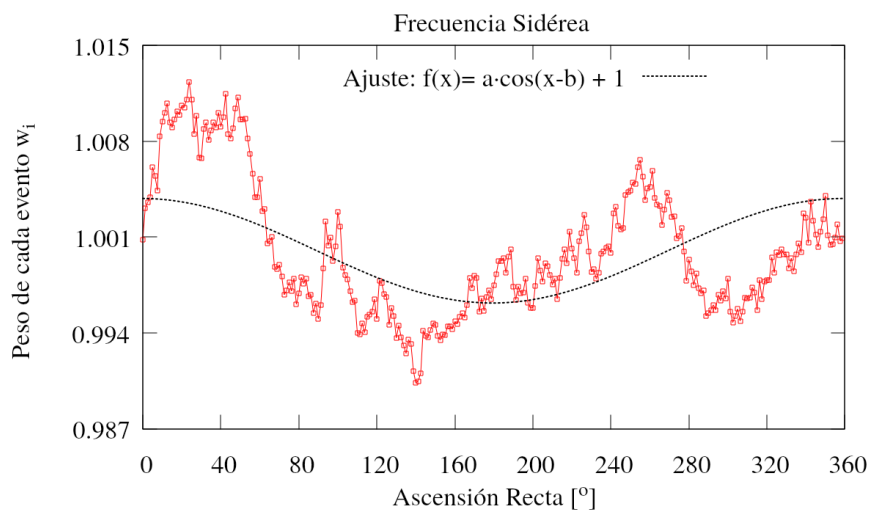
¹El peso de los eventos es la inversa del peso de los hexágonos



(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 ϕ	15 ± 1	360 ± 5	31 ± 8

Tabla 3.2: Parámetros obtenidos del ajuste a primer orden en α 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

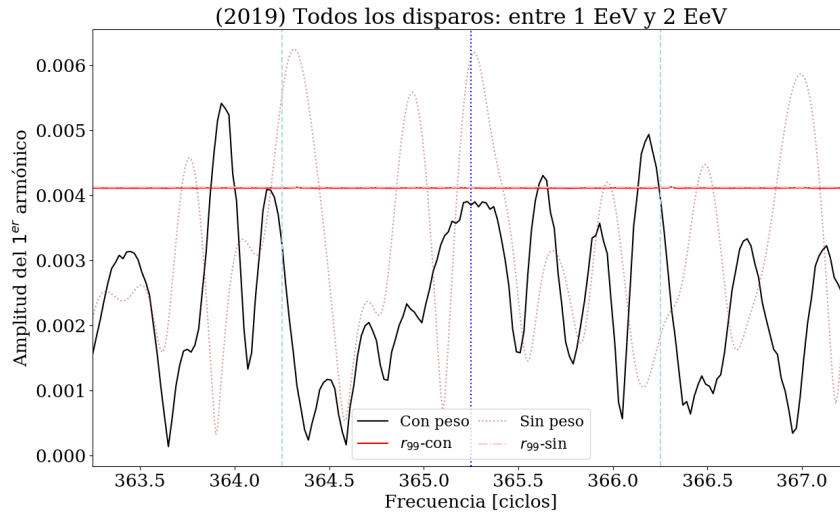


Figura 3.5: Anisotropía en función de la frecuencia, se comparan los análisis sin los pesos y con los pesos de los hexágonos

	Solar (sin peso)	Solar (con peso)	Sidérea (sin peso)	Sidérea (con peso)
Fase ϕ	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.

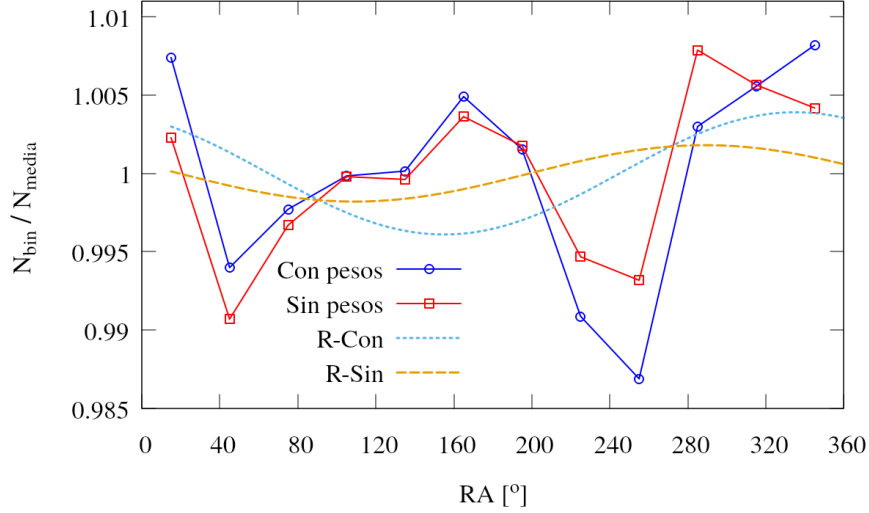


Figura 3.6: Distribución de la cantidad relativa de eventos en función de la ascensión recta.

La Figura 5.15 muestra la tasa de eventos normalizada en este intervalo de energía. La línea continua es el valor del primer armónico obtenido a través del análisis de Fourier. Es evidente que la modulación tiene características adicionales a las del primer armónico, de hecho, el siguiente modo en valor de la amplitud es el cuarto, para el cual $r4\alpha = 4,9 \times 10^{-3}$ con una probabilidad $P(>= r4\alpha) = 2,7 \times 10^{-3}$. La línea discontinua muestra la distribución proveniente de la suma de los cuatro primeros armónicos. Es interesante que el mayor exceso con respecto al caso dipolar es un salto en el intervalo de ascensión recta $[270^\circ, 300^\circ]$, muy cerca a la dirección del centro galáctico. Estudios futuros de esta característica podrían ser interesantes para determinar su origen.

	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] Linsley, J., Scarsi, L., Rossi, B. Extremely energetic cosmic-ray event. *Phys. Rev. Lett.*, **6** (9), 485, 1961.
- [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] Pierre Auger Collaboration. Plans for a proposal to upgrade the Pierre Auger Observatory. Pierre Auger Collaboration, 2013.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 8×10^{18} ev. *Science*, **357** (6357), 1266–1270, 2017.
- [8] 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>.
- [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>.

