

Pontificia Universidad Católica del Perú

Escuela de Posgrado



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

Tesis:

Búsqueda de correlaciones entre eventos de rayos cósmicos  
ultraenergéticos con fuentes astrofísicas de rayos gamma

Para obtener el grado de  
Magíster en Física

Presentada por

Vicente Luis Poma Almanza

Asesor:

Dr. José Luis Bazo Alba

*“Debemos intentar comprender el comienzo del universo a partir de bases científicas. Puede que sea una tarea más allá de nuestras capacidades, pero al menos deberíamos intentarlo.”*

Stephen Hawking



## RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio que busca correlaciones estadísticamente significativas entre eventos de rayos cósmicos ultra-energéticos (UHECR, por sus siglas en inglés) con fuentes astrofísicas de rayos gamma. Para tal propósito, se ha escogido datos de UHECR del Observatorio Pierre Auger y Telescope Array, de los cuales son usados los eventos que poseen una energía mayor a 80 EeV. UHECR provenientes de fuentes extragalácticas son, con mayor probabilidad, compuestos por protones y núcleos ligeros, como el helio y el nitrógeno, y también núcleos pesados como el hierro.

Basados en las fracciones de los rayos cósmicos que compondrían estos núcleos simuladas por la colaboración del Observatorio Pierre Auger, realizamos pruebas asignando a cada evento un tipo de núcleo. Para cada prueba, se considera el límite Greisen - Zatsepin - Kuzmin (GZK) como una máxima distancia a la cual podríamos detectar las partículas; así como deflexiones en la trayectoria causadas por campos magnéticos galácticos y extragalácticos.

Las fuentes astrofísicas de rayos gamma consideradas son tomadas de diferentes catálogos como TeVCat, 2WHPS y 3FHL de donde obtenemos el tipo de fuente, la distancia a la cuál se encuentra y el flujo de fotones que emite. Para cada catálogo se realiza una búsqueda de correlación espacial dentro de un error angular debido a la desviación por campos magnéticos y limitándose a una distancia máxima dada por la longitud de atenuación. El resultado debe sopesar las correcciones estadísticas por los diferentes intentos.

Las fuentes galácticas del catálogo TeVCat son las únicas que tienen correlaciones con los eventos más energéticos de rayos cósmicos. Sin embargo, no es muy probable que estas fuentes puedan acelerar a las partículas hasta las energías que poseen.

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer sinceramente a mi asesor de tesis, Dr. José Bazo, por su esfuerzo, paciencia y dedicación. Agradezco también a las instituciones CONCYTEC y FONDECYT (convenio 233-2015-2), por contribuir con la beca de maestría sin la cual muchos estudiantes de bajos recursos no podríamos continuar con nuestros proyectos.



# DEDICATORIA

A mi padre, donde quiera que esté...



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Rayos Cósmicos</b>	<b>3</b>
2.1. Composición y espectro de energía de rayos cósmicos . . . . .	3
2.2. Aceleración de rayos cósmicos . . . . .	4
2.3. Cascadas de partículas . . . . .	5
<b>3. Detectores de Rayos Cósmicos</b>	<b>7</b>
3.1. Observatorio Pierre Auger (PAO) . . . . .	7
3.2. Telescope Array (TA) . . . . .	10
<b>4. Fuentes de rayos gamma</b>	<b>12</b>
4.1. Catálogos . . . . .	13
4.1.1. TeVCat . . . . .	15
4.1.2. 2WHSP . . . . .	16
4.1.3. 3FHL . . . . .	16
<b>5. Análisis de correlaciones</b>	<b>18</b>
5.1. Deflexión por campos magnéticos . . . . .	18
5.1.1. Campo magnético extra-galáctico . . . . .	19
5.1.2. Campo magnético galáctico . . . . .	19
5.2. Longitud de atenuación . . . . .	20

5.3. Corrección de energía . . . . .	20
5.4. Composición de rayos cósmicos . . . . .	21
5.5. Factores de prueba . . . . .	22
5.6. Metodología . . . . .	24
<b>6. Resultados</b>	<b>25</b>
6.1. Correlación con el catálogo TeVCat . . . . .	25
6.2. Correlación con el catálogo 2WHSP . . . . .	27
6.3. Correlación con el catálogo 3FHL . . . . .	27
<b>7. Conclusiones</b>	<b>33</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>



# Capítulo 1

## Introducción

Dentro de la astrofísica y la física de partículas, el estudio de los rayos cósmicos es actualmente un campo de investigación muy abierto e interesante, debido al rol que esta área tiene dentro de la física. En este campo confluyen las interacciones a altas energías de partículas elementales, la antimateria; así como las posibilidades aún abiertas de describir los procesos más energéticos del universo. La teoría concerniente a los rayos cósmicos es tratada en el capítulo dos, incluyendo el límite GZK y fuentes características de rayos cósmicos ultra-energéticos.

La contribución presentada en esta investigación, pretende relacionar eventos de rayos cósmicos ultra-energéticos con fuentes conocidas de rayos gamma. Los procesos por los cuales estas fuentes emiten rayos gamma involucran, en el caso de un modelo hadrónico (1), la emisión de rayos cósmicos y es por ese motivo que puede darse una correlación. Otros trabajos recientes han realizado búsquedas de este tipo de correlaciones, ver (2; 3; 4; 5; 6; 7), sin obtener un resultado estadísticamente importante. En este trabajo añadimos consideraciones adicionales, como la composición de los núcleos y distancia máxima de las fuentes, para hacer más preciso el análisis.

Los datos de los eventos de rayos cósmicos han sido tomados de dos experimentos: Pierre Auger Observatory y Telescope Array. En el capítulo tres se realiza una descripción formal de ambos experimentos, haciendo énfasis en los detectores y el proceso de medición. Ambos experimentos han publicado sus datos; brindando la energía, tiempo y dirección de los eventos detectados, entre otros parámetros. De estos eventos, solo aquellos con energías mayores a 80 EeV son usados para hallar una posible correlación. Esto se ha realizado con el fin de tener una cantidad de datos de eventos considerable y a la vez reducir la incertidumbre debida a la desviación por campos magnéticos de estas partículas cargadas.

Las fuentes en consideración son tomadas de tres catálogos: TeVCat, 2WHPS y 3FHL. Estos catálogos contienen fuentes de rayos gamma de altas energías, en su mayoría extragalácticas. De todas las fuentes catalogadas, son seleccionadas aquellas que cuentan con la distancia a la Tierra como dato y son obviadas aquellas que se

repiten entre un catálogo y otro. Estos catálogos ofrecen además de la distancia, datos como flujo de fotones a diferentes energías, ubicación, tipo y nombre, entre otros. En el capítulo cuatro se habla sobre las fuentes de rayos gamma, y se describen cada uno de los catálogos mencionados.

Dentro del espectro de rayos cósmicos, aquellos que poseen las más altas energías están conformados, en su mayoría, por protones y núcleos atómicos hasta el hierro. En esta investigación se considera una distribución dada por protones, núcleos de helio, núcleos de nitrógeno y núcleos de hierro; de acuerdo con tres simulaciones: Sibyll 2.1, QGSJET II-4, EPOS-LHC. Estas simulaciones, contrastadas con datos experimentales, muestran porcentajes de distribución en masas de las partículas mencionadas y tienen una buena descripción de la distribución de los eventos de rayos cósmicos para energías superiores a  $10^{1.2}$  EeV. Esta distribución permite simular una composición en masas de los datos de eventos de rayos cósmicos seleccionados, y por lo tanto, una distribución de carga eléctrica; dato considerado en la desviación debida a campos magnéticos y en las distancias máximas de donde podrían provenir estas partículas.

En este trabajo se realizan simulaciones con las distribuciones probabilísticas de la composición de masa de los rayos cósmicos, ya que no se conoce, por limitación de la reconstrucción experimental, cuál es el tipo de partícula original de cada evento.

El procedimiento siguiente consiste en determinar la posible desviación en las trayectorias de los rayos cósmicos, para esto es necesario contar con el límite GZK de estas partículas, la carga, energía y características del campo electromagnético sea galáctico o extragaláctico. El cálculo de la posible desviación a partir de la ubicación de las fuentes también es usado para refinar la correlación. Como resultado del análisis se obtiene una correlación entre fuentes y eventos. Adicionalmente, solo se consideran aquellas fuentes cuya ubicación dista una cantidad menor a  $20^\circ$  de la ubicación de los eventos de rayos cósmicos a los que son conectados. Como ha sido mencionado, correcciones estadísticas debido a la cantidad de tests realizados; y parámetros como el tipo de fuente y el flujo de rayos gamma deberían ser tomados en cuenta para encontrar una correlación estadística significativa.

El procedimiento realizado está descrito en el capítulo cinco, donde se incluye teoría acerca de la acción que tienen los campos magnéticos galácticos y extragalácticos sobre los rayos cósmicos. Los resultados se presentan en el capítulo seis, y la conclusión en el capítulo siete.

# Capítulo 2

## Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas cargadas que poseen gran energía y viajan desde fuentes extraterrestres llegando a la Tierra. Su estudio es de gran importancia, ya que contribuye al desarrollo de la física de partículas elementales, así como a la descripción de fuentes astrofísicas y del medio intergaláctico. También está asociado al estudio de antimateria. La medición de un evento de rayos cósmicos puede realizarse de manera directa, mediante detectores ubicados en satélites o estaciones espaciales; o indirecta, mediante detectores instalados en Tierra.

### 2.1. Composición y espectro de energía de rayos cósmicos

Considerando aquellas partículas que poseen carga eléctrica, tenemos un 86 % compuesto de protones, un 11 % compuesto de partículas alfa, el 1 % corresponde a otros núcleos atómicos más pesados hasta el uranio y el 2 % restante corresponden a electrones. Estas proporciones pueden variar según la energía de las partículas. Estas partículas son denominadas rayos cósmicos primarios, pero también existen los rayos cósmicos secundarios, cuyo origen se da a partir de la interacción de los primarios con otras partículas, el medio intergaláctico, la radiación cósmica de fondo, la atmósfera terrestre, etc. Estos rayos cósmicos secundarios pueden contener otras partículas cargadas como positrones, antiprotones y otros. También llegan desde fuera de la Tierra otras partículas elementales que no tienen carga eléctrica como los rayos gamma, neutrinos y antineutrinos. La virtud de estas partículas sin carga es que no se desvían por la acción de los campos magnéticos en su recorrido hacia la Tierra y por tanto apuntan directamente a sus fuentes.

La Fig. 2.1 muestra el espectro de energía (flujo versus energía) de los rayos cósmicos para diferentes tipos de partículas que se extiende por varios órdenes de magnitud. La dependencia que tiene el flujo con la energía obedece a leyes de potencias de la for-

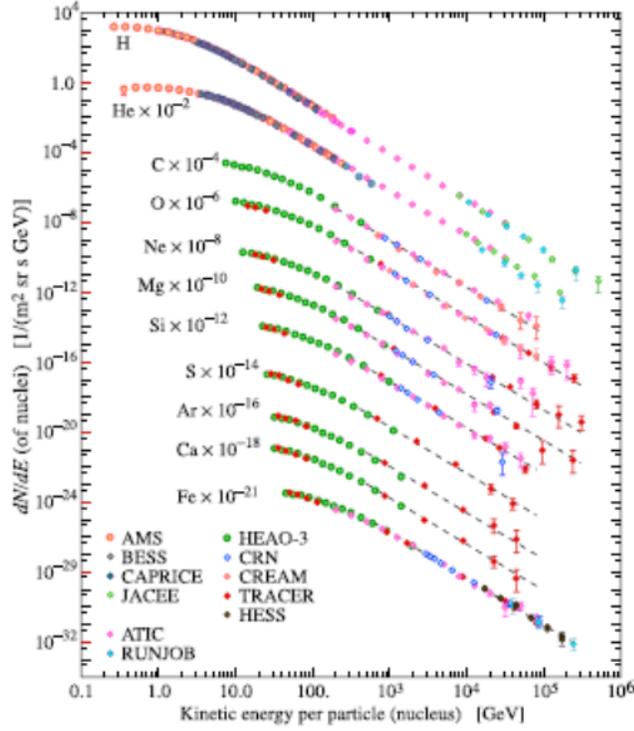


Figura 2.1 Flujos de núcleos de rayos cósmicos primarios en función de la energía por núcleo, medidos por varios experimentos (8).

ma  $N(E)dE \propto E^{-\alpha}dE$ , donde  $\alpha$  es el índice espectral que puede variar. Para diferentes regiones de energías se pueden encontrar diversas pendientes (índices espectrales), cuyo cambio se da en puntos conocidos como *rodilla* ( $10^{16}$  eV), antes del cual  $\alpha$  toma el valor de 2.7 y después del cual  $\alpha$  toma el valor de 3; y *tobillo* ( $4 \times 10^{18}$  eV), a partir del cual  $\alpha$  toma el valor de 2.69. Existe otro punto en el cual cambia la pendiente y se debe al límite GZK ( $E_{GZK} = 4 \times 10^{19}$  eV), que será explicado más adelante, y a partir del cual  $\alpha = 4.2$ . Estas regiones también representan una forma de distinguir el origen de los rayos cósmicos, ya sea solar, galáctico o extragaláctico.

## 2.2. Aceleración de rayos cósmicos

En la mayoría de los casos, se considera que los rayos cósmicos son acelerados en sus fuentes, aunque también se cuenta con la posibilidad de que sean acelerados cerca de la misma fuente o durante su trayectoria.

Existen muchos modelos que describen posibles mecanismos de aceleración de rayos cósmicos, algunos de los cuales se distinguen por el rango de energía. Entre los más aceptados se pueden mencionar los siguientes (9):

- Mecanismo ciclotrón: En manchas solares, o en general, en manchas estelares es posible que se aceleren partículas debido a campos eléctricos y magnéticos generados por el mismo fenómeno. La superficie más oscura se debe a que estas zonas se encuentran a menos temperatura, debido a que parte de la energía es convertida en campos electromagnéticos. Mediante este mecanismo, una partícula podría ser acelerada hasta los 100 GeV, asumiendo el caso de una partícula que se mueve en un campo magnético transversal.
- Aceleración por dos manchas estelares: Cuando dos manchas solares se aproximan, se genera un dipolo magnético cuyo campo eléctrico puede acelerar a las partículas.
- Aceleración de choque: Se denomina así a aquella aceleración causada por una o dos ondas de choque. Éstas ondas de choque son producidas por una supernova, fenómeno que ocurre cuando una estrella masiva implosiona al acabarse su combustible y termina como una estrella de neutrones. Una partícula que interactúe con una onda de choque, o que se encuentre atrapada entre dos ondas consecutivas, podría ganar una energía de hasta 100 TeV.
- Mecanismo de Fermi: En este modelo se describe la interacción de una partícula y una nube de gas interestelar, está demostrado que sea cual sea la dirección en la que la partícula intersecta a la nube de gas, en promedio tendrá una ganancia de energía. La partícula gana energía hasta tener la suficiente para escapar de la nube de gas.
- Aceleración por pulsares: Un pulsar (estrella de neutrones), es el remanente de la explosión de una supernova. A pesar de que mantiene su momento angular, el diámetro se reduce muchos órdenes de magnitud y por lo tanto la densidad y el momento del pulsar tienen un valor enorme. Mediante este mecanismo se considera que el pulsar cede parte de su energía rotacional para acelerar partículas que se encuentran en el medio.
- Aceleración en un sistema binario: Se conoce como binarias al conjunto de un pulsar (o un agujero negro) y una estrella normal. Cuando una estrella se encuentra muy próxima a un pulsar, un flujo de masa es absorbido de ésta de forma continua formando un disco de acreción con contenido plasmático en la dirección de giro del pulsar. Producto de este movimiento plasmático se generan fuertes campos electromagnéticos y partículas en presencia de estos campos podrían ser aceleradas.

### 2.3. Cascadas de partículas

Cuando los rayos cósmicos llegan a la Tierra, interactúan con los núcleos atómicos que se encuentran en la atmósfera y como producto se obtienen diferentes partículas

denominadas rayos cósmicos secundarios, las cuales continúan procesos de interacción o pueden decaer; dando origen a lo que se conoce como una cascada de partículas.

La observación de estas cascadas se da mediante arreglos de detectores ubicados en tierra que cubren grandes áreas. Llegar a conocer la energía y dirección iniciales del rayo cósmico primario y qué partícula originó la cascada requiere de un análisis basado en simulaciones Monte Carlo del desarrollo de las cascadas. Aun existe una considerable incertidumbre en este tipo de simulaciones para altas energías.

Durante el desarrollo de estas cascadas, se puede distinguir una componente electromagnética, una hadrónica y una muónica. Existen modelos de desarrollo de cascadas diferentes para cada componente así como diferentes cálculos Monte Carlo. Un programa muy utilizado para estas simulaciones es CORSIKA (10).



# Capítulo 3

## Detectores de Rayos Cósmicos

Para este análisis se han utilizado datos de eventos de rayos cósmicos medidos por el Observatorio Pierre Auger y por Telescope Array. Estos son observatorios cuya infraestructura está en la superficie terrestre y detectan rayos cósmicos de manera indirecta mediante cascadas de partículas en la atmósfera.

Sin embargo, existen también proyectos establecidos en satélites o en la estación espacial que miden de manera directa partículas que llegan a la Tierra. Estas partículas corresponden a energías menores dada el área de los detectores y el flujo de rayos cósmicos.

### 3.1. Observatorio Pierre Auger (PAO)

El nombre de este observatorio viene de Pierre Victor Auger, quien puede ser considerado como el descubridor de las cascadas de partículas, provocadas por interacción de rayos cósmicos ultra-energéticos con la atmósfera.

El experimento (11) es el más grande y preciso observatorio de cascadas atmosféricas iniciadas por rayos cósmicos de muy alta energía. Ha sido diseñado para detectar cascadas producidas por rayos cósmicos primarios con una energía mayor a 0.1 EeV. Se sitúa cerca a la ciudad de Malargüe en Argentina, a una altura de 1400 m.s.n.m., que equivale a  $880 \text{ g cm}^{-2}$  de profundidad atmosférica.

El observatorio está formado por un detector híbrido, es decir, usa dos métodos para realizar sus mediciones. Una parte del detector consiste en una serie de tanques Cherenkov que se encargan de detectar partículas que llegan a la superficie terrestre. La otra parte está conformada por 27 detectores de fluorescencia, que se encargan de detectar la luz emitida en la atmósfera producto de la interacción de los rayos cósmicos, pudiendo trazar el desarrollo de la cascada de partículas.

- **Detector de superficie:** Conformado por 1660 tanques Cherenkov que cubren un área de aproximadamente  $3000 \text{ km}^2$ , estando separados  $1,5 \text{ km}$  uno de otro. Las partículas provenientes de la cascada desarrollada en la atmósfera viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Al ingresar a los tanques, entran en contacto con el agua y su velocidad en ese medio es superior a la de la luz y sus ondas electromagnéticas producen radiación Cherenkov que es detectada por tubos fotomultiplicadores. La cantidad de luz medida por los diferentes tanques ayudan a calcular la energía del rayo cósmico primario, y los intervalos de tiempo entre mediciones de una misma cascada pueden ayudar a determinar una posible dirección en la cual viajaba.
- **Detector de fluorescencia:** Las partículas que se producen durante el desarrollo de la cascada interactúan con el nitrógeno de la atmósfera y se genera la fluorescencia, fenómeno mediante el cual se produce luz ultravioleta. Los detectores de fluorescencia son 24 telescopios ópticos ajustados para medir luz UV emitida en este proceso y ayudan a trazar el desarrollo de la cascada. Este tipo de detector tiene un tiempo de observación menor dado que solo se puede realizar de noche y con una buena atmósfera.

Ambos métodos de detección proporcionan los datos necesarios para poder estimar la energía y dirección del rayo cósmico primario. Esto es posible porque se comparan dos sets de datos.

El Observatorio Pierre Auger ha publicado sus datos de eventos con energías mayores a  $8 \times 10^{18} \text{ eV}$  (12). Entre estos UHECR's de mayor energía se han escogido aquellos con una energía mayor o igual a  $80 \text{ EeV}$  para minimizar la deflexión debida a campos magnéticos y a la vez mantener una estadística razonable. En la Tabla 1 encontramos los 49 eventos que superan este corte, con la información correspondiente a su energía y dirección tanto en coordenadas ecuatoriales como galácticas.

Table 1. Eventos de Pierre Auger Observatory con energías mayores a 80 EeV.

Ángulo	Energía	RA	Dec	Longitud	Latitud
59.2	94.86	199.7	-34.9	-50.8	27.7
44.6	87.58	268.4	-61.0	-27.6	-16.9
54.4	80.52	331.2	-1.3	58.7	-42.4
57.5	121.18	45.6	-1.7	179.5	-49.6
14.2	83.88	114.8	-42.8	-103.9	-10.0
65.6	86.80	18.3	29.2	128.6	-33.4
30.9	87.58	18.9	-4.7	138.3	-66.8
30.8	80.86	53.6	-7.8	-165.9	-46.9
65.2	91.84	299.0	19.4	57.6	-4.7
58.8	99.68	349.9	9.3	88.4	-47.3
14.2	142.352	192.8	-21.2	-57.1	41.7
17.9	89.26	325.5	-33.4	12.2	-49.0
30.9	92.28	81.6	-7.4	-150.1	-22.3
51.6	81.424	315.3	-53.8	-16.0	-40.5
77.1	89.82	271.1	19.0	45.2	18.7
50.2	125.21	352.6	-20.8	47.5	-70.5
38.9	81.872	220.6	-42.8	-36.3	15.5
44.4	100.016	116.0	-50.6	-96.4	-12.9
49.8	132.496	287.7	1.5	36.5	-3.6
31.5	82.88	209.6	-31.3	-40.7	29.4
37.0	81.2	193.8	-36.4	-56.2	26.5
27.2	83.32	122.7	-54.7	-90.7	-11.4
41.2	80.52	23.3	-40.2	-87.9	-74.3
79.4	92.176	287.7	-64.9	-28.9	-26.4
75.5	84.336	256.7	14.0	34.2	29.4
52.1	81.64	258.1	-44.9	-17.0	-3.3
43.6	91.84	122.7	-70.7	-76.3	-19.3
52.2	83.77	89.2	-12.0	-142.2	-17.5
53.8	84.672	324.5	17.9	71.2	-25.0
73.8	85.232	131.9	-15.5	-118.9	17.1
31.1	82.54	12.3	-40.7	-55.3	-76.5
48.6	99.792	218.8	-70.8	-48.7	-9.7
25.0	112.11	150.1	-10.3	-110.9	34.1
78.2	91.16	308.8	16.1	59.9	-14.3
49.8	80.752	84.9	14.4	-168.3	-8.7
29.9	87.24	120.8	-56.3	-89.8	-13.2

Table 1 (cont'd)

Ángulo	Energía	RA	Dec	Longitud	Latitud
24.5	90.60	283.7	-28.6	7.4	-13.2
31.8	84.672	77.2	-41.0	-114.4	-36.1
47.6	103.936	343.4	-71.6	-44.9	-42.6
47.3	110.88	309.4	-66.8	-31.5	-35.2
58.5	93.85	26.8	-24.8	-154.6	-77.3
74.7	82.432	267.5	-68.3	-34.8	-19.7
60.7	80.52	73.7	-20.5	-139.8	-34.4
44.9	95.536	123.4	-6.2	-131.7	15.1
54.7	94.976	154.6	-46.9	-82.4	8.3
39.0	81.76	163.8	-74.1	-64.9	-13.1
51.4	81.2	91.4	-60.6	-90.4	-28.9
60.8	83.44	189.9	-32.7	-60.0	30.1
58.5	132.496	340.6	12.0	80.1	-39.9

Note. — Descripción de columnas: (1) Ángulo de observación (2) Energía reconstruida del evento (3) Ascensión recta (4) Declinación (5) Longitud galáctica (6) Latitud galáctica

## 3.2. Telescope Array (TA)

Así como el Observatorio Pierre Auger, el experimento Telescope Array (13) se dedica a observar en el hemisferio norte las cascadas producto de interacciones de rayos cósmicos ultra-energéticos con la atmósfera. Se trata también de un detector híbrido que consiste de un arreglo en la superficie terrestre de 507 detectores de centelleo en un área de 762 km<sup>2</sup> y un conjunto de detectores de fluorescencia que corresponden a 3 estaciones cada una instrumentada con 12-14 telescopios. El experimento se ubica en el desierto en Millard County, Utah (EEUU) a unos 1400 m.s.n.m. .

De los datos (14) medidos por el Telescope Array, se han tomado igualmente aquellos con una energía superior a 80 EeV, con lo cual se tienen 20 datos de eventos que se presentan en la Tabla 2.

Table 2. Eventos de Telescope Array con energías mayores a 80 EeV

Ángulo	Energía	RA	Dec	Longitud	Latitud
46.91	88.8	93.5	20.82	10.23	1.53
31.98	82.6	68.86	19.2	-1.33	-18.66
41.2	101.4	285.74	-1.69	32.74	-3.33
25.61	120.3	285.46	33.62	-115.55	12.64
39.43	139.0	152.27	11.1	-132.28	48.67
38.04	122.2	347.73	39.46	-77.41	-19.40
34.48	80.7	99.16	62.77	-27.49	22.28
40.41	154.3	239.85	-0.41	9.46	37.14
51.15	92.2	144.59	40.66	1.23	48.28
19.6	93.5	204.0	45.18	-80.39	69.87
20.56	162.2	205.08	20.05	3.21	76.76
15.88	124.8	295.61	43.53	-102.94	9.88
38.94	135.5	288.3	0.34	-144.27	-4.68
19.18	89.3	39.98	34.17	-32.77	-23.53
23.98	83.3	168.48	57.92	-34.72	54.77
26.16	81.6	132.97	52.63	-14.34	39.30
18.36	91.8	226.68	24.5	-144.31	59.53
29.1	101.0	219.66	38.46	-113.43	64.91
28.99	98.5	36.26	17.87	-27.68	-39.60
26.91	106.8	37.59	13.89	-23.65	-42.47

Note. — Descripción de columnas: (1) Ángulo de observación (2) Energía reconstruida del evento (3) Ascensión recta (4) Declinación (5) Longitud galáctica (6) Latitud galáctica

# Capítulo 4

## Fuentes de rayos gamma

Si bien es cierto que los rayos cósmicos han sido descubiertos hace más de un siglo por Victor Hess, todavía no se sabe a ciencia cierta su origen. Según el modelo hadrónico las fuentes astrofísicas de rayos gamma también podrían ser las fuentes de los rayos cósmicos (9). En este modelo, protones altamente acelerados pueden colisionar con fotones de fondo y tras una serie de decaimientos se pueden producir tanto fotones (del decaimiento de  $\pi^0$ ) como neutrinos (del decaimiento de piones cargados y muones). Se considera que los núcleos activos de galaxia, quasares y/o explosiones de supernovas son fuentes candidatas de rayos cósmicos ultra energéticos.

Se han identificado mediante observaciones de varios experimentos fuentes puntuales que emiten rayos gamma hasta energías de 100 TeV. Sin embargo, para poder observar fuentes de mayor energía existe un límite en la distancia debido al camino libre medio de los fotones. El camino libre medio para fotones energéticos es  $\lambda_{\gamma\gamma} \sim 10$  kpc. Los fotones altamente energéticos pueden interactuar con diferentes fondos, como el de microondas o extragaláctico, y ser absorbidos en la producción de pares electrón-positrón (15). Para una distancia menor a 6.8 kpc, el fondo cósmico de microondas es transparente para fotones energéticos de cualquier energía.

El rayo gamma más energético detectado hasta el momento ha sido descubierto por el experimento Tibet ASgamma (16). Ellos detectaron un fotón de 450 TeV proveniente de la nebulosa del Cangrejo (a  $\sim 2$  kpc). Sin embargo, en este caso se trata de un acelerador de electrones, por lo que no procedería de un modelo hadrónico, sino de un modelo leptónico. En este caso, la hipótesis es que en la nebulosa los electrones son acelerados hasta energías de PeV. Estos electrones interactúan con la radiación del fondo cósmico de microondas y aumentan la energía de estos fotones hasta por lo menos la energía detectada.

Para poder determinar de la sola observación de fotones si una fuente cumple con un modelo leptónico o hadrónico es necesario tener observaciones en un amplio espectro electromagnético, los llamados estudios multi-wavelength. Dado que las observaciones a diferentes energías requieren de diversos detectores la observación

simultánea de todo el espectro representa un reto para los experimentos. Existen campañas multiwavelength para observar en el rango óptico, UV, rayos-X y rayos gamma diversas fuentes, como por ejemplo Mrk 421 (17). Dado que aun no se tienen un análisis completo de todas las fuentes, el hecho de encontrar correlaciones con rayos cósmicos sería una herramienta muy práctica para poder definir la naturaleza y mecanismos de estas fuentes.

Un resumen del estado actual de la astrofísica de rayos gamma se puede encontrar en (18), que abarca observaciones realizadas tanto desde Tierra como desde satélites. En general podemos clasificar los experimentos que realizan estas observaciones en tres:

- Satélites tipo Fermi que usan la creación de pares para reconstruir la energía y dirección del fotón. Miden energías entre 20 MeV a 200 GeV con una resolución energética entre 5 y 10 % y un alto tiempo de exposición del 80 %.
- IACTs (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes) telescopios como MAGIC, HESS y Veritas que observan el desarrollo de las cascadas electromagnéticas en la atmósfera. Tienen un tiempo de observación reducido dado que necesitan que sea de noche y la atmósfera esté limpia. Miden energías entre 100 GeV y 50 TeV con una menor resolución energética del orden de 15-20 % y un tiempo de observación mucho menor correspondiente al 15 %. Sin embargo, tienen la mejor resolución angular ( $0.07^\circ$ ) aunque su campo de visión es más restringido.
- Detectores de partículas EAS (Extensive Air Showers) como el experimento HAWC, que detecta con un arreglo de sensores en la superficie terrestre el impacto de las cascadas de partículas. Pueden observar fotones con energías entre 400 GeV y 100 TeV, con una menor resolución energética (50 %) pero por mucho más tiempo (90 %).

## 4.1. Catálogos

Dentro de un modelo hadrónico se puede plantear la correlación entre rayos cósmicos y rayos gammas de fuentes puntuales conocidas. Según esta hipótesis seleccionamos algunos catálogos con las fuentes más prometedoras que han sido observadas en rayos gamma. Tres catálogos han sido utilizados como bases de datos de fuentes de rayos gamma: TeVCat (19), 2WHSP (20) y 3FHL (21). Los datos necesarios de cada fuente para realizar el análisis son la posición y distancia a la Tierra (se puede obtener a través del redshift). Además será de utilidad saber el tipo de fuente y flujo de rayos gamma asociado. Para el análisis las fuentes con la información incompleta han sido excluidas en la búsqueda de correlaciones.

Para evitar considerar en el análisis fuentes que se encuentran a distancias muy lejanas, desde las cuáles sería poco probable que llegaran partículas cargadas (e.g.

protones, núcleos de hierro) con energía inalterada, pues habrían ya interactuado con el fondo cósmico de microondas, asumimos que la distancia límite desde la cual podría originarse un UHECR debe tener un valor máximo de 1277 Mpc. Este límite se toma de la longitud de atenuación (ver Fig. 5.3) para el caso que el rayo cósmico fuese hierro. Aunque la probabilidad que sea hierro es muy baja, se toma esta distancia como una estimación conservadora. Aquellas fuentes de rayos gamma ubicadas a una distancia mayor no son consideradas en el análisis. En la Fig. 4.1 se muestran todas las fuentes con la información necesaria para poder buscar una correlación con UHECR's, la línea negra representa el corte en la distancia a partir de la cual las fuentes no se toman en cuenta en el análisis.

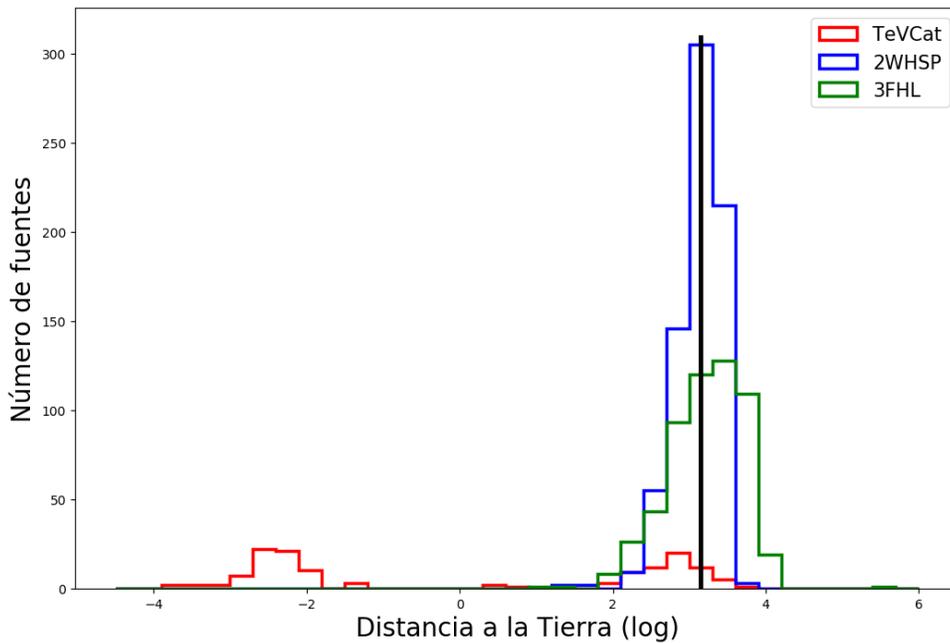


Figura 4.1 Distribución de las fuentes astrofísicas según cada catálogo en función del logaritmo de su distancia a la Tierra en Mpc. La línea negra indica la distancia máxima desde la cuál podrían llegar los rayos cósmicos ultra energéticos.

Los catálogos mencionados cuentan en su mayoría con datos de fuentes de origen extragaláctico, como podemos observar en la Fig. 4.2, donde la línea de color negro, que representa una distancia de 20 kpc a la Tierra, separa a las fuentes de origen galáctico de las de origen extragaláctico; en los lados izquierdo y derecho de la línea mencionada, respectivamente.

Podemos notar, en la Fig. 4.2, que solo el catálogo TeVCat cuenta con fuentes de origen galáctico. Mientras que las fuentes en los catálogos 2WHSP y 3FHL poseen únicamente datos de fuentes extragalácticas.

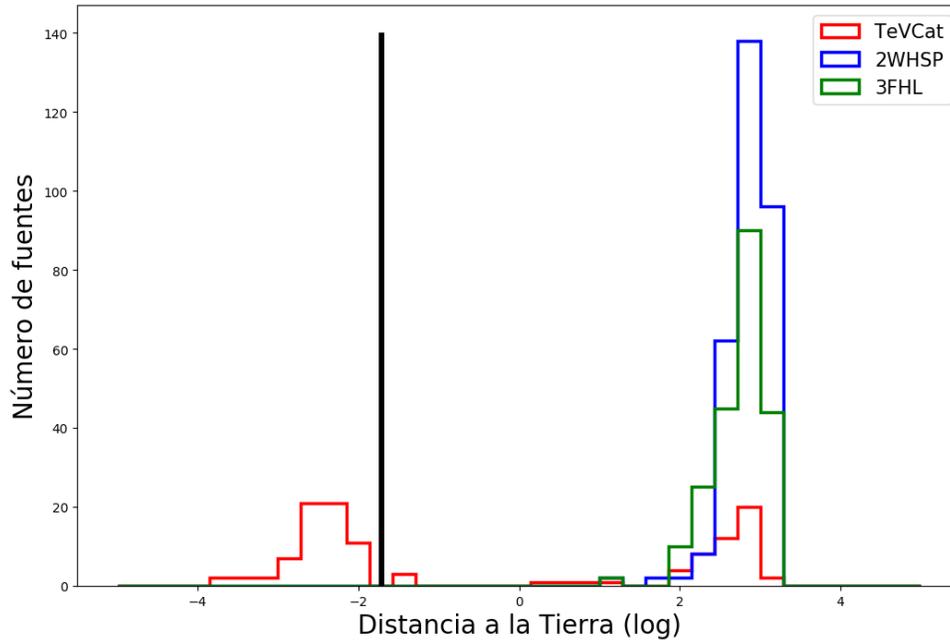


Figura 4.2 Distribución de las fuentes astrofísicas utilizadas en el análisis por catálogo en función de su distancia a la Tierra. La línea negra indica la separación entre fuentes galácticas y extragalácticas.

#### 4.1.1. TeVCat

Es un catálogo online para hacer astronomía en el rango de energías de  $TeV$ . Entre las fuentes catalogadas encontramos PWN (Pulsar Wind Nebulae, nebulosas de viento de púlsar), HBL (High-frequency blazars, un tipo de núcleo activo de galaxia), galaxias Starburst (galaxias con brote estelar), FSRQ (Flat spectrum radio quasars, un tipo de núcleo activo de galaxia), estrellas binarias, FRI (Fanaroff-Riley clase I, un tipo de núcleo activo de galaxia), SNR (Supernova Remnants, remanentes de supernova), BL LAC (objeto BL Lacertae, un tipo de núcleo activo de galaxia), cústers masivos de estrellas, halos y la Super burbuja de nuestra galaxia observada por el experimento Fermi. Contiene 244 fuentes de las cuales seleccionamos 135 fuentes que contienen la distancia como dato. El número de fuentes usadas en el análisis es de 119 luego del corte en la distancia.

La Fig. 4.3 muestra todas las fuentes utilizadas del TeVCat en un mapa con coordenadas galácticas. La presencia de varias fuentes en latitudes alrededor de cero evidencian su origen galáctico.

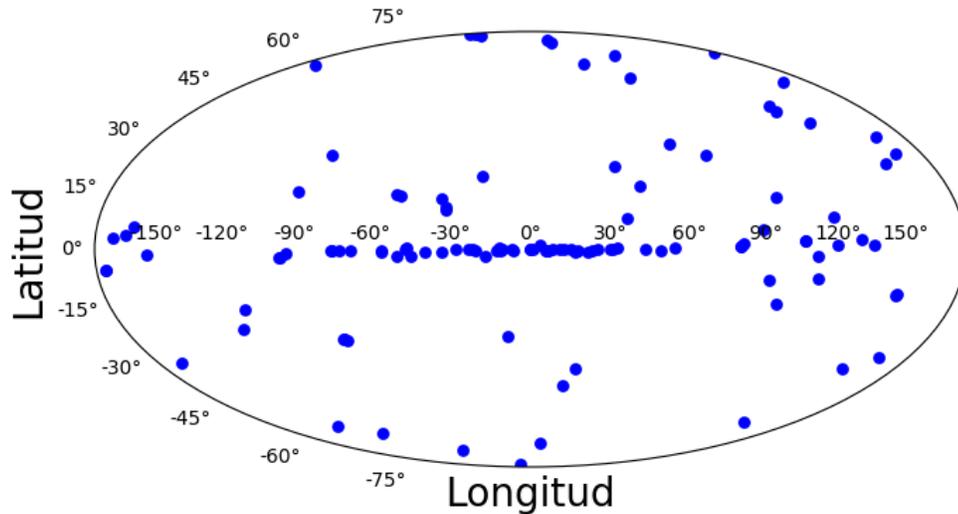


Figura 4.3 Mapa galáctico de las fuentes usadas del TeVCat.

#### 4.1.2. 2WHSP

2WHSP es el catálogo de blazars de alto pico sincrotrón, incluyendo a posibles candidatos a estos blazars. El catálogo fue hecho a partir de varios estudios multifrecuencia en radio, infrarrojo y rayos-X. Este catálogo incluye 1691 fuentes de las cuales son tomadas 736 que cuentan con el parámetro de distancia. Las fuentes que quedan para el análisis de la correlación luego del corte en la distancia son 310.

La Fig. 4.4 nos muestra todas las fuentes catalogadas en el 2WHSP. Su origen extragaláctico se manifiesta por la ausencia de fuentes en el plano galáctico.

#### 4.1.3. 3FHL

El tercer catálogo de fuentes energéticas de Fermi-LAT (Fermi-Large Area Telescope) presenta objetos detectados con energías mayores a 10 GeV hasta 2 TeV en los 7 primeros años de toma de datos. Contiene 1558 fuentes registradas. De ellas usamos 549 pues poseen las variables que necesitamos y también porque evitamos que haya fuentes ya mencionadas en otros catálogos. La cantidad de fuentes utilizadas en el análisis es de 216, luego del descarte debido a la distancia. La distribución en coordenadas galácticas de estas fuentes se presenta en la Fig. 4.5.

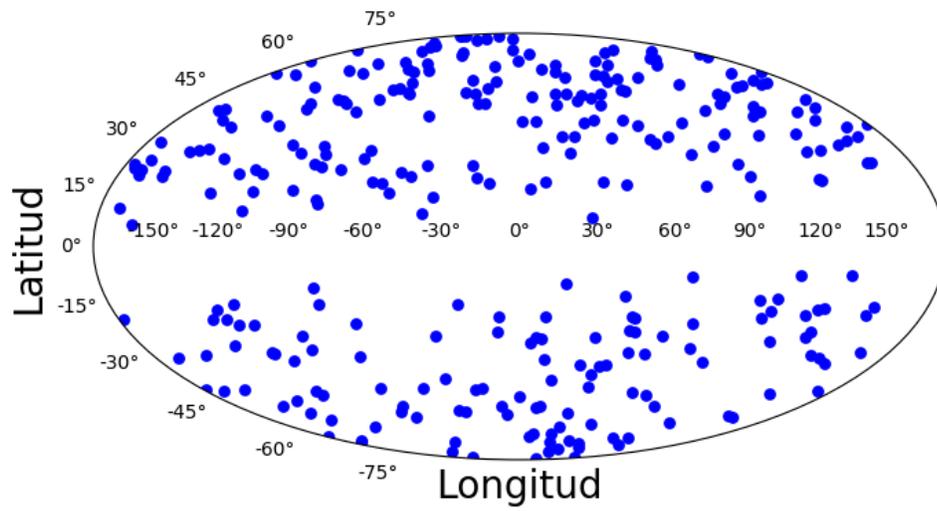


Figura 4.4 Mapa en coordenadas galácticas de las fuentes usadas del 2WHSP.

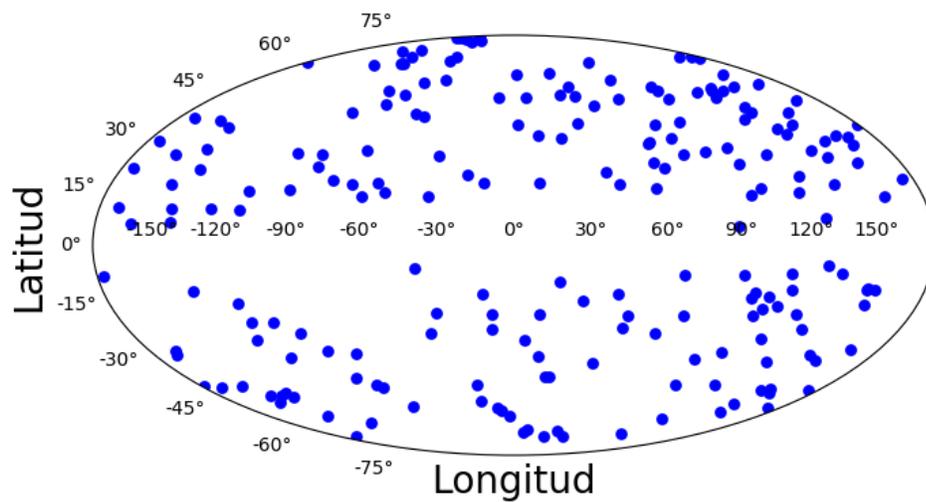


Figura 4.5 Mapa galáctico de las fuentes usadas del 3FHL.

# Capítulo 5

## Análisis de correlaciones

Para poder correlacionar los eventos de rayos cósmicos ultra energéticos con las fuentes de rayos gamma es necesario tomar en cuenta varios factores que serán descritos en este capítulo.

### 5.1. Deflexión por campos magnéticos

Durante su trayectoria, los rayos cósmicos experimentan interacciones con el medio astrofísico. Uno de los elementos con los que interactúan son los campos magnéticos de diversas fuentes galácticas y extra-galácticas. Estos campos afectan la trayectoria de los rayos cósmicos, mas dejan la energía y composición intactas.

Los campos magnéticos cambian las trayectorias originales de las partículas cargadas en su recorrido a la Tierra. Es posible determinar el desvío máximo que podrían tener. Ésta desviación está caracterizada por un ángulo con respecto al punto y dirección inicial.

A las energías consideradas los protones pueden llegar a la Tierra desde distancias no muy lejanas debido al límite GZK. Por otro lado, simulaciones Monte Carlo realizadas por diferentes experimentos muestran que los UHECR's pueden estar conformados también por núcleos atómicos ligeros hasta el hierro. Esta posible composición es tomada en cuenta en el presente trabajo.

Un UHECR, sin considerar pérdidas de energía, con número atómico  $Z$  (correspondiente a la carga del núcleo), energía  $E$ , distancia total recorrida  $D$ , que viaja a través de un campo magnético galáctico/extragaláctico con valor r.m.s. (raíz del cuadrado del valor medio)  $B$ , con longitud de correlación  $l_c$ ; tendrá una desviación angular  $\theta$  (1):

$$\theta(E, t) \simeq 5.82^\circ \left( \frac{Z}{Z_p} \right) \left( \frac{E}{6 \times 10^{19} eV} \right)^{-1} \left( \frac{D}{100 Mpc} \right)^{1/2} \left( \frac{l_c}{1 Mpc} \right)^{1/2} \left( \frac{B_\perp}{10^{-9} G} \right) \quad (5.1)$$

Esta ecuación es usada evento por evento para determinar su posible desviación angular. El número atómico es una cantidad que todavía los experimentos no pueden estimar por evento y solo se cuenta con una distribución de probabilidad, la cual será aplicada mediante simulaciones en este análisis. La energía del núcleo es un dato estimado por cada evento por el Observatorio Pierre Auger y Telescope Array. La distancia  $D$  se asumirá como la máxima posible dada la longitud de atenuación para la energía de la partícula o en caso contrario la distancia de la fuente astrofísica. Los campos magnéticos dependerán si esta distancia se ubica dentro o fuera de la galaxia, en cuyo caso será una combinación entre campos extra-galácticos y galácticos. Los campos magnéticos más allá del disco galáctico son poco conocidos e incluyen un posible campo extendido en el halo de la galaxia, así como un campo extra-galáctico de gran escala.

Una forma más precisa de obtener la dirección original de la partícula cargada es usando simulaciones. Para esto se podría utilizar el paquete CRPropa (22). Este realiza la propagación de núcleos altamente energéticos hasta el hierro en su recorrido a través del medio (extra)galáctico. Toma en consideración los procesos de producción de piones, foto-desintegración y pérdidas de energías por producción de pares así como decaimiento nuclear. Además, es capaz de modelar la deflexión en campos magnéticos (inter)galácticos para diferentes distribuciones de fuentes y campos magnéticos.

Sin embargo, por limitaciones de tiempo CRPropa no ha sido utilizado en este análisis. Otros trabajos (23; 24) han hecho uso de esta herramienta para probar el impacto del modelamiento de los campos magnéticos en las búsquedas de correlaciones de rayos cósmicos ultra energéticos, en estos casos con neutrinos.

### 5.1.1. Campo magnético extra-galáctico

Debido a las altas energías, es muy probable que los UHECR's se hayan originado en alguna fuente extra-galáctica, por lo tanto hay un ángulo de deflexión debido al campo magnético extra-galáctico. Este ángulo es calculado a partir de la ecuación (5.1). Se considera que para campos magnéticos extra-galácticos el valor promedio del campo magnético es de  $3 \text{ nG}$  y su longitud de correlación es  $1 \text{ Mpc}$ .

### 5.1.2. Campo magnético galáctico

La desviación causada por el campo magnético galáctico, se calcula considerando un campo magnético de  $3 \text{ } \mu\text{G}$  y una longitud de correlación de  $1 \text{ kpc}$ . La distancia

considerada para aquellos UHECR's provenientes de fuentes extragalácticas es 20 *kpc*, cantidad que se asemeja al diámetro del disco galáctico, aunque dependiendo de la dirección de llegada esta será efectivamente menor. Para los UHECR's cuyas fuentes son galácticas tendrán como distancia total recorrida al límite GZK o la distancia a la que se encuentra tal fuente.

## 5.2. Longitud de atenuación

Una de los procesos por los cuales puede atravesar un rayo cósmico durante su trayectoria en el medio intergaláctico hacia la Tierra es la interacción con el fondo cósmico de microondas, el cual afecta su energía y composición. En el presente trabajo no consideramos pérdidas de energía o alteraciones en la composición de los rayos cósmicos haciendo un corte en las distancias posibles desde las cuales un rayo cósmico podría originarse. Para poder realizar un análisis basado en estas distancias, es necesario conocer el límite GZK de los rayos cósmicos para cada intervalo de energía y composición considerada.

El límite de Greisen - Zatsepin - Kuzmin (GZK) (25; 26) es un umbral de energía que para los protones tiene un valor aproximado de  $5 \times 10^{19}$  eV. A partir de esta energía se da la posibilidad de que un protón interactúe con un fotón de la radiación cósmica de fondo, en el sistema de centro de masa de ambas partículas, y se obtenga como producto un protón y un pión, tras el decaimiento de una resonancia Delta, reduciendo la energía inicial del protón por debajo del límite.

En la Fig. 5.1 podemos observar para diferentes núcleos como varía la longitud de atenuación según sus energías. Vemos que los núcleos más ligeros son atenuados a distancias más cortas que los protones para las más altas energías. Estas distintas longitudes de atenuación son tomadas en cuenta en el análisis, de manera que estos núcleos no puedan llegar de fuentes más lejanas que esta longitud.

## 5.3. Corrección de energía

Los datos usados provienen de mediciones realizadas por el Observatorio Pierre Auger y Telescope Array. Debido a que estos experimentos tienen sus propios métodos de toma y análisis de datos (diferentes modelos en la emisión de fluorescencia), existe una diferencia de medidas en la energía de un  $\approx 12\%$  a 1 EeV (28) y algo menor para energías mayores. Por esta razón se aplica una corrección a las energías medidas por el Observatorio Pierre Auger con un incremento del 12% para que los datos puedan ser analizados en conjunto con los de Telescope Array.

En la Fig. 5.2 se muestra la distribución de los eventos según su energía corregida para la muestra de PAO y TA. Los eventos más energéticos corresponden a TA con

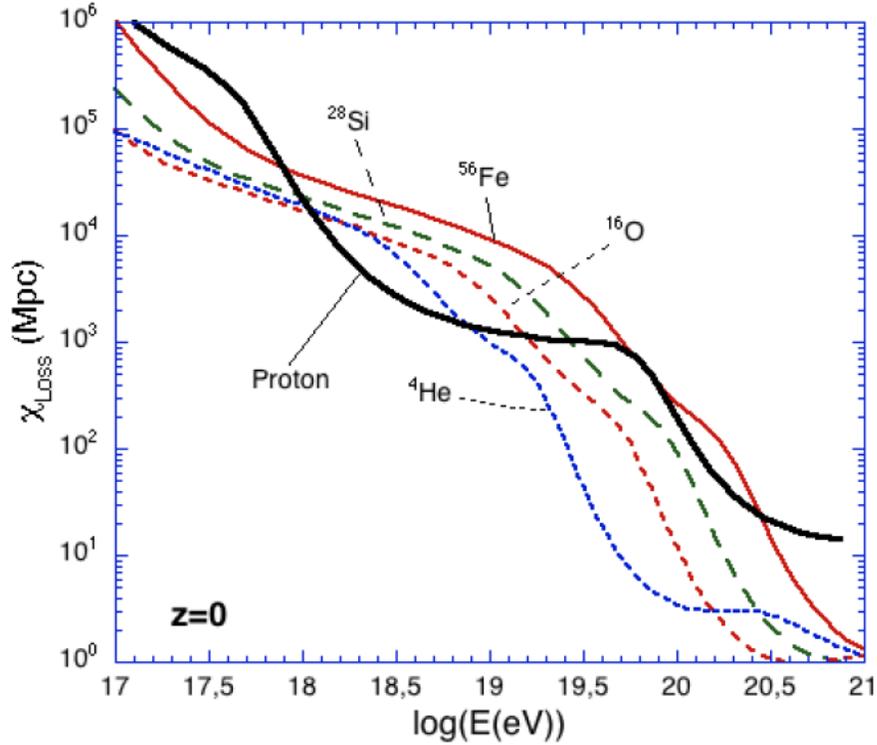


Figura 5.1 Evolución según la energía, para  $z=0$ , de la longitud de atenuación para diferentes núcleos (27).

una energía de  $\sim 10^{20.2}$  eV.

## 5.4. Composición de rayos cósmicos

Simulaciones Monte Carlo realizadas por la colaboración del Observatorio Pierre Auger para calcular la profundidad máxima de las cascadas de partículas, concluyen que los modelos de predicción no dan buenos resultados considerando que los rayos cósmicos están compuestos solo de protones y núcleos de hierro. Las simulaciones que arrojan buenos resultados consideran más núcleos como se muestra en la Fig. 5.3, donde se observan las fracciones estimadas mediante simulación para una combinación de protones, helio, nitrógeno y hierro.

Los datos con los que se está trabajando incluyen UHECR's a energías superiores a las mostradas en la Fig. 5.3, por lo cual asumimos que a partir del valor  $3 \times 10^{19}$  eV, los rayos cósmicos tienen un porcentaje constante.

Como no se sabe con certeza el tipo de núcleo evento por evento hemos usado simulaciones. Se han realizado cien simulaciones de la composición, obteniendo aleatoriamente para cada evento el tipo de núcleo de una distribución uniforme que toma

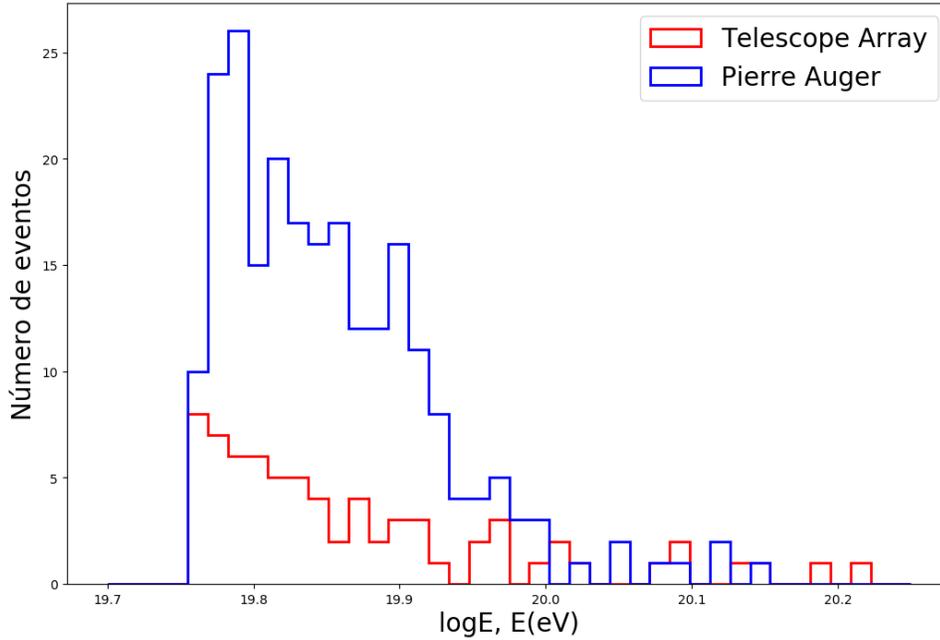


Figura 5.2 Distribución energética de los eventos seleccionados de Pierre Auger y Telescope Array.

en cuenta las fracciones de cada uno. Con este conjunto completo de datos que incluye el tipo de núcleo y su energía corregida se puede estimar la longitud de atenuación y de esta manera la máxima distancia que podría viajar el núcleo. Con eso se procede a estimar la desviación angular con la cual se busca la correlación espacial con fuentes astrofísica de rayos gamma dentro de esa distancia máxima de recorrido.

## 5.5. Factores de prueba

Si se realizan varias pruebas o simulaciones con un mismo conjunto de datos se debe tomar en cuenta una penalidad (factor de prueba) (30) al momento de dar la significancia final del análisis. Si se aumentan las pruebas sin incluir este factor, es más probable rechazar la hipótesis nula, encontrándose un supuesto descubrimiento, cuando en realidad se trataba de una fluctuación estadística del fondo.

El factor de prueba,  $T$ , dependerá del número de experimentos,  $N$ , (puede representar el número de fuentes en un catálogo, intentos o divisiones del mapa galáctico) y de la probabilidad (p-value) previa a la corrección  $P_{pre}$ . Si los experimentos son independientes se calcula como:

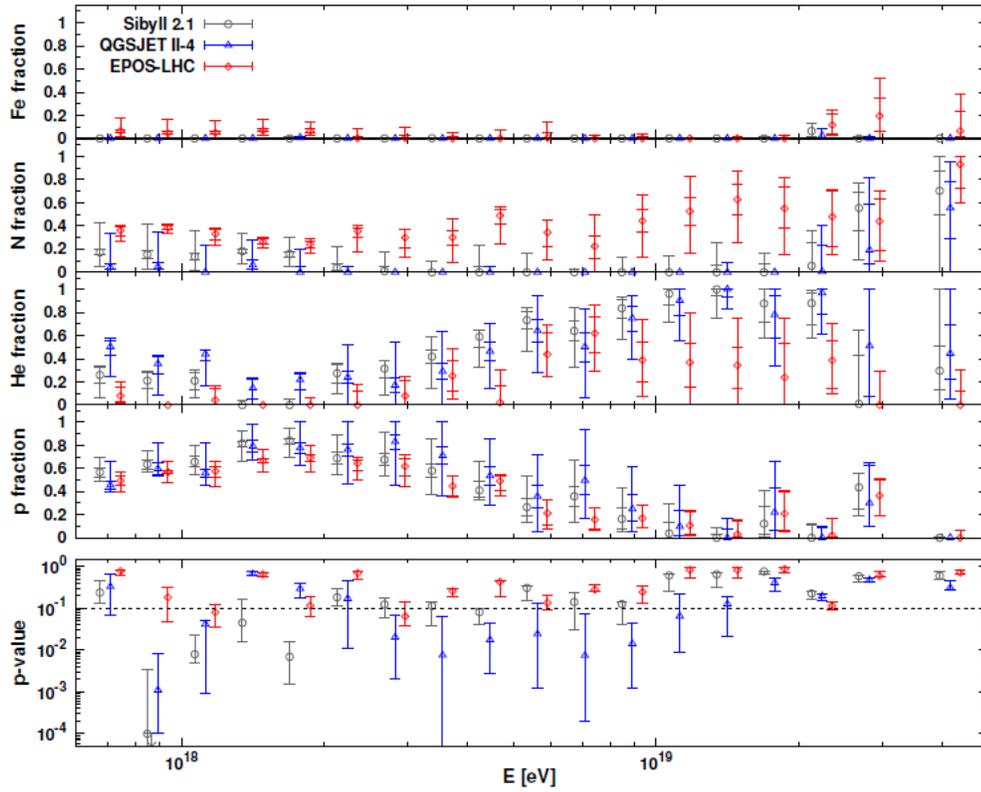


Figura 5.3 Fracciones estimadas según energía de los núcleos atómicos considerados en una mezcla compleja de protones, helio, nitrógeno y hierro, para tres tipos de simulaciones (29).

$$T = \frac{1 - (1 - P_{pre})^N}{P_{pre}} \quad (5.2)$$

Si el p-value es bastante pequeño, el factor es igual al número de experimentos y constituye una aproximación conservadora. El factor de prueba también se puede calcular mediante simulaciones dando un valor más preciso.

Solo si existieran correlaciones altas entonces sería necesario corregir el resultado usando estos factores de prueba, de lo contrario la significancia sería ya desde el inicio muy baja como para poder descartar la hipótesis nula. Para el presente análisis los factores de prueba se dan por el número de simulaciones y número de fuentes.

## 5.6. Metodología

Con el fin de buscar una correlación entre fuentes astrofísicas conocidas de rayos gamma y eventos ultra-energéticos de rayos cósmicos se tomará en cuenta el siguiente procedimiento.

Se parte de los datos de eventos de PAO (49) y TA (20) que incluyen las coordenadas con las que llegan a la atmósfera terrestre y la energía corregida para poder comparar ambos experimentos. La energía permite calcular una distancia máxima (longitud de atenuación) desde la cual el rayo cósmico habría viajado sin haber interactuado con el fondo cósmico de microondas. Luego se genera la composición aleatoria de rayos cósmicos evento por evento de manera que refleje las fracciones obtenidas por PAO para protones, helio, nitrógeno y hierro. Todos estos parámetros sirven para calcular (Ec. 5.1) el máximo desvío posible que los UHECR's podrían haber experimentado en su trayectoria al interactuar con el campo magnético galáctico y extragaláctico, según sea el caso de la ubicación de la fuente.

Si las coordenadas de llegada a la atmósfera y el máximo desvío en la trayectoria de un rayo cósmico son conocidos, entonces es posible encontrar una región en el mapa galáctico de donde pudo haberse originado. Las fuentes conocidas de rayos gamma cuyas coordenadas se encuentren en tales regiones son posibles fuentes de estos rayos cósmicos y son consideradas en el análisis.

Si una posible fuente se encuentra a una distancia menor que el máximo permitido por la longitud de atenuación, entonces se vuelve a calcular la máxima desviación angular utilizando la distancia de la fuente. Si los eventos de UHECR no se encuentran dentro de esta nueva región angular, la fuente es descartada.

Se analiza el total de 69 eventos de UHECRs buscando correlaciones para las fuentes en cada catálogo por separado. Se repite 100 veces la asignación aleatoria del tipo de núcleo para cada evento. En cada simulación se cuenta el porcentaje de eventos con una posible fuente asociada.

En el caso de una alta correlación se podría calcular el p-value corregido por el factor de prueba de la siguiente manera. Asumiendo la hipótesis nula que no existe correlación, se generan 1000 distribuciones aleatorias de la distribución espacial de los eventos. Se mantiene la coordenada de declinación, pero se extrae aleatoriamente un valor de una distribución uniforme en ascensión recta. Los otros parámetros como energía, longitud de atenuación y composición no se alteran. Con estas nuevas ubicaciones del *fondo* se analizan las correlaciones. La prueba estadística es el porcentaje de fuentes correlacionadas. A partir de la distribución de los 1000 conjuntos aleatorios de eventos se puede calcular el p-value con el valor de las correlaciones observadas. Por el hecho de usar los 3 catálogos se podría aplicar una nueva corrección usando la Ec. 5.2.

# Capítulo 6

## Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de la búsqueda de la correlación entre los 69 eventos de UHECR's tomados del Observatorio Pierre Auger y del Telescope Array, y las fuentes de rayos gamma tomadas de los catálogos TeVCat (119 fuentes), 2WHSP (310 fuentes) y 3FHL (216 fuentes). Se define una correlación si la fuente se encuentra dentro de la distancia permitida y la distancia angular entre una fuente y el evento es menor al error angular del evento al interactuar con el campo magnético galáctico y extragaláctico. Solo son consideradas desviaciones angulares menores o iguales a  $20^\circ$ .

### 6.1. Correlación con el catálogo TeVCat

En las Fig. y Fig. se puede observar las desviaciones angulares calculadas con respecto a los eventos y a las fuentes, respectivamente, para correlaciones encontradas en uno de los 100 test de composición de UHECR. Se muestran solo aquellos eventos que tienen una correlación con fuentes y solo las fuentes involucradas, pues el mapa con todos los eventos y fuentes resulta visualmente difícil de interpretar. Por ello, en la Fig. , las regiones encerradas por los errores angulares de los eventos (puntos azules) contienen a todas las fuentes (puntos rojos); y lo mismo se observa en la Fig. , donde los errores angulares contienen a todos los eventos.

En la Fig. 6.3 se observa el porcentaje por evento de la correlación con al menos una fuente del catálogo TeVCat, para las 100 simulaciones de la composición. Cerca del 20% de los eventos siempre tiene alguna fuente correlacionada, mientras que el 30% tiene, en alrededor del 80% de las simulaciones, una correlación. La mitad de los eventos carece de correlación.

En la Fig. 6.4 se muestra por cada fuente del catálogo el porcentaje de coincidencia con por lo menos un evento UHECR para las 100 simulaciones de la composición. Se puede notar que la mayoría de las fuentes iniciales (cerca del 50%) es más probable

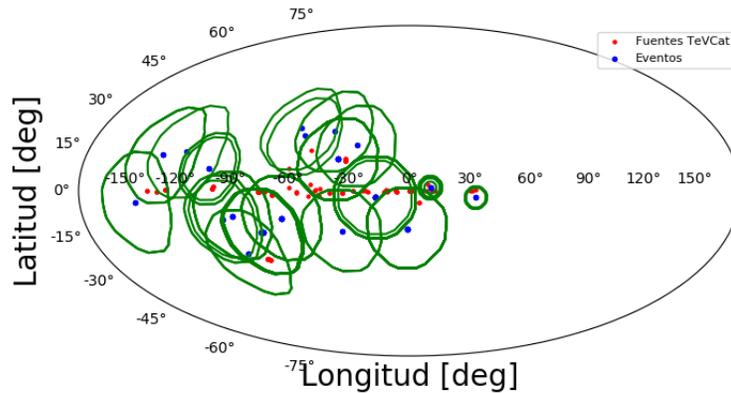


Figura 6.1 Error angular (menor o igual a  $20^\circ$ ) de los eventos para un test de composición aleatoria de los UHECR. Se muestran solo aquellos eventos y fuentes que presentan una correlación.

que tenga una coincidencia. Esto se puede explicar dado que las fuentes catalogadas por TeVCat están ordenadas de acuerdo a la distancia, las primeras 71 fuentes son de origen galáctico y las 48 restantes son de origen extragaláctico. Es decir, es más probable que exista una correlación de eventos con fuentes cercanas a la Tierra, que con aquellas fuentes muy lejanas (extragalácticas).

Debido a que se ha encontrado la distancia como un parámetro de las correlaciones, en la Fig. 6.5 se muestra como, en promedio, son las fuentes de origen galáctico las que tienen correlación con al menos un evento de UHECR. Otra forma clara de visualizar la probabilidad de correlación de acuerdo a la distancia es en un mapa galáctico, en el cual los puntos del eje horizontal corresponden a puntos espaciales ubicados dentro de la Vía Láctea. En la Fig. 6.6 se puede observar claramente que las fuentes galácticas tienen una alta probabilidad (el 20% de las fuentes totales tiene una probabilidad del 100%) de tener una correlación con al menos un evento de UHECR, y se puede notar como la probabilidad disminuye rápidamente cuando las fuentes son extra-galácticas. Sin embargo, es posible encontrar algunas fuentes de origen extra-galáctico que poseen una buena probabilidad de correlación así como algunas fuentes de origen galáctico que no poseen correlación alguna.

En la Tabla 3 se listan las 10 fuentes con mayor correlación de eventos para las diferentes simulaciones de composición de masas. El tipo de fuentes que se repite más corresponde a las nebulosas de viento de púlsar (PWN).

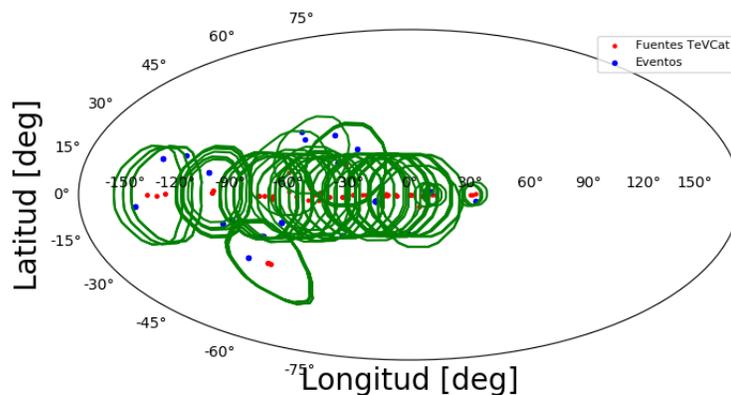


Figura 6.2 Error angular (menor o igual a  $20^\circ$ ) asumiendo que el evento proviene de la fuente, para un test de composición aleatoria de los UHECR. Se muestran solo aquellos eventos y fuentes que presentan una correlación.

## 6.2. Correlación con el catálogo 2WHSP

A continuación se presentan resultados similares para el catálogo 2WHSP. La Fig. 6.7 muestra el porcentaje de correlación por evento. Para este catálogo la correlación es prácticamente nula. Lo que se puede atribuir al hecho que todas las fuentes sean extragalácticas y se encuentren casi a más de 100 Mpc.

En consecuencia, también en la Fig. 6.4 donde se muestra por cada fuente el porcentaje de coincidencia, se observa que ninguna fuente del catálogo tiene una porcentaje de coincidencias mayor al 20 %.

## 6.3. Correlación con el catálogo 3FHL

Finalmente se muestran los porcentajes de correlación para el catálogo 3FHL en las Fig. 6.9 y 6.10. Los resultados son similares al catálogo 2WHSP, pues también las fuentes son extragalácticas. Los porcentajes de correlación son en todos los casos menores a 20 %.

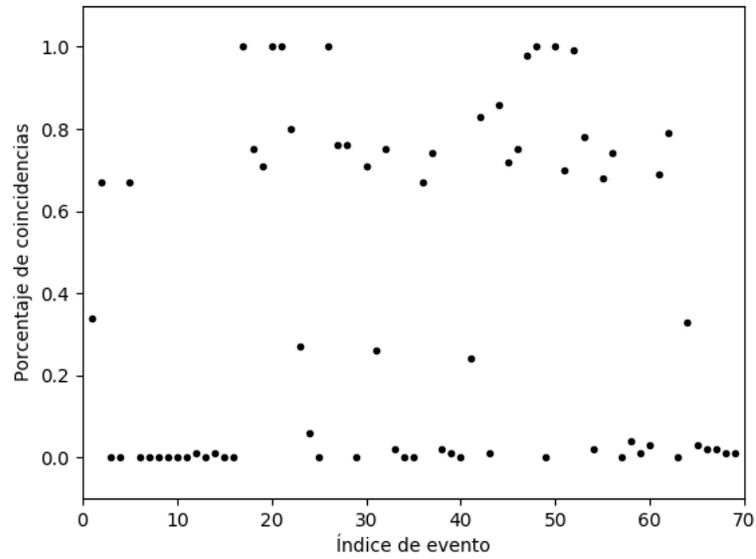


Figura 6.3 Probabilidad de encontrar para cada uno de los 69 eventos UHECR al menos una fuente correlacionada usando el catálogo TeVCat.

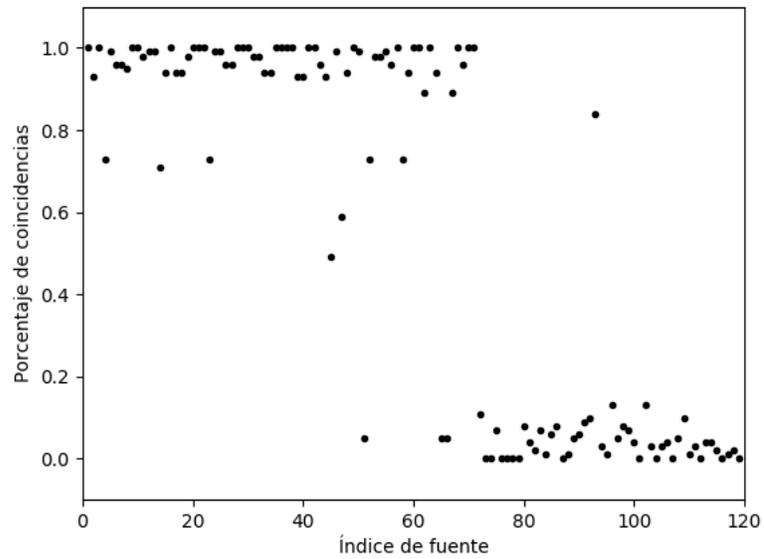


Figura 6.4 Probabilidad para cada fuente del catálogo TeVCat de encontrar al menos un evento UHECR correlacionado. Las fuentes del catálogo están ordenadas por distancia a la Tierra.

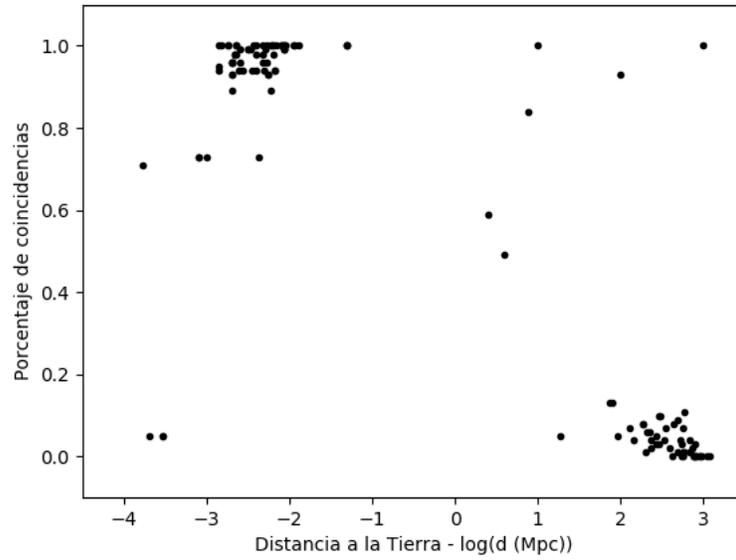


Figura 6.5 Probabilidad para cada fuente del catálogo TeVCat de encontrar al menos un evento UHECR correlacionado en función al logaritmo de la distancia a la Tierra.

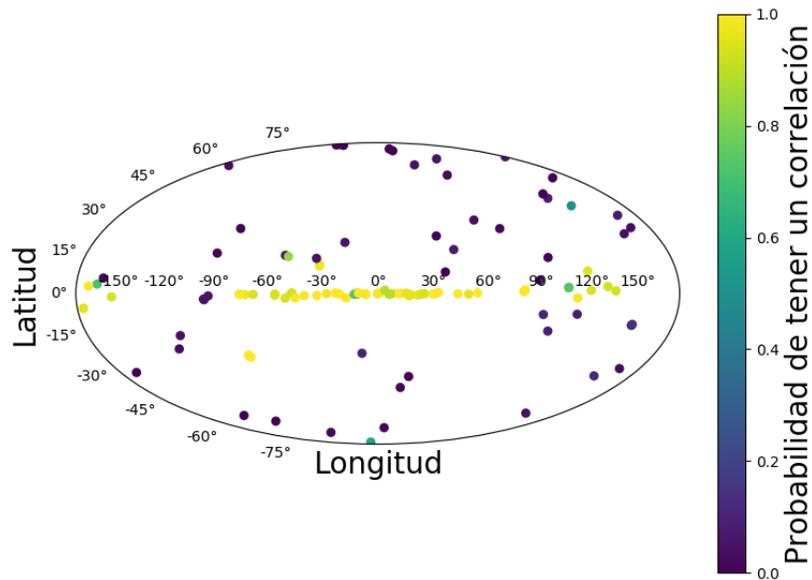


Figura 6.6 Mapa galáctico de las fuentes del catálogo TeVCat, coloreadas de acuerdo a la probabilidad de coincidencia con un evento de UHECR.

Table 3. Fuentes con mayor correlación

Nombre	Longitud	Latitud	Tipo	Distancia
Westerlund 2	-75.78	-0.40	Clúster masivo de estrellas	0.008
ARGO J2031+4157	-99.04	1.79	Superbubble	0.0014
PSR J2032+4127	-99.77	1.02	Binaria	0.0018
TeV J2032+4130	-99.74	1.07	PWN	0.0018
SNR G327.1-01.1	-32.84	-1.07	PWN	0.009
HESS J1026-582	-75.20	-0.52	PWN	0.0023
SNR G054.1+00.3	-125.90	0.25	PWN	0.0062
MSH 15-52	-39.66	-1.19	PWN	0.0052
Cassiopeia A	-68.28	-2.12	Shell	0.0034
HESS J1729-345	-6.55	-0.12	No identificado	0.0032

Note. — Descripción de columnas: (1) Nombre de la fuente (2) Longitud galáctica (3) Latitud galáctica (4) Tipo de fuente (5) Distancia a la Tierra (Mpc)

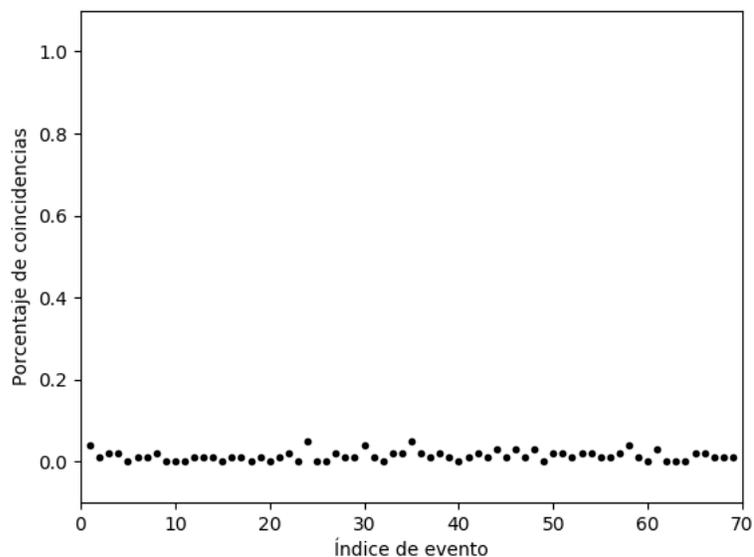


Figura 6.7 Probabilidad de encontrar para cada uno de los 69 eventos UHECR al menos una fuente correlacionada usando el catálogo 2WHSP.

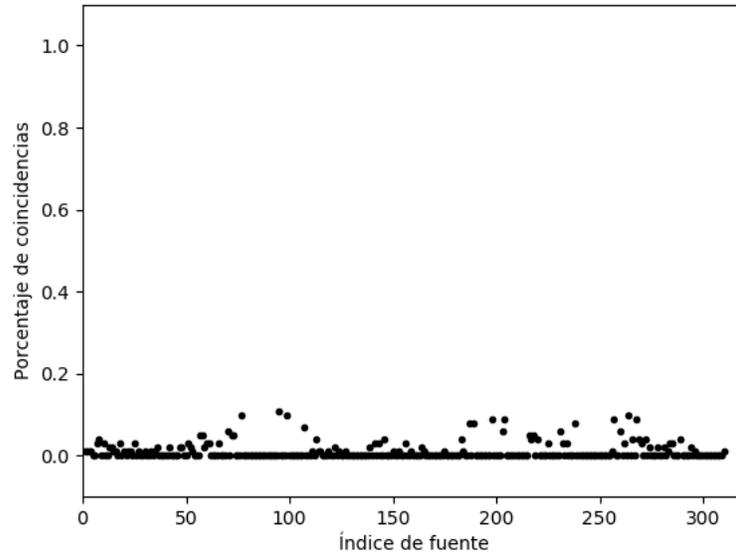


Figura 6.8 Probabilidad para cada fuente del catálogo 2WHSP de encontrar al menos un evento UHECR correlacionado.

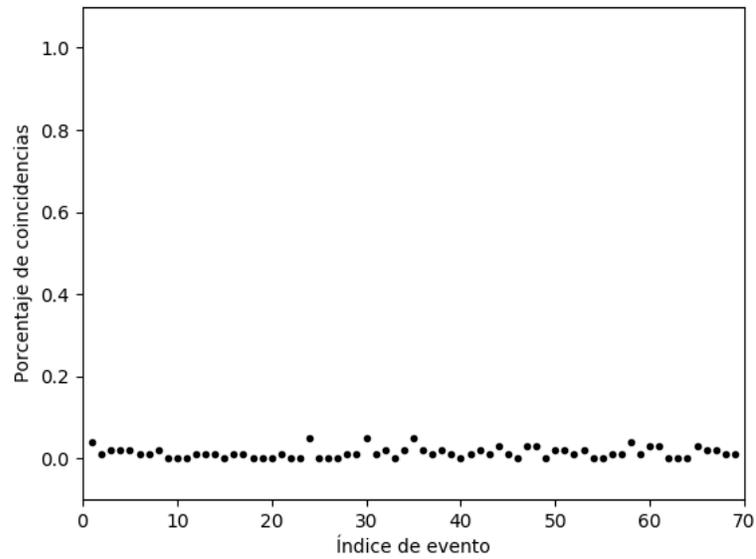


Figura 6.9 Probabilidad de encontrar para cada uno de los 69 eventos UHECR al menos una fuente correlacionada usando el catálogo 3FHL.

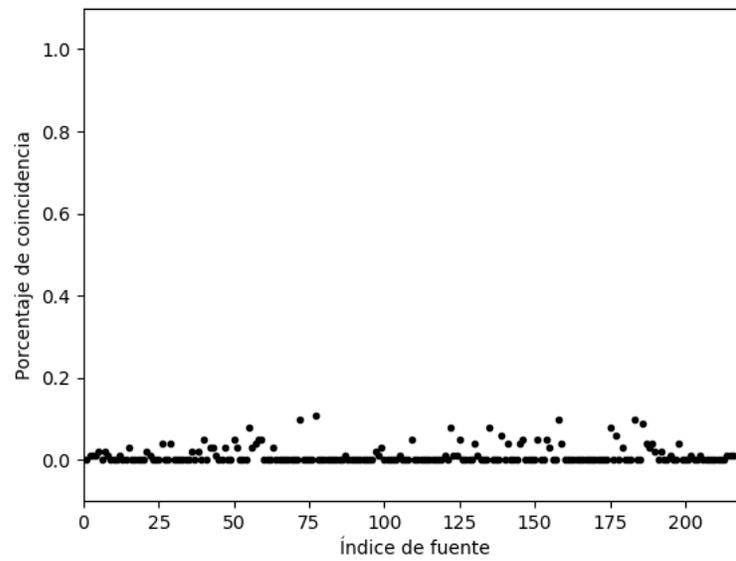


Figura 6.10 Probabilidad para cada fuente del catálogo 3FHL de encontrar al menos un evento UHECR correlacionado.

# Capítulo 7

## Conclusiones

En este trabajo se han buscado correlaciones entre eventos de ultra alta energía de rayos cósmicos con fuentes astrofísicas de rayos gamma bajo la suposición que un modelo hadrónico es responsable de la aceleración de los rayos cósmicos. Si bien es cierto que se han realizado análisis similares en los últimos años, la particularidad de éste recae en haber incluido la composición de masas de los eventos de rayos cósmicos mediante una simulación basada en los resultados del experimento Pierre Auger. Además incluye un corte en la distancia máxima de las fuentes basado en la longitud de atenuación según el tipo de partícula. Por simplicidad se usó una fórmula analítica para determinar la desviación de los rayos cósmicos debida a campos magnéticos galácticos y extragalácticos.

La búsqueda de correlaciones se aplicó a 3 catálogos de fuentes de rayos gamma. El catálogo TeVCat, según muestran los resultados, tiene catalogada la mayor cantidad de fuentes que muestran una correlación con eventos de UHECR; en promedio, se tiene un 36,62% de eventos que muestran correlación con alguna fuente de este catálogo por cada test. Por otro lado, el porcentaje de eventos que tienen correlación con alguna fuente de los catálogos 2WHSP y 3FHL son 1,36% y 1,33%, respectivamente; resultado que no favorece el origen extra-galáctico de los rayos cósmicos. A partir de los resultados se puede concluir que las fuentes galácticas son las que presentan la mayor probabilidad de estar correlacionadas. Estas fuentes se encontraban en el TeVCat. Este resultado debería ser contrastado con un fondo aleatorio para poder hallar la significancia estadística corregida por el hecho de haber analizado varios puntos en el mapa galáctico.

Por otro lado, si las fuentes fueran de origen galáctico, existe el problema de que los rayos cósmicos hayan podido ser acelerados hasta tan altas energías. Según el criterio de Hillas se necesitarían fuentes de dimensiones mayores o campos magnéticos más potentes. En todo caso, del resultado de fuentes con mayor correlación se puede observar la mayor presencia de nebulosas de viento de púlsar, que podría ser una indicación del tipo de fuentes que están acelerando los rayos cósmicos.

Un análisis más profundo podría incluir el rastreo de las partículas a través de los campos galácticos y extragalácticos bajo diferentes modelos usando simulaciones, como es el caso del paquete CRPropa. Se podría además hacer una pre-selección de las fuentes astrofísicas con mayor potencial que pasen los criterios de ser posibles aceleradores hadrónicos y que dadas sus características puedan acelerar rayos cósmicos hasta las más altas energías.



# Bibliografía

- [1] P. Bhattacharjee and G. Sigl, “Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays,” *Phys. Rept.*, vol. 327, pp. 109–247, 2000.
- [2] N. Fraija, “Correlation of  $\gamma$ -Ray and High-energy Cosmic Ray Fluxes from the Giant Lobes of Centaurus A,” *Astrophys. J.*, vol. 783, p. 44, 2014.
- [3] E. Alvarez, A. Cuoco, N. Mirabal, and G. Zaharijas, “Searches for correlation between UHECR events and high-energy gamma-ray Fermi-LAT data,” *JCAP*, vol. 1612, p. 023, 2016.
- [4] E. Resconi, S. Coenders, P. Padovani, P. Giommi, and L. Caccianiga, “Connecting blazars with ultrahigh-energy cosmic rays and astrophysical neutrinos,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 468, no. 1, pp. 597–606, 2017.
- [5] A. Aab *et al.*, “An Indication of anisotropy in arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays through comparison to the flux pattern of extragalactic gamma-ray sources,” *Astrophys. J.*, vol. 853, no. 2, p. L29, 2018.
- [6] M. Kagaya, H. Katagiri, T. Yoshida, and A. Fukuda, “Constraints on Physical Conditions for the Acceleration on Ultra-high-energy Cosmic Rays in Nearby Active Galactic Nuclei (AGNs) Observed with the Fermi Large Area Telescope,” *Astrophys. J.*, vol. 850, no. 1, p. 33, 2017.
- [7] B. A. Nizamov and M. S. Pshirkov, “Constraints on the AGN flares as sources of ultra-high energy cosmic rays from the Fermi-LAT observations,” 2018.
- [8] C. Patrignani *et al.*, “Review of Particle Physics,” *Chin. Phys.*, vol. C40, no. 10, p. 100001, 2016.
- [9] C. Grupen, *Astroparticle physics*. Berlin: Springer, 2005. Translation of *Astroteilchenphysik* : Wiesbaden:Vieweg, 2000.
- [10] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, “CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers,” 1998.
- [11] J. Abraham *et al.*, “Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory,” *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. A523, pp. 50–95, 2004.

- [12] A. Aab *et al.*, “Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above  $8 \times 10^{18}$  eV,” *Science*, vol. 357, no. 6537, pp. 1266–1270, 2017.
- [13] T. Abu-Zayyad *et al.*, “The surface detector array of the Telescope Array experiment,” *Nucl. Instrum. Meth.*, vol. A689, pp. 87–97, 2013.
- [14] R. U. Abbasi *et al.*, “Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment,” *Astrophys. J.*, vol. 790, p. L21, 2014.
- [15] R. Ruffini, G. V. Vereshchagin, and S. S. Xue, “Cosmic absorption of ultra high energy particles,” *Astrophys. Space Sci.*, vol. 361, p. 82, 2016.
- [16] M. Amenomori *et al.*, “First Detection of Photons with Energy beyond 100 TeV from an Astrophysical Source,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, p. 051101, Jul 2019.
- [17] M. L. Ahnen *et al.*, “Long-term multi-wavelength variability and correlation study of Markarian 421 from 2007 to 2009,” *Astron. Astrophys.*, vol. 593, p. A91, 2016.
- [18] A. De Angelis and M. Mallamaci, “Gamma-Ray Astrophysics,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 133, p. 324, 2018.
- [19] S. P. Wakely and D. Horan, “TeVCat: An online catalog for Very High Energy Gamma-Ray Astronomy,” *International Cosmic Ray Conference*, vol. 3, pp. 1341–1344, 2008.
- [20] Y. L. Chang, B. Arsioli, P. Giommi, and P. Padovani, “2WHSP: A multi-frequency selected catalogue of high energy and very high energy  $\gamma$ -ray blazars and blazar candidates,” *Astron. Astrophys.*, vol. 598, p. A17, 2017.
- [21] M. Ajello *et al.*, “3FHL: The Third Catalog of Hard Fermi-LAT Sources,” *Astrophys. J. Suppl.*, vol. 232, no. 2, p. 18, 2017.
- [22] R. Alves Batista, A. Dundovic, M. Erdmann, K.-H. Kampert, D. Kuempel, G. Müller, G. Sigl, A. van Vliet, D. Walz, and T. Winchen, “CRPropa 3 - a Public Astrophysical Simulation Framework for Propagating Extraterrestrial Ultra-High Energy Particles,” *JCAP*, vol. 1605, no. 05, p. 038, 2016.
- [23] J. A. Carpio and A. M. Gago, “Impact of Galactic magnetic field modeling on searches of point sources via ultrahigh energy cosmic ray-neutrino correlations,” *Phys. Rev.*, vol. D93, no. 2, p. 023004, 2016.
- [24] J. A. Carpio and A. M. Gago, “Roadmap for searching cosmic rays correlated with the extraterrestrial neutrinos seen at IceCube,” *Phys. Rev.*, vol. D95, no. 12, p. 123009, 2017.

- [25] K. Greisen, “End to the cosmic ray spectrum?,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 16, pp. 748–750, 1966.
- [26] G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, “Upper limit of the spectrum of cosmic rays,” *JETP Lett.*, vol. 4, pp. 78–80, 1966. [Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz.4,114(1966)].
- [27] D. Allard, “Propagation of extragalactic ultra-high energy cosmic-ray nuclei : implications for the observed spectrum and composition,” in *Proceedings on 44th Rencontres de Moriond on Very High Energy Phenomena in the Universe: La Thuile, Italy, February 1-8, 2009*, pp. 219–226, 2009.
- [28] V. Verzi, D. Ivanov, and Y. Tsunesada, “Measurement of Energy Spectrum of Ultra-High Energy Cosmic Rays,” *PTEP*, vol. 2017, no. 12, p. 12A103, 2017.
- [29] A. Aab *et al.*, “Depth of maximum of air-shower profiles at the Pierre Auger Observatory. II. Composition implications,” *Phys. Rev.*, vol. D90, no. 12, p. 122006, 2014.
- [30] E. Gross and O. Vitells, “Trial factors for the look elsewhere effect in high energy physics,” *Eur. Phys. J.*, vol. C70, pp. 525–530, 2010.
- [31] W. Hanlon, D. Ikeda, T. Stroman, J. P. Lundquist, and Y. Zhezher, “Telescope Array Composition Summary,” *PoS*, vol. ICRC2017, p. 536, 2018.
- [32] Y. Zhezher, “Lower limit on the ultra-high-energy proton-to-helium ratio from the measurements of the tail of X max distribution,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1181, no. 1, p. 012031, 2019.
- [33] D. Fargion, P. Oliva, and P. G. D. S. Lucentini, “Uncorrelated Far Active Galactic Nuclei Flaring with their Delayed Ultra High Energy Cosmic Rays Events,” *JPS Conf. Proc.*, vol. 19, p. 011010, 2018.
- [34] D. Allard, M. Ave, N. Busca, M. A. Malkan, A. V. Olinto, E. Parizot, F. W. Stecker, and T. Yamamoto, “Cosmogenic Neutrinos from the propagation of Ultrahigh Energy Nuclei,” *JCAP*, vol. 0609, p. 005, 2006.