

Universidad de El Salvador
Facultad de Ciencias Naturales y Matemática
Escuela de Física



Trabajo de graduación

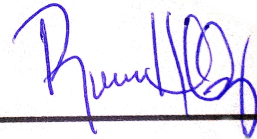
*“Estudio de ráfagas de rayos gamma en blazares,
observadas por Fermi-LAT”*

Presentado por
Bryan Alexis Andrés Jorge

Para optar al grado de:
Licenciado en Física

Asesores
Ph. D. José Rodrigo Sacahui Reyes
M. Sc. Raúl Antonio Henríquez Ortíz

Aprobación del asesor

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Raúl Antonio Henríquez Ortiz', written over a solid black horizontal line.

M. Sc. Raúl Antonio Henríquez Ortiz

Autoridades universitarias

Rector:

Maestro Roger Armando Arias Alvarado

Secretario General:

Lic. Cristobal Hernán Ríos Benítez

Fiscal General:

Lic. Rafael Humberto Peña Marín

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática:

Lic. Mauricio Hernán Lovo Córdova

Director de la Escuela de Física:

M.Sc César Armando Alvarado Batres

Ciudad Universitaria, 9 de abril de 2019

A Luna.

Agradecimientos

Este trabajo de graduación se realizó en colaboración con la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas (ECFM) de la Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC). Agradezco a los estudiantes de la ECFM que de una u otra forma contribuyeron a que este trabajo fuese posible: Argueta P., Mendoza S. D., García L. y especialmente a Osorio J. M.

Agradezco también a mis asesores, Sacahui J. R. y Henríquez R. A., quienes me guiaron durante el desarrollo de este trabajo de investigación. A mis compañeros y amigos, Larín W. A., Ramos D. O., Arce O. I., Quintanilla C. J., González M. A., Aguilar S. E. y Hernández K. G. Agradezco de manera especial el apoyo y ayuda recibida por parte de Martínez J. G. y Marroquín N. G.

También al personal docente de la facultad de Ciencias Naturales y Matemática, por la formación recibida en cada uno de los cursos. Al personal del centro de cómputo de la Escuela de Física, quienes permitieron el uso de las computadoras para realizar el análisis computacional requerido para desarrollar este trabajo. Finalmente, agradezco mi familia, por todo el apoyo brindado en mi carrera universitaria.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	VII
Introducción	IX
1 Núcleos galácticos activos	1
1.1 Galaxias activas	1
1.1.1 Espectro de los Núcleos Galácticos Activos	1
1.2 Taxonomía de los AGNs	3
1.2.1 Galaxias Seyfert	3
1.2.2 Radio galaxias	3
1.2.3 Cuásares	4
1.2.4 Objetos BL Lac	5
1.3 Modelo de Unificación	5
1.3.1 El agujero negro	7
1.3.2 El disco de acreción	8
1.3.3 Chorros y movimiento superlumínico	8
1.4 Blazares	9
1.4.1 Emisión a bajas energías	11
1.4.2 Emisión en altas energías	12
2 Metodología	14
2.1 Telescopio espacial Fermi de rayos gamma	14
2.1.1 Ajuste por máxima verosimilitud	16

2.1.2	Fermi Science Tools y HEASoft	17
2.2	Análisis de bloques Bayesianos	19
2.3	Procedimiento	20
2.3.1	Blazares candidatos	20
2.3.2	Curvas de luz	21
2.3.3	Identificación de las ráfagas	23
2.3.4	Análisis espectral	23
3	Análisis de resultados	25
3.1	Resultados de los ajustes espectrales	25
3.1.1	OP 313	27
3.1.2	MG1 J021114+1051	29
3.1.3	PG 1553+113	31
3.1.4	Markarian 421	33
3.1.5	TXS 0506+056	35
3.2	Discusión	37
4	Conclusiones y trabajo a futuro	42
A	Algoritmos utilizados	45
A.1	Algoritmo de bloques Bayesianos	45
A.2	Plot blocks	49
B	Sub productos del análisis	51
B.1	Archivo de configuración para OP313	51
B.2	Resultados descartados	52
B.3	Ajustes de 2008-2018	53

Índice de figuras

1.1	Distribución espectral de energía para varios tipos de AGNs.	2
1.2	Imagen en radio de Cygnus A.	4
1.3	Diagrama esquemático del actual paradigma de los AGNs	6
1.4	Esquema ilustrando cómo se da lugar el movimiento superlumínico	9
1.5	Definición de distintos tipos de blazares, basándose en el pico de la radiación de sincrotrón.	10
1.6	Curva de luz del blazar 3C279 en la banda de rayos gamma observadas por Fermi-LAT. [(Hayashida et al., 2015)]	10
2.1	Ilustración artística del Fermi-LAT (Créditos: NASA)	14
2.2	Ilustración de los principios de funcionamiento en el diseño del trazador de trayectorias del LAT.	15
2.3	Diagrama esquemático del LAT y el calorímetro en el que se mide la lluvia electromagnética del par electrón-positrón (Atwood et al., 2009).	16
2.4	Curva de luz del blazar OP 313 para los primeros diez años de observación del Fermi-LAT (Créditos: USAC, Guatemala)	22
3.1	Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar 3C 279	25
3.2	Distribución espectral de energía en rayos gamma para 3C 279	27
3.3	Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar OP 313	28
3.4	Distribución espectral de energía en rayos gamma para OP 313	29
3.5	Curva de luz y bloques Bayesianos de MG1 J021114+1051	29
3.6	Distribución espectral de energía en rayos gamma para MG1 J021114+1051	31
3.7	Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar PG 1553+113	31
3.8	Distribución espectral de energía en rayos gamma para PG 1553+113	33
3.9	Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar Markarian 421	33
3.10	Distribución espectral de energía en rayos gamma para Markarian 421	34
3.11	Curva de luz y bloques Bayesianos del Blazar TXS 0506+056	35
3.12	Distribución espectral de energía en rayos gamma para TXS 0506+056	36
3.13	Ajustes espectrales para OP 313, MG1 J02114+1051, PG 1553+113, Markarian 421 y TXS 0506+056 en sus periodos de actividad	38
3.14	Distribución espectral de energía de las ráfagas más brillantes de los 5 blazares estudiados.	40
B.3	Ajustes para los periodos completos de observación	53

Índice de tablas

1.1	Taxonomía de los AGNs	7
2.1	Blazares que coinciden espacialmente con los eventos de neutrinos	20
2.2	Muestra final de blazares	23
2.3	Fases activas del blazar OP 313	23
3.1	Ajuste espectral en rayos gamma para 3C 279	26
3.2	Ajuste espectral en rayos gamma para OP 313	28
3.3	Ajuste espectral en rayos gamma para MG1 J021114+1051	30
3.4	Ajuste espectral en rayos gamma para PG 1553+113	32
3.5	Ajuste espectral en rayos gamma para Markarian 421	34
3.6	Ajuste espectral en rayos gamma para TXS 0506+056	36

Resumen

Los neutrinos astrofísicos de altas energías descubiertos por el IceCube han dado inicio a la búsqueda del origen de estos eventos. Algunas de las fuentes más prometedoras para la emisión de neutrinos son los blazares, los cuales pertenecen a la subclase de núcleos galácticos activos cuyo chorro de materia está apuntando directamente hacia la Tierra (Urry y Padovani, 1995), esta estructura constituye un acelerador de partículas idóneo para la producción y emisión de neutrinos. En este trabajo de graduación se realizó un análisis temporal y espectral de las ráfagas de rayos gamma de una muestra de blazares que se encuentran en correlación espacial de $\pm 2^\circ$ con los eventos de neutrinos detectados por IceCube (Aartsen et al., 2016). Se estudiaron 3 objetos que cumplen con este criterio de selección (estos blazares son OP 313, MG1 J021114+1051 y TXS 0506+056) junto con otros dos blazares de tipo espectral HSP (PG 1553+113 y Markarian 421) para comparar los resultados de sus espectros.

Para realizar el análisis se necesitó de la información recolectada por el telescopio espacial Fermi de rayos gamma, el cual fue lanzado en junio de 2008 por la NASA y en sus primeros diez años de funcionamiento ha detectado diversas fuentes de rayos gamma, principalmente blazares. El telescopio cuenta con dos instrumentos a bordo: el LAT (Large Area Telescope) y el GBM (Gamma-ray Burst Monitor). Para el análisis se utilizaron solamente los datos del LAT, se trata de un telescopio de conversión de pares con un área efectiva de $\sim 9500 \text{ cm}^2$, vista angular de 2.4 sr y funciona en un rango de energías de 20 MeV a 300 GeV (Atwood et al., 2009).

Se generaron curvas de luz con ayuda de los datos de Fermi-LAT en la banda de los rayos gamma, de 0.1 GeV a 300 GeV en el periodo de septiembre 2008 a febrero 2018 utilizando el software `ScienceToolsv11r5p3`, `heasoft6.24` y `enrico`. En las curvas de luz de los blazares existen aumentos de actividad, este fenómeno es conocido como fases activas o ráfagas de rayos gamma. Para estudiar las propiedades espectrales de las ráfagas de rayos gamma se discriminaron los intervalos temporales en los que ocurrieron estas fases activas con ayuda del algoritmo de bloques Bayesianos, el cual es una técnica estadística utilizada para estudiar la variabilidad de una fuente (Scargle et al., 2013). Además, se utilizó un criterio más para seleccionar las fases activas, se estudiaron solamente aquellos intervalos en los cuales el flujo de los blazares superó su flujo medio más tres veces su desviación estándar (Vercellone et al., 2004). Finalmente se llevó a cabo el análisis de máxima verosimilitud para caracterizar la distribución espectral de energía (SED) en los periodos de actividad seleccionados.

Uno de los modelos que explican el SED de los blazares en la banda de los rayos gamma es el modelo SSC (Synchrotron Self-Compton), en el cual los electrones dentro del chorro

producen radiación de sincrotrón y crean fotones que luego interactúan con otros electrones mediante el efecto Compton inverso, de modo que al final de la interacción se genera radiación gamma. A partir de este modelo se aproximó el SED en el rango de energías de 0.1–300 GeV utilizando funciones de ajuste conocidas como ley de potencia (PL) y parábolas logarítmicas (LogP).

En general, el SED de las fases activas de los blazares analizados presenta algunas diferencias con respecto al obtenido en el periodo completo de observación y el espectro puede describirse con los modelos PL y LogP, siendo este último el que se ajusta mejor a los datos debido a la curvatura presente en el SED, esto se comprobó calculando el logaritmo de la función de verosimilitud \mathcal{L} obtenida para el ajuste PL y para el ajuste LogP y efectuando su diferencia, $-2\Delta L = -2(\ln \mathcal{L}_{\text{PL}} - \ln \mathcal{L}_{\text{LogP}})$.

Uno de los blazares estudiados, TXS 0506+056 es de especial importancia debido a que se encontraba en un estado activo cuando se lanzó la alerta de neutrino IceCube-170922A, esto lo convierte en el candidato más probable para la emisión de neutrinos y por lo tanto brindó una oportunidad para comparar sus características espectrales con los otros blazares de la muestra. Los resultados para TXS 0506+056 indican que su espectro en la banda de los 0.1 GeV a los 300 GeV está bien descrito por el modelo SSC usando el ajuste LogP, con índices espectrales $\alpha = 1.59 \pm 0.01$ y un factor de curvatura $\beta = 0.08 \pm 0.02$. Además, su espectro no difiere con el esperado para un blazar de tipo ISP, y los resultados indican que los procesos físicos en sus fases activas son los mismos que para el resto de objetos. Estos resultados demuestran que aún se deben estudiar a mayor detalle las propiedades físicas de los blazares de tipo espectral ISP como TXS 0506+056 para explicar cómo se da lugar la emisión de neutrinos.

Introducción

Las primeras investigaciones sobre galaxias activas iniciaron con Edward Fath, quien en 1908 estudió detalladamente la naturaleza de la emisión en las “nebulosas espirales” (Fath, 1909). Sus resultados revelaron que la galaxia NGC 1068 mostraba seis líneas fuertes de emisión que no concordaban con los resultados que se esperaban para este tipo de objetos. Años después, gracias a las observaciones del Hubble, Carl K. Seyfert estudió la emisión de algunas galaxias y reportó que un pequeño porcentaje de ellas parecían tener un núcleo muy brillante responsable de las líneas anchas de emisión debido a la presencia de átomos en diferentes estados de ionización (Seyfert, 1943). Este tipo de galaxias ahora se conocen como galaxias Seyfert en su honor.

Gracias a los avances en radio astronomía, en 1963 se descubrieron las galaxias 3C 48 y 3C 273, las cuales mostraban un espectro muy complejo y líneas de emisión muy fuertes que no podían identificarse en ese momento con ningún elemento conocido. En ese mismo año, Maarten Schmidt reconoció que las líneas correspondían a las series de Balmer con un corrimiento al rojo de $z = 0.158$ (Schmidt, 1963), este era un valor extremadamente grande en esa época. Con estos descubrimientos y algunos otros comenzaron los estudios sobre este tipo de objetos, ahora conocidos como núcleos galácticos activos (AGNs por sus siglas en inglés). Los núcleos galácticos activos son objetos astronómicos que poseen un agujero negro súper masivo en el centro de su galaxia anfitriona, rodeado por un disco de acreción, un toroide de polvo, nubes de gas y un chorro de partículas relativistas siendo expulsadas a partir de una región muy cercana al agujero negro (Urry y Padovani, 1995).

De todos los tipos de AGNs, los blazares se caracterizan porque el chorro de materia relativista está apuntando directamente hacia la Tierra, esto provoca que la emisión detectada sea de origen no térmico y altamente variable en todas las longitudes de onda (desde el radio hasta los rayos gamma). Si bien su espectro es muy amplio, la emisión prominente y de mayor interés de los blazares ocurre en la banda de los rayos gamma, y de hecho constituyen las fuentes más numerosas de radiación gamma extragaláctica (Ajello et al., 2015).

La distribución espectral de energía de los blazares presenta dos picos, uno en las bajas frecuencias (radio hasta rayos-X) y la otra en la banda de los rayos gamma. El pico en las bajas frecuencias se explica como radiación de sincrotrón de electrones relativistas moviéndose dentro del chorro. Para la emisión en rayos gamma se tienen dos posibles escenarios: (1) el escenario leptónico, cuyo mecanismo responsable es el efecto Compton inverso de los mismos electrones que producen la radiación de sincrotrón y (2) el escenario hadrónico, en el cual se

considera que los protones o interacciones de fotón-mesón son los principales agentes para la emisión (Aharonian, 2000).

Debido a las altas energías involucradas en los blazares, se les considera con frecuencia candidatos a emitir neutrinos. Esto ha tomado mayor importancia en los últimos años con los descubrimientos del IceCube, el cual ha detectado eventos de neutrinos muy energéticos (entre 60 TeV y 2.8 PeV) que todavía no logran resolverse, y que además uno de estos eventos coincide espacialmente con la ubicación de un blazar (IceCube-Collaboration et al., 2018).

Para la producción de neutrinos con energías de PeV se necesitarían protones de altas energías colisionando contra materia (pp) o contra radiación ($p\gamma$), este tipo de interacciones son capaces de producir piones cargados que decaen rápidamente en electrones y neutrinos mediante $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \rightarrow e^\pm + \nu_e + 2\nu_\mu$. La energía de estos neutrinos depende de la energía de los protones iniciales, con una relación aproximada de $E_\nu \approx E_p/20$, lo que implicaría que se necesitan protones con energías entre $10^{16} - 10^{17}$ eV (Righi et al., 2018).

El objetivo de este trabajo de graduación fue estudiar las propiedades espectrales de las ráfagas de rayos gamma de una muestra de blazares cuyo criterio de selección fue el siguiente: se buscaron blazares en el tercer catálogo de Fermi que coinciden espacialmente en un radio de $\pm 2^\circ$ con los eventos de neutrinos detectados por el IceCube (Aartsen et al., 2016), y también se estudió el blazar mencionado en IceCube-Collaboration et al. (2018), además se estudiaron las ráfagas de otros dos blazares para validar y comparar los resultados. Los objetos estudiados son: OP 313, MG1 J021114+1051, PG 1553+113, TXS 0506+056, 3C 279 y Markarian 421.

El estudio consistió en un análisis de la variabilidad de la fuente aplicando el algoritmo de bloques Bayesianos (Scargle et al., 2013) a los datos del Fermi-LAT en una curva de luz de ~ 10 años, del 01 de septiembre de 2008 al 05 de febrero de 2018 en un rango de energías de 0.1 GeV – 300 GeV, y se estudiaron solamente aquellos intervalos cuyo flujo superara el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar (Vercellone et al., 2004), discriminando de esta manera las fases activas para luego realizar los ajustes espectrales según los modelos de parábola logarítmica y ley de potencia mediante el análisis de máxima verosimilitud. El Software utilizado fue HEASoft (versión 6.24), las Fermi Science Tools (v11r5p3) y Enrico (versión 0.1).

En el capítulo 1 se presenta el fundamento teórico necesario para la comprensión de la física de los núcleos galácticos activos y sus principales características. El capítulo 2 explica de manera breve el funcionamiento de los instrumentos a bordo de la misión Fermi junto con la metodología y los procedimientos seguidos en esta tesis. En el capítulo 3 se muestran los resultados y el análisis de los mismos, se presentan las curvas de luz y la distribución espectral de energía de los objetos estudiados, así como los ajustes espectrales y un análisis estadístico para definir cuál de los dos modelos utilizados ajusta mejor los datos.

Capítulo 1

Núcleos galácticos activos

“Look up at the stars and not down at your feet. Try to make sense of what you see, and wonder about what makes the universe exist. Be curious.”

–Stephen Hawking

1.1. Galaxias activas

Las características principales de las galaxias activas son la producción de líneas de emisión inusuales y luminosidades muy altas con respecto a las galaxias “normales”. La luz proveniente de estas últimas se debe a radiación térmica, la cual se puede describir de manera aproximada por una distribución espectral de Planck que depende de la temperatura de las estrellas que forman la galaxia y su distribución de energía predomina en la banda óptica e infrarroja (Schneider, 2007). Por otro lado, las galaxias activas presentan una distribución mucho más amplia, desde las ondas de radio hasta los rayos-X, algunas presentan incluso emisiones en rayos gamma y se cree que toda esta energía proviene de un volumen muy compacto en el centro de las galaxias anfitrionas, denominado núcleo galáctico activo (AGN).

La luminosidad de los AGNs varía entre los 10^{39} a 10^{47} $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$, o de manera equivalente, entre $10^6 L_\odot$ y $10^{14} L_\odot$, siendo L_\odot la luminosidad solar con un valor aproximado de $L_\odot \simeq 4 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$; a modo de comparación, la luminosidad calculada para la Vía Láctea no supera el valor de $10^4 L_\odot$ (Schneider, 2007). Los valores tan elevados de luminosidad en los AGNs indican que los procesos físicos involucrados son diferentes de los que se llevan a cabo en las estrellas y además los convierten en algunos de los objetos más energéticos del universo.

1.1.1. Espectro de los Núcleos Galácticos Activos

Los AGNs pueden ser observados en un rango muy amplio de longitudes de onda λ (y por tanto, frecuencias ν). Por lo general se acostumbra a hablar de la distribución espectral de energía (SED por sus siglas en inglés), la cual se describe mediante la luminosidad L_ν por unidad de frecuencia, o su equivalente flujo por unidad de frecuencia, F_ν (Netzer, 2013). La distribución espectral de varios tipos de AGNs es similar a la que se muestra en la figura 1.1. A su vez, es posible aproximar dicha distribución, para una región limitada de frecuencias de

la siguiente manera:

$$F_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad (1.1)$$

donde α se conoce como el índice espectral. El flujo normalizado está dado por el producto νF_ν y mide el número de fotones por segundo que son emitidos en un área determinada, sus unidades son [fotones \cdot cm $^{-2}$ s $^{-1}$].

A diferencia de las galaxias comunes cuyos espectros muestran sólo componentes en el óptico e infrarrojo, el espectro típico de los AGNs presenta una componente en radio, un pico en el infrarrojo y otro en el ultravioleta, además de una componente en los rayos X, como en la figura 1.1. Algunos AGNs presentan un pico más en la región de los rayos gamma (Urry, 1998), esto indica que en los AGNs se llevan a cabo procesos no térmicos que producen radiación electromagnética a esas frecuencias tan altas ($> 10^{19}$ Hz).

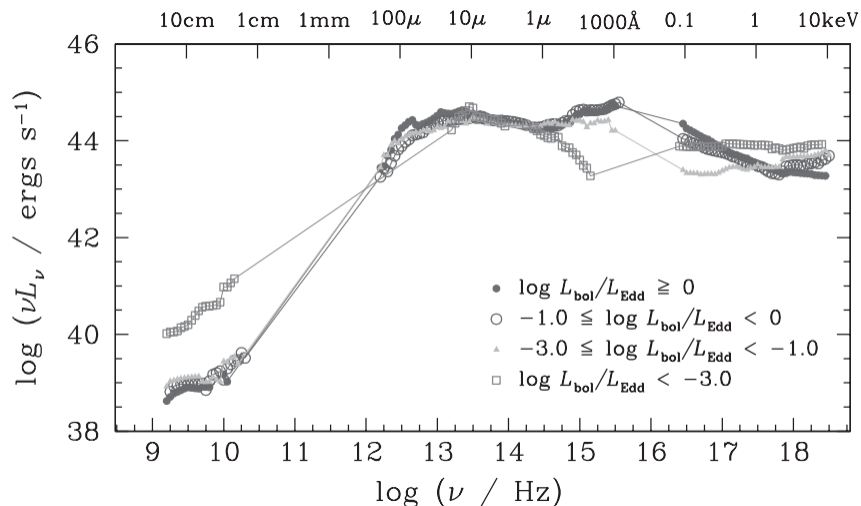


Figura 1.1: Distribución espectral de energía (SED) para varios tipos de AGNs. Las SEDs están normalizadas y no reflejan el gran rango de luminosidad intrínseca entre diferentes objetos y corrimientos al rojo [Tomada de Netzer (2013)]

Además de un SED que predomina en varias frecuencias, los AGNs presentan también líneas de emisión muy anchas, las cuales no aparecen en los espectros de las galaxias normales. En un principio se creía que las líneas de emisión eran una característica sólo de las nebulosas, en las cuales estrellas jóvenes emitiendo radiación en ultravioleta ionizan el gas de los alrededores y producen de esta forma líneas espectrales en la banda óptica, midiéndose por ejemplo las de las series de Balmer ($H\alpha$, $H\beta$, etc).

En las galaxias activas es posible observar líneas de emisión debidas a transiciones permitidas o prohibidas. Las transiciones prohibidas son aquellas que tienen muy poca probabilidad de ocurrir, y que necesitan una densidad de gas demasiado baja y por lo tanto son imposibles de reproducir en el laboratorio (Schneider, 2007). Ejemplos de estas líneas son las de [O II] y [O III].

1.2. Taxonomía de los AGNs

Cuando los AGNs comenzaron a estudiarse, se distinguieron por sus características observacionales, por ejemplo su galaxia anfitriona, la anchura de sus líneas de emisión o si emitían fuertemente en radio (radio ruidosas) o si lo hacen débilmente (radio débiles). Esto dio origen a diferentes tipos de AGNs entre los cuales se pueden mencionar las galaxias Seyfert, radio galaxias, cuásares y blazares.

1.2.1. Galaxias Seyfert

Son un tipo de galaxias espirales que tienen un núcleo casi puntual muy brillante que opaca la luminosidad del resto de la galaxia y cuyo espectro presenta líneas de emisión muy anchas e intensas. Este tipo galaxias fueron en realidad las primeras en conocerse como AGNs, y deben su nombre a Carl Seyfert, quien las investigó a detalle en 1943 (Seyfert, 1943). Las galaxias Seyfert se subdividen en Seyfert tipo 1 y tipo 2 dependiendo de la anchura de sus líneas espectrales.

Las galaxias Seyfert tipo 1 muestran líneas de emisión muy anchas que incluyen transiciones permitidas, como las de H I, He I y He II, y también líneas prohibidas mucho más estrechas, como las de [O III]. Asumiendo que el espesor de las líneas se debe al ensanchamiento Doppler, $\Delta\lambda/\lambda = \Delta v/c$, las líneas permitidas parecen proceder de fuentes con velocidades entre 1000 km/s y 5000 km/s, mientras que a las líneas prohibidas les corresponden velocidades inferiores a 500 km/s (Carroll y Ostlie, 2017). A diferencia de las Seyfert 1, las galaxias Seyfert 2 sólo presentan líneas de emisión estrechas pero que incluyen de nuevo transiciones prohibidas y permitidas. Los dos tipos de galaxias Seyfert forman parte de los AGNs radio débiles, y además son el tipo de AGNs más común que se puede observar en el universo local (Beckmann y Shrader, 2013).

1.2.2. Radio galaxias

Tal como lo indica su nombre, se trata de aquellas galaxias que son fuertes emisoras de ondas de radio. En contraste con las Seyfert, las radio galaxias son en su mayoría elípticas, sin embargo de nuevo es posible dividir las de acuerdo a sus líneas de emisión: las radio galaxias de líneas anchas (BLRG por sus siglas en inglés), y las radio galaxias de líneas estrechas (NLRG por sus siglas en inglés).

Además de la distinción por sus líneas espectrales, es posible distinguir las de acuerdo a su morfología en radio ya que una característica de las radio galaxias es que presentan **lóbulos de radio** que están conectados al núcleo galáctico mediante la emisión de chorros de materia altamente colimados (Carroll y Ostlie, 2017), como se observa en la figura 1.2. En las radio galaxias es común observar un solo chorro, y cuando se observan dos, uno es más brillante que el otro.

Fanaroff y Riley (1974) sugirieron una clasificación de los AGNs radio ruidosos de acuerdo a la luminosidad, y las dividieron en dos grupos: Las Fanaroff-Riley I (FR I) que tienen

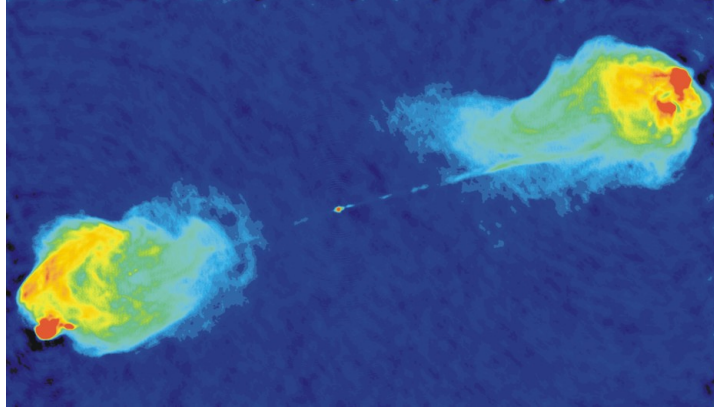


Figura 1.2: Imagen en radio del VLA de Cygnus A, mostrando dos lóbulos de radio y un chorro extendiéndose de la galaxia hacia el lóbulo derecho. [Créditos: NRAO/AUI]

usualmente chorros de radio simétricos, cuya intensidad decae a partir del núcleo, y las Fanaroff-Riley II (FR II) que presentan lóbulos de radio y una intensidad mayor al alejarse del núcleo.

Las FR I tienden a ser menos luminosas que las FR II, la luminosidad de separación para estas galaxias es bastante nítida a una frecuencia de 178 MHz, teniendo un valor de $L \approx 10^{32} \text{ ergs}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$. Existen otras distinciones entre este tipo de AGNs, por ejemplo, las FR I suelen habitar en galaxias elípticas con cúmulos de gas emitiendo en rayos X, mientras que las FR II se presentan en ambientes más aislados (Urry y Padovani, 1995).

1.2.3. Cuásares

En un principio estos objetos fueron llamados *fuentes de radio cuasi estelares*. Los cuásares tienen una apariencia puntual (como de una estrella), y además emiten en todas las longitudes de onda, desde las de radio a los rayos-X (Schneider, 2007), siendo de esta manera una de las clases más luminosas de los AGNs.

Los cuásares presentan un espectro óptico que predomina en el azul y además muestran líneas de emisión bastante anchas con corrimientos al rojo muy grandes (por ejemplo $z > 3$). El corrimiento al rojo z de estos objetos se asocia con la expansión del universo (corrimiento al rojo cosmológico), y por lo tanto con la distancia a la que se encuentran las fuentes.

A pesar de que los primeros cuásares fueron descubiertos en observaciones de radio, sólo una pequeña fracción de los cuásares identificados en la banda óptica son fuertes emisores en radio. Debido a la apariencia azul en los cuásares se comenzó a buscar objetos similares en el ultravioleta, descubriendo de esta manera los objetos cuasi estelares (QSOs), que son débiles emisores de radio pero que presentan características muy similares a los cuásares, razón por la que se les llamó *cuásares radio débiles* (Schneider, 2007).

Los cuásares OVV (Violentamente variables en el óptico) son una subclase de los QSOs, y se caracterizan por su fuerte y alta variabilidad en la banda óptica. Al igual que los QSOs

presentan líneas de emisión bastante anchas, pero lo que los distingue es que el flujo de los OVV's puede variar en una fracción significativa en escalas temporales de tan sólo unos días (Schneider, 2007). A su vez, lo OVV's pertenecen a la clase de Radio Cuásares de Espectro Plano (FSRQ).

1.2.4. Objetos BL Lac

Los objetos BL Lac deben su nombre a su prototipo: la galaxia BL Lacertae. Se trata de galaxias activas con alta variabilidad en su flujo, con un comportamiento similar a los OVV's pero sin presentar líneas fuertes de emisión ni absorción. Los objetos BL Lac presentan además una rápida polarización óptica. En algunos objetos BL Lac se ha encontrado que su luminosidad puede variar en un 30% en un período de 24 h y en un factor de 100 para períodos mucho mayores (Carroll y Ostlie, 2017). Presentan corrimientos al rojo bastante grandes, semejantes a los cuásares, y el 90% de los BL Lac parecen residir en galaxias elípticas.

1.3. Modelo de Unificación

Para explicar las características observadas se ha propuesto una estructura física de los AGNs, la cual se muestra en la figura 1.3. En el centro se encuentra un agujero negro súper masivo cuya masa está comprendida entre 10^6 y $10^9 M_{\odot}$, su energía potencial es la fuente de la luminosidad de los AGNs. Lo rodea un disco de acreción que empuja materia hacia el agujero negro generando radiación en Ultravioleta y rayos-X suaves, además se encuentra un toroide (con un radio interno de $\sim 10^{17}$ cm) de nubes de gas y polvo que obscurece radiación óptica y ultravioleta bajo algunos ángulos de visión. Se tienen además nubes de gas que generan líneas anchas (puntos negros en la figura 1.3), o líneas estrechas (puntos grises). Finalmente, se emiten chorros de partículas relativistas en una región muy cercana al agujero negro, perpendiculares al plano de la galaxia y emitiendo en ondas de radio hasta las de rayos gamma (Urry y Padovani, 1995).

El modelo de unificación intenta explicar la producción de las líneas espectrales, la producción de los chorros altamente colimados y la conversión de energía gravitacional en radiación electromagnética. Por ejemplo, el lugar en el que se producen las líneas anchas es conocido como *región de líneas anchas* (BLR por sus siglas en inglés), en el cual se encuentran nubes de gas que sufren procesos de fotoionización debida a la radiación proveniente del disco de acreción alrededor del agujero negro súper masivo. Se estiman temperaturas aproximadas de $T \approx 2 \times 10^4$ K, un tamaño típico de las nubes de unos $\sim 10^{11}$ cm y una densidad de partículas de $n_e \approx 10^{11} \text{cm}^{-3}$ (Wills et al., 1985).

Por otro lado, la región de líneas estrechas (NLR por sus siglas en inglés) se encuentra a 100 – 500 pc de la fuente central, Woltjer (1959) dedujo densidades aproximadas para las nubes en esta región, obteniendo valores de $n_e \approx 10^4 \text{cm}^{-3}$, y temperaturas $T \approx 2 \times 10^4$ K. La densidad extremadamente baja es la que da lugar a la formación de las líneas prohibidas. Además, con el toroide rodeando al disco y al agujero negro se puede explicar la obscuración que presentan algunos AGNs como las galaxias Seyfert.

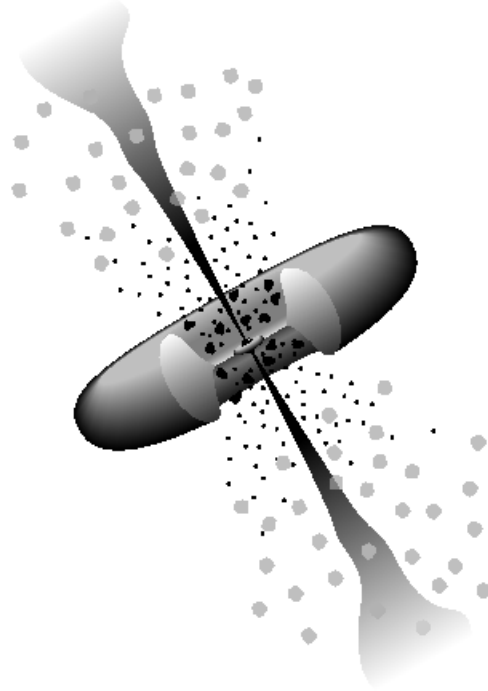


Figura 1.3: Diagrama esquemático del actual paradigma de los AGNs (no está a escala). [Tomado de Urry y Padovani (1995)]

La estructura mostrada en la figura 1.3 es la que conduce a la observación de diferentes propiedades de los AGNs cuando se les observa a diferentes ángulos y por esa razón en un principio se le dio distintos nombres al mismo fenómeno. El nombre *galaxias activas* se debe a la presencia del agujero negro súper masivo acretando material en el centro (Netzer, 2013).

Clasificación de los AGNs

Los AGNs mencionados en las secciones anteriores pueden ser resumidos según la clasificación de Urry y Padovani (1995), en la cual existen dos tipos de AGNs, y un tipo *inusual*:

- Aquellos AGNs que presentan líneas de emisión bastante anchas y fuertes son llamados AGNs tipo 1, que se dividen en dos grupos: radio ruidosos y radio débiles. En el grupo de los radio débiles están las galaxias Seyfert tipo 1 (baja luminosidad) y los QSOs (alta luminosidad). Por otro lado, en los radio ruidosos se encuentran las BLRG a bajas luminosidades, y los cuásares radio ruidosos a luminosidades grandes, conocidos como SSRQ (Steep Spectrum Radio Quasar) y FSRQ.
- Los que presentan líneas de emisión estrechas y un continuo débil son conocidos como AGNs tipo 2 que a su vez se dividen según su emisión en radio. En el grupo de los radio débiles se incluyen las Seyfert tipo 2 a bajas luminosidades. Mientras que en el grupo de los radio ruidosos están las NLRG, que incluyen las FR I y las FR II.
- Los AGNs que presentan un comportamiento extraño y muy variable con una energía asociada muy extrema son los AGNs tipo 0 (Urry y Padovani, 1995). A este grupo

pertenece los objetos BL Lac y los FSRQ, llamados en conjunto *blazares*. Todos los blazares conocidos son fuertes emisores de radio.

En la tabla 1.1 se resume la clasificación descrita anteriormente.

Tabla 1.1: Taxonomía de los AGNs^a.

	Tipo 2	Tipo 1	Tipo 0
Radio débiles:	Seyfert 2	Seyfert 1 QSO	
Radio fuertes:	NLRG	BLRG SSRQ FSRQ	Blazares { BL Lac FSRQ

^a Tabla adaptada de Urry y Padovani (1995).

Si bien los FSRQ presentan líneas de emisión anchas y se clasificaron en principio como AGN tipo 1, presentan también las características de variabilidad y otras muy parecidas a las de los BL Lac, por lo que es preferible referirse a ellos como AGNs inusuales (Urry y Padovani, 1995).

1.3.1. El agujero negro

La idea de que hay un agujero negro súper masivo en el centro de los AGNs tomó lugar desde que las observaciones establecieron que se trataba de objetos cosmológicos, y porque parecía no haber otro mecanismo que pudiese explicar los valores tan elevados de luminosidad que alcanzan estos objetos. Sin embargo, las nuevas observaciones revelan que hay evidencias suficientes para argumentar tal cosa, y de hecho, es bien aceptado que la mayoría de las galaxias, incluyendo la Vía Láctea, contienen un agujero negro en el centro (Beckmann y Shrader, 2013).

Algunas de estas evidencias son: (1) los chorros de algunas radio galaxias, cuya extensión implicarían un tiempo de vida τ de la fuente mayor a 10^7 yr, (2) la luminosidad de los QSO más brillantes, de los cuales se puede estimar una energía mínima de $E \sim 10^{61}$ erg, (3) la variabilidad de la luminosidad que indicaría una extensión de la fuente de $R \sim 10^{15}$ cm. Con estos hechos y suponiendo que la producción de energía se lleva a cabo con procesos nucleares se puede estimar una masa para la fuente de $m \sim 10^9 M_{\odot}$, de modo que el radio de Schwarzschild tendría valores aproximados de

$$r_S = \frac{2Gm}{c^2} \sim 10^{14} \text{cm.} \quad (1.2)$$

El hecho de que el radio de Schwarzschild sea del mismo orden de magnitud de las estimaciones para la fuente central indican que la producción de energía puede ser mejor explicada mediante mecanismos gravitacionales en lugar de termonucleares (Schneider, 2007).

1.3.2. El disco de acreción

Actualmente en el modelo de unificación de los AGNs se cree que el agujero negro está rodeado por un disco de acreción absorbiendo material y emitiendo radiación en rayos-X y en ultravioleta. El gas cayendo hacia el agujero negro pierde su energía potencial y se convierte en energía cinética, el momento angular del gas previene que éste caiga directamente al agujero negro, de manera que la fricción con otras partículas hace que la temperatura aumente dando lugar a la conversión y liberación de energía (Schneider, 2007). Los mecanismos de acreción de materia pueden alcanzar eficiencias ϵ muy altas, por ejemplo valores cercanos a $\epsilon \sim 29\%$ para la producción de energía.

El ensanchamiento de las líneas de emisión se explica mediante la rotación de las nubes que son ionizadas por la radiación UV producida en el disco de acreción y así se explican también los valores de z tan elevados en algunos AGNs, sin embargo, para los cuásares se debe tener en cuenta que el corrimiento al rojo se debe también a los efectos gravitacionales y a la expansión cosmológica.

1.3.3. Chorros y movimiento superlumínico

Parte del material procesado en el disco de acreción escapa de éste en forma de chorros altamente colimados, y también como *vientos* no colimados. La producción de radiación en rayos-X se debe al movimiento de electrones dentro de un campo magnético en el chorro. Aún se desconoce la composición de los chorros, principalmente a causa de la emisión continua de origen no térmico que conduce a la ausencia de líneas espectrales con las cuales sería posible observar la naturaleza del plasma (Krawczynski y Treister, 2013).

La existencia de los chorros permite explicar las velocidades aparentemente mayores a la velocidad de la luz en los AGNs. En la figura 1.4 se muestra una fuente radiación que se mueve de A a B en un tiempo dt de modo que $AB = v dt$. Si la fuente emite una señal en A , entonces la señal alcanzaría a un observador O a una distancia D en un intervalo temporal de

$$t_{AO} = \frac{D}{c}$$

Si se emite otra señal después del tiempo dt cuando la fuente está en B , esta señal llegará al observador en un tiempo

$$t_{BO} = dt + \frac{D - v dt \cos \theta}{c}$$

En estas condiciones, el observador recibirá las señales en tiempos que difieren en una cantidad de

$$t_{BO} - t_{AO} = dt \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right).$$

Así, la velocidad transversal de la fuente, perpendicular a la línea de visión será

$$v_{\perp} = \frac{v \sin \theta dt}{t_{BO} - t_{AO}} = \frac{v \sin \theta}{1 - (v/c) \cos \theta}. \quad (1.3)$$

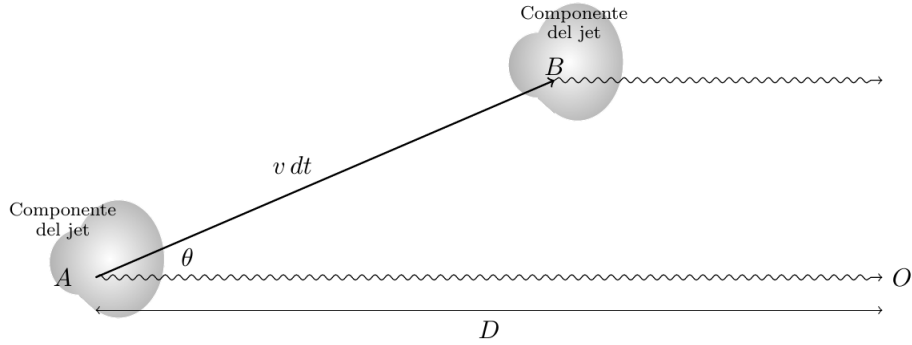


Figura 1.4: Esquema ilustrando cómo se da lugar el movimiento superlumínico

Es fácil ver que esta velocidad v_{\perp} será mayor que c cuando v tenga un valor cercano a c y θ sea pequeño. Hay que notar que v_{\perp} es una velocidad proyectada, es decir, se trata de una velocidad aparente.

1.4. Blazares

Como se muestra en la tabla 1.1, los objetos BL Lac y los FSRQ constituyen un tipo especial de AGN conocido como *blazar*. En el actual modelo de unificación, los blazares son AGNs cuyo chorro de partículas relativistas está apuntando directamente hacia la Tierra, debido a esto se caracterizan por su alta variabilidad, polarización, movimiento superlumínico y son considerados los objetos extragalácticos más luminosos del universo.

Los blazares son emisores prominentes desde las frecuencias de radio hasta las altas energías (VHE) por encima de 1 TeV (Beckmann y Shrader, 2013) y por lo general no muestran características importantes en la banda óptica de su espectro. Todos los blazares presentan movimientos superlumínicos en mapas de radio de alta resolución que pueden explicarse mediante el movimiento del plasma relativista en la dirección de la línea de visión (Urry, 1998), y además todas las propiedades de variabilidad se le atribuyen a que los chorros apuntan hacia la Tierra.

Una manera de identificar blazares es buscar AGNs que mostraran variaciones dramáticas en todo su espectro electromagnético, también se pueden buscar mediante la identificación de fuentes que emitan fuertemente en ondas de radio, o con un flujo en rayos-X muy alto comparado con su emisión óptica. Es claro que estos criterios de selección dependen del tipo de observación y de las características de la fuente, por eso, actualmente los blazares se distinguen en función de su distribución espectral de energía, la cual muestra siempre dos picos. El pico que aparece en las bajas frecuencias se debe a la radiación de sincrotrón de partículas cargadas (como electrones) moviéndose a velocidades relativistas en el chorro, mientras que el pico en altas frecuencias puede explicarse por la dispersión Compton inversa de partículas relativistas (Urry, 1998). Dependiendo de la región en la que aparezcan los picos, los blazares se clasifican en HSP (High synchrotron peaked), ISP (Intermediate synchrotron peaked), LSP (Low synchrotron peaked).

La figura 1.5 muestra la distribución espectral de energía de diferentes tipos de blazares, en la que pueden observarse los picos mencionados y la gran amplitud de frecuencias de su espectro.

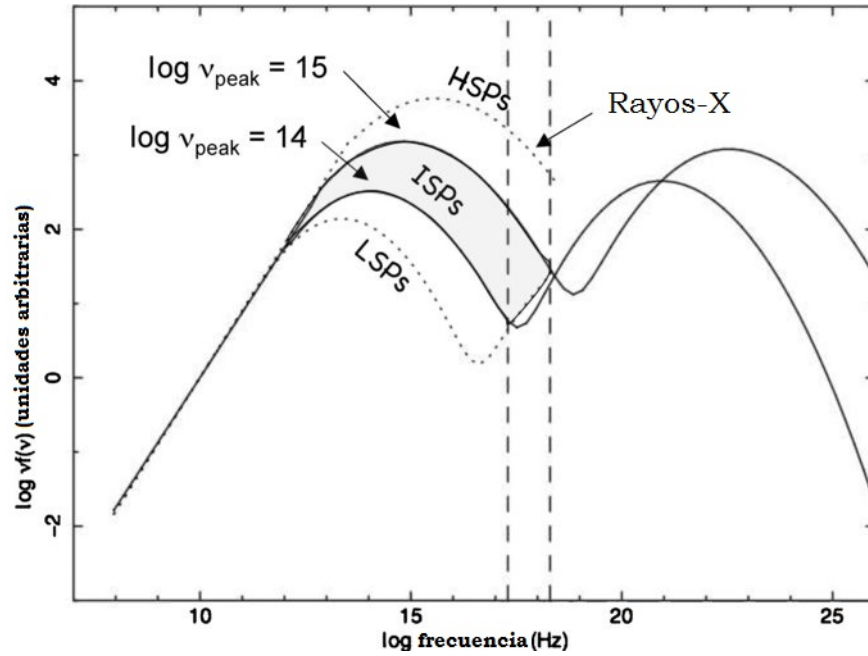


Figura 1.5: Definición de distintos tipos de blazares, basándose en el pico de la radiación de sincrotrón.

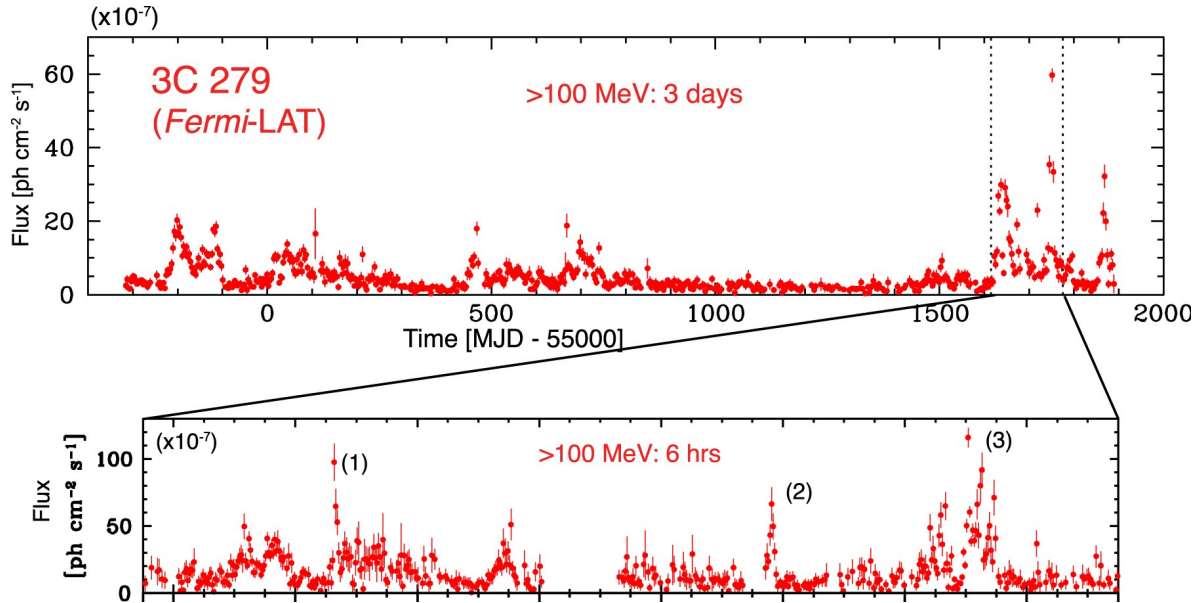


Figura 1.6: Curva de luz del blazar 3C279 en la banda de rayos gamma observadas por Fermi-LAT. [(Hayashida et al., 2015)]

La variabilidad de los blazares se evidencia en su curva de luz, la cual representa el flujo electromagnético emitido en función del tiempo de observación. Por ejemplo, en la figura 1.6 se muestra el flujo en rayos gamma por encima de los 100 MeV de uno de los blazares más estudiados, el 3C 279 para los primeros 6 años (en días julianos modificados) de operación del Fermi-LAT¹, con *episodios* de separación de 3 días. Según se observa en la figura 1.6, existen diferentes aumentos de actividad en la curva de luz del 3C 279, por ejemplo entre MJD 55400 – 55500. Sin embargo, la fase activa más intensa para las fechas mostradas corresponde al periodo de 2013–2014, la cual se muestra en el panel inferior de la figura 1.6.

Esos periodos de aumento dramático en el flujo electromagnético es el fenómeno conocido como *ráfagas de rayos gamma* (o fases activas), se caracterizan por superar el flujo promedio por factores muy grandes en periodos de tiempo muy pequeños (unos pocos meses para el 3C 279).

El propósito de esta tesis fue caracterizar el espectro en rayos gamma de las fases activas de una muestra de blazares. Los procesos responsables de la emisión en ondas de radio y los rayos gamma se explican a continuación.

1.4.1. Emisión a bajas energías

Los picos en las bajas frecuencias (Figura 1.5) que presentan los blazares pueden explicarse con el mecanismo de emisión de sincrotrón. Electrones moviéndose en un campo magnético siguen trayectorias helicoidales, cambiando su aceleración continuamente por la fuerza de Lorentz y de esta manera emitiendo radiación. Para la radiación de sincrotrón, la frecuencia de emisión característica es descrita por

$$\nu = \frac{3\gamma^2 e B}{4\pi m_e c}, \quad (1.4)$$

donde B denota la intensidad del campo magnético, m_e la masa del electrón, c la velocidad de la luz y γ el factor de Lorentz convencional:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1.5)$$

con $\beta = v/c$. Para que se produzca radiación a longitudes de unos cuantos cm ($\nu \sim 10^{10}$ Hz), en un campo de $B \sim 10^{-4}$ G, se necesita un factor de Lorentz $\gamma \sim 10^5$. De manera que los electrones deben ser extremadamente relativistas, se piensa que esta radiación se genera en los chorros, mediante la “aceleración de choques difusivos” causados por procesos hidrodinámicos dentro del plasma (Schneider, 2007). Si un electrón se mueve en un campo magnético con densidad de energía $u_B = B^2/8$, la potencia emitida por el electrón está dada por

$$P = 2\sigma_T c \gamma^2 \beta^2 u_B \sin^2 \alpha \equiv \frac{2}{3} \frac{e^4 \gamma^2 B^2}{m_e^2 c^3} \sin^2 \alpha, \quad (1.6)$$

¹Del cual se hablará en el siguiente capítulo.

donde α el ángulo entre la dirección de movimiento y el campo magnético y σ_T es la sección transversal de Thomson, definida por

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2. \quad (1.7)$$

Promediando para la Ec. (1.6) se obtiene:

$$\bar{P} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 u_B. \quad (1.8)$$

La distribución espectral de energía para la radiación de sincrotrón se puede obtener tomando en cuenta la frecuencia de giro, $\omega_B = eB/\gamma m_e c$ y el intervalo medio entre pulsos, $2\pi/\omega_B$ (Netzer, 2013). Asumiendo que la energía de los electrones se distribuyen isotrópicamente, se puede demostrar (Rybicki y Lightman, 2008):

$$\left(\frac{dW}{d\nu dt} \right) = \frac{4\pi k e^3 B^{(p+1)/2}}{m_e c^2} \left(\frac{3e}{4\pi m_e c} \right)^{(p-1)/2} a(p) \nu^{-(p-1)/2}, \quad (1.9)$$

que puede expresarse de la siguiente manera

$$\left(\frac{dW}{d\nu dt} \right) \propto \nu^{-(p-1)/2}, \quad (1.10)$$

es decir, puede ser descrita mediante una ley de potencias con un índice espectral $\alpha = (1-p)/2$.

1.4.2. Emisión en altas energías

Por otro lado, el pico producido en las altas frecuencias puede ser explicado mediante la dispersión de Compton inversa (CI). Cuando un electrón tiene gran energía cinética comparada con la de un fotón, esta energía puede transferirse hacia el fotón, obteniendo así un fotón altamente energético. Para el caso del CI, la potencia media de emisión está dada por

$$\bar{P} = \frac{4}{3} \sigma_T c \gamma^2 \beta^2 u_{\text{rad}} \quad (1.11)$$

donde u_{rad} es la densidad de energía de la radiación de campo. La expresión de la potencia emitida en el proceso CI es muy parecida a la radiación de sincrotrón, la diferencia radica en las energías que las producen, de este modo, la dispersión Compton inversa puede aproximarse con la misma ley de potencia calculada para la radiación de sincrotrón (ecuación 1.10), la forma espectral es muy similar y sólo cambia la banda de energías en las que ocurren.

Otra alternativa para explicar la emisión en altas energías es el mecanismo hadrónico para producción de rayos gamma. La distribución espectral de energías en las altas frecuencias puede ser explicada mediante una cascada electromagnética producida por el decaimiento de partículas hadrónicas, las cuales se originan mediante interacciones de protón-fotón. Estas interacciones producen típicamente fotones y piones, mediante:

$$p + \gamma \rightarrow \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \rightarrow e^\pm + \nu_e + 2\nu_\mu \quad (1.12)$$

Como se ve en la Ec. 1.12, en el escenario hadrónico de la emisión en altas energías, los procesos de interacción también producen neutrinos (Aharonian, 2000). La detección de estos neutrinos en los AGNs brindarían evidencias al escenario hadrónico.

Recientemente el observatorio IceCube ha detectado diferentes eventos de neutrinos de altas energías en regiones que coinciden con las coordenadas de algunos blazares (Aartsen et al., 2016; IceCube-Collaboration et al., 2018), esto ha provocado el lanzamiento de muchas campañas para estudiar con mayor detalle las propiedades físicas de estos objetos, por ejemplo Glüsenkamp (2016) estudió los datos tomados durante 3 años por el Fermi-LAT con el objetivo de buscar alguna relación entre los neutrinos detectados por el IceCube y los AGNs del segundo catálogo de Fermi, sin obtener resultados significativos. Se pueden mencionar también los trabajos de Paiano et al. (2018), Padovani et al. (2018) y Righi et al. (2018).

Capítulo 2

Metodología

*“The cosmos is within us. We are made of star-stuff.
We are a way for the universe to know itself.”*
– Carl Sagan

2.1. Telescopio espacial Fermi de rayos gamma

En esta sección se describe de manera breve el funcionamiento del telescopio espacial Fermi de rayos gamma, para más detalles, refiérase a Atwood et al. (2009). Fermi es un observatorio satelital que estudia el universo a longitudes de onda de los rayos gamma y fue lanzado por la NASA el 11 de junio de 2008, se compone de dos instrumentos para medir la radiación gamma proveniente de fuentes galácticas y extragalácticas, estos instrumentos son el Large Area Telescope (LAT) y el Gamma-ray Burst Monitor (GBM).

El satélite funciona como un monitor espacial y es capaz de producir un panorama completo de todo el cielo cada tres horas, esto permite que se pueda estudiar de manera efectiva propiedades como la variabilidad de las fuentes detectadas. Desde su lanzamiento, el telescopio ha sido capaz de estudiar diversas fuentes de rayos gamma, tales como remanentes de supernova, púlsares, destellos de rayos gamma (GRBs por sus siglas en inglés) y principalmente núcleos galácticos activos (alrededor del 60 % de las fuentes detectadas son AGNs).



Figura 2.1: Ilustración artística del Fermi-LAT (Créditos: NASA)

El Large Area Telescope es el instrumento principal del telescopio y su misión es monitorizar

el cielo con una vista angular de 2.4 sr, en un rango de energías de 20 MeV a 300 GeV, un área efectiva de 9,500 cm² y en una resolución temporal de 10μs. Estas especificaciones convierten al LAT en un instrumento mejor que los que se lanzaron anteriormente para observar el cielo a esas energías, tales como el EGRET (Kanbach et al., 1989). En este trabajo no se utilizaron los datos del GBM, dedicado al estudio de GRBs (Meegan et al., 2009) y por lo tanto se hará énfasis en el funcionamiento del LAT solamente.

El LAT está diseñado para medir la dirección, energías y tiempos de llegada de rayos gamma incidentes sobre un campo de visión de ~ 2.4sr al mismo tiempo que ignora la radiación de fondo proveniente de los rayos cósmicos (gracias a una cámara sensible a partículas cargadas).

La radiación gamma no puede ser reflejada ni refractada, la forma en la que interactúa con la materia es mediante la conversión de un rayo gamma en un par e^+e^- , por eso se dice que el LAT es un telescopio de conversión de pares, esto significa que no detecta directamente los fotones de rayos gamma que inciden en el satélite sino los pares electrón-positrón que se forman cuando el fotón se desintegra. La energía del par electrón-positrón se mide con ayuda de un detector construido a partir de 16 convertidores de trayectorias (trazadores) de partículas de alta precisión y un calorímetro. Cada trazador contiene 18 detectores semiconductores separados por láminas de tungsteno. El tungsteno se necesita para que se dé el fenómeno de producción de pares e^+e^- mientras que los detectores semiconductores permiten que se reconstruya la trayectoria que siguieron los pares e^+e^- (Figura 2.2).

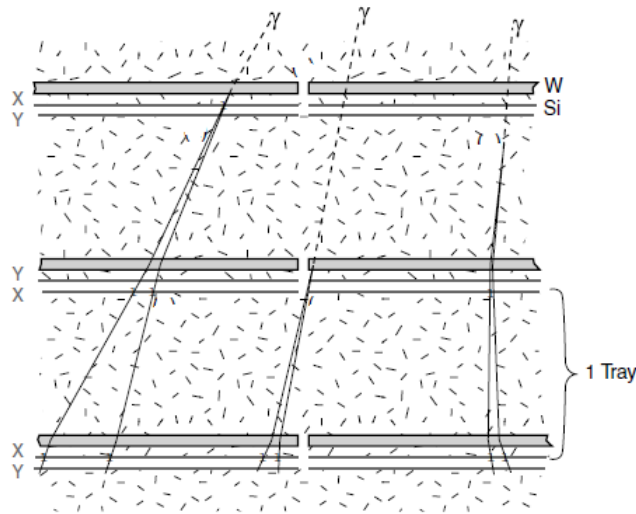


Figura 2.2: Ilustración de los principios de funcionamiento en el diseño del trazador de trayectorias del LAT. Los primeros dos puntos predominan en la medición de la dirección del fotón incidente, especialmente a bajas energías (Atwood et al., 2009).

Por otro lado, el calorímetro está construido con 96 contadores de centelleo de yoduro de cesio (CsI), cada uno con dimensiones de 2.7cm × 2.0cm × 32.6cm, ópticamente aislados y dispuestos en 8 capas de 12 cristales cada una. Además, cada contador está vinculado a un fotodiodo para medir la luz de centelleo. De esta manera el calorímetro es capaz de detectar las

partículas y la energía de la lluvia electromagnética que se genera con la producción de pares permitiendo que se pueda determinar la energía de los fotones incidentes (Figura 2.3). En resumen, las funciones del calorímetro son: (1) Medir la energía de los rayos gamma incidentes a partir de los pares e^+e^- , y (2) proporcionar un discriminador de energía de fondo y estimar la pérdida de energía en la lluvia electromagnética.

Entre los objetivos científicos del LAT están: (1) determinar la naturaleza de las fuentes sin identificar y el origen de la emisión difusa revelada por el EGRET, (2) entender el mecanismo de la aceleración de partículas que tienen lugar en los AGNs, (3) comprender el comportamiento de altas energías de los GRBs, entre otras.

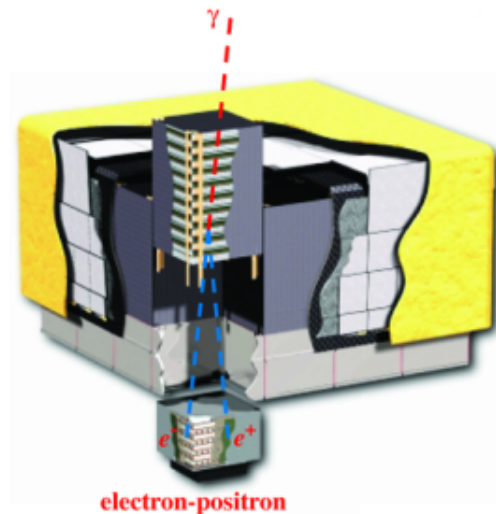


Figura 2.3: Diagrama esquemático del LAT y el calorímetro en el que se mide la lluvia electromagnética del par electrón-positrón (Atwood et al., 2009).

Toda la información recolectada por el Fermi-LAT es de acceso público y puede descargarse de la página del servidor de Fermi, FSSC (Fermi Science Support Center). Para el caso de los AGNs observados por el telescopio se pueden descargar dos tipos de datos: archivos de evento y archivos de nave espacial. Los archivos de evento contienen los tiempos de llegada de los fotones detectados por el telescopio, así como otro tipo de información relevante como la energía, coordenadas e intervalos de tiempo buenos (GTI por sus siglas en inglés). Mientras que el archivo de nave espacial contiene la posición del telescopio en tiempos específicos del intervalo de interés.

2.1.1. Ajuste por máxima verosimilitud

Los datos recolectados por el Fermi-LAT requieren de un proceso estadístico para poder extraer información física de las fuentes observadas. El método utilizado para el estudio de los AGNs en esta tesis es el análisis de máxima verosimilitud, que fue introducido por Fisher (1925) y ha sido muy utilizado desde entonces, y además resulta muy eficiente para modelar las fuentes de rayos gamma.

La función de verosimilitud \mathcal{L} es la probabilidad de obtener los datos dado un modelo de entrada. Para el caso del LAT, el modelo de entrada es la distribución de las fuentes de rayos gamma en el cielo, que incluye su intensidad y sus espectros. Se espera, naturalmente que el modelo que mejor se ajusta tendrá una mayor probabilidad de obtener los datos observacionales con respecto a otros modelos. Los conteos observados siguen una distribución de Poisson, cuyo valor de probabilidad está dado por

$$p(n_i, m_i) = \frac{e^{-m_i} m_i^{n_i}}{n_i!}, \quad (2.1)$$

donde m_i es el número de conteos esperados por el modelo de entrada en el episodio i , mientras que n_i son los conteos detectados en el episodio i .

El procedimiento consiste en calcular la función de verosimilitud \mathcal{L} de cada evento de fotones para determinar el origen real de los fotones incidentes y la conexión con la fuente de interés. La función \mathcal{L} para datos del LAT se define como el producto de las probabilidades en cada episodio de observación i ,

$$\mathcal{L} = \prod_{n=1}^N \frac{m_i^{n_i} e^{-m_i}}{n_i!} = e^{-N_{\text{exp}}} \prod_{n=1}^N \frac{m_i^{n_i}}{n_i!}, \quad (2.2)$$

donde N es el número total de conteos y N_{exp} es el número total de conteos esperados. Esta función de verosimilitud estima los parámetros que mejor se ajustan

Con el fin de evaluar el resultado, se utiliza una prueba estadística (TS, por *Test Statistic*), calculada mediante:

$$TS = -2 \ln \left(\frac{\mathcal{L}_{\text{máx},0}}{\mathcal{L}_{\text{máx}}} \right), \quad (2.3)$$

donde $\mathcal{L}_{\text{máx},0}$ es la máxima verosimilitud para un modelo sin una fuente adicional (hipótesis nula), y $\mathcal{L}_{\text{máx}}$ es la máxima verosimilitud del modelo con la fuente adicional en las coordenadas especificadas. Por lo tanto, un TS grande indicaría que la hipótesis nula es falsa. De acuerdo al teorema de Wilk, el TS se distribuye asintóticamente como χ^2 .

2.1.2. Fermi Science Tools y HEASoft

En esta tesis se utilizaron los software HEASoft y las Fermi Science tools, ambos proporcionados de manera gratuita por la NASA, destinados especialmente para el análisis en rayos-X y rayos gamma de fuentes astronómicas. Las herramientas pertinentes del software mencionado se describen de manera breve a continuación¹.

Las Fermi-tools son una serie de herramientas que permiten el procesamiento de archivos .fits (Flexible Image Transport System) utilizados comúnmente en datos astronómicos. Para el estudio de los AGNs de esta tesis se utilizaron:

¹Para una descripción más detallada, se puede visitar: <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/references.html>

- (a) `gtselect`, cuya función consiste en generar archivos de extensión `.fits` filtrados, es decir, realiza selecciones detalladas de fotones del Fermi-LAT y datos de eventos obtenidos del servidor de datos FSSC. Estas selecciones involucran el rango de tiempo, el rango de energía, la región de interés (ROI, por sus siglas en inglés), la clase y el tipo de evento.
- (b) `gtmktime`, esta herramienta se encarga de leer el archivo de nave espacial y, basándose en filtros especificados genera intervalos de tiempo buenos. Estos GTI se combinan con los ya existentes GTI del archivo de eventos, de modo que todos los eventos fuera del nuevo conjunto se eliminan del archivo.
- (c) `gtbin`, la cual se utilizó para crear un mapa y un cubo de conteos, que son necesarios para el análisis de máxima verosimilitud.
- (d) `gtltcube`, esta herramienta utiliza el historial de la nave espacial junto con los intervalos temporales y selecciones de los GTI para calcular tiempos de vida como función de la inclinación y la ubicación sobre el cielo para un período de observación específico. Los productos obtenidos con `gtltcube` son llamados “cubos de tiempos de vida” y se definen sobre una malla HEALPix (acrónimo de Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation) sobre el cielo y en periodos de inclinación angular.
- (e) `gtexpcube2`, la tarea de esta herramienta es generar mapas de exposiciones, o un conjunto de mapas de exposición para diferentes energías a partir de un cubo de tiempo de vida producido con `gtltcube`. Normalmente cuando se habla de mapa de exposición, se dice que éstos son esencialmente integrales de área efectiva en el tiempo. Sin embargo, en el análisis de máxima verosimilitud, el mapa consiste en una integral de la respuesta total sobre toda la ROI:
- $$\epsilon(E, \hat{p}) = \int_{\text{ROI}} R(E', \hat{p}'; E, p, t) dE' d\hat{p}' dt. \quad (2.4)$$
- El mapa de exposición es la exposición total (área multiplicada por tiempo) para una posición determinada en el cielo que produce cuentas en la región de interés.
- (f) `gtsrcmaps`, su función es crear modelos de mapas de conteos, para lograrlo, toma cada fuente espectral del modelo XML del cielo utilizado, lo multiplica por la exposición en la posición de la fuente y convoluciona esa exposición con la función de respuesta del instrumento.
- (g) `gtlike`, es la herramienta principal para esta tesis, utiliza todos los productos generados por las herramientas mencionadas anteriormente con el objetivo de realizar el ajuste de máxima verosimilitud para los datos del LAT.

El software está disponible para los sistemas operativos Mac OS y Linux y las herramientas se pueden utilizar desde la terminal de comandos luego de inicializar el software. En esta tesis se utilizaron las versiones 6.24 de HEASof y v11r5p3 de las Fermi Science Tools, junto con el modelo Galáctico de emisión difusa `gll_iem_v06.fits` y el correspondiente modelo isotrópico extragaláctico de emisión difusa `iso_P8R2_SOURCE_V6_v06.txt` para los sistemas operativos Ubuntu 17.10 y Linux Mint 18.3

2.2. Análisis de bloques Bayesianos

El análisis temporal de las curvas de luz se llevó a cabo con una técnica de modelaje no paramétrica conocida como *bloques Bayesianos* propuesto por Scargle (Scargle, 1998). Los métodos no paramétricos se utilizan para obtener una representación genérica en lugar de ajustar un modelo a los datos y además describen la estructura de la señal en términos de una segmentación del intervalo temporal mediante bloques, donde cada bloque contiene datos que satisfacen un criterio bien definido.

Lo anterior puede conseguirse utilizando un *modelo constante a trozos*, en el cual el rango de la variable independiente (en este caso el tiempo) se divide en subintervalos (llamados bloques) que por lo general son de tamaños diferentes y en los cuales la variable dependiente (la intensidad de la señal) se modela como constante dentro de un margen de error. En el modelo de bloques Bayesianos, un *punto de cambio* se define como el tiempo en que termina un bloque y empieza el siguiente. De esta manera el modelo de todo el intervalo de observación contiene sólo tres parámetros:

1. N_{cp} : el número de puntos de cambio,
2. t_k : el punto de cambio en el que inicia el bloque k y en el que termina el bloque $k - 1$,
3. X_k : la amplitud de la señal del bloque k , para $k = 1, 2, \dots, N_{cp} + 1$.

El algoritmo de los bloques Bayesianos requiere de ciertas consideraciones, las cuales se mencionan de manera breve a continuación:

- (a) **Particiones.** Las particiones de un intervalo temporal \mathcal{T} son colecciones de bloques que no se superponen, y están definidas por el número de bloques y de sus bordes

$$\mathcal{P}(\mathcal{T}) \equiv \{N_{\text{blocks}}; n_k, k = 1, 2, 3, \dots, N_{\text{blocks}}\}, \quad (2.5)$$

donde n_k son los índices de las celdas de datos definiendo los puntos de cambios.

- (b) **Celdas de datos.** Éstas son la entrada para el algoritmo, una estructura conveniente consiste en un arreglo conteniendo a las celdas ordenadas de acuerdo a los tiempos de medición. El contenido de las celdas debe cumplir con dos cosas: (1) deben incluir información temporal que permita determinar cuál celda pertenece a un bloque dado su tiempo inicial y final, (2) la idoneidad de un bloque debe ser calculable a partir del contenido de todas las celdas en él.
- (c) **Bloques de celdas.** Un bloque es un conjunto de celdas consecutivas, puede ser un elemento de la representación óptima o sólo un candidato. Cada bloque representa un intervalo sobre el cual la amplitud de la señal puede estimarse a partir del contenido de sus celdas.

- (d) **Idoneidad de bloques y particiones.** Ya que la meta es representar los datos lo mejor posible dentro de una clase dada de modelos, es necesario maximizar una cantidad que mida la idoneidad del modelo.

$$F[\mathcal{P}(\mathcal{T})] = \sum_{k=1}^{N_{\text{blocks}}} f(B_k), \quad (2.6)$$

donde $F[\mathcal{P}(\mathcal{T})]$ es la idoneidad total de la partición \mathcal{P} del intervalo \mathcal{T} y $f(B_k)$ es la idoneidad del bloque k .

- (e) **Puntos de cambio.** Se le llama así a un punto en el cual un modelo estadístico sufre una transición abrupta por uno o más de sus parámetros, saltando instantáneamente a un nuevo valor.

Todas estas consideraciones se describen con mayor detalle en un artículo más reciente, en el cual también se presentan mejoras al procedimiento anterior (Scargle et al., 2013), y también se presenta un código escrito en MATLAB para realizar el análisis temporal de tres tipos de eventos astronómicos: (1) Time-tagged Events, (2) Binned events, (3) Point measurements.

Para esta tesis se realizó una implementación del código de bloques Bayesianos en lenguaje Python específicamente para eventos del tipo (2) para aplicarlo a los datos del Fermi-LAT. Los scripts utilizados se muestran en el Apéndice A.

2.3. Procedimiento

2.3.1. Blazares candidatos

La muestra de estudio se seleccionó con base en las coordenadas de los neutrinos detectados por el IceCube y brindadas en Aartsen et al. (2016). En el tercer catálogo de Fermi se buscaron aquellos blazares que coincidieran en un radio de $\pm 2^\circ$ con esas coordenadas y se obtuvieron 11 objetos, mostrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Blazares que coinciden espacialmente con los eventos de neutrinos

Nombre del blazar	Ascensión recta ($^\circ$)	Declinación ($^\circ$)
PMN J0152+0146	28.1650454	1.78816183
87GB 194635.4+130713	297.230371	13.2439959
MG3 J225517+2409	343.814060	24.1698177
RX J2030.8+1935	307.738057	19.6035922
TXS 2157+102	330.033055	10.5021949
1ES 0229+200	38.2025641	20.2881882
OP 313	197.619432	32.3454952
PKS 1337-013	205.019229	-1.6295952
NVSS J134042-041006	205.175061	-4.1686563
MG1 J021114+1051	32.8049056	10.85966629
TXS 2315+189	349.595451	19.24782756

Ahora se explicará la metodología que se utilizó para generar las curvas de luz y realizar el análisis espectral de los blazares. Se utilizó el software Enrico (Sanchez y Deil, 2013), se trata de una rutina que utiliza todas las Fermi-tools una por una.

2.3.2. Curvas de luz

Se descargaron los datos recolectados por el Fermi-LAT en los primeros 9.5 años de observación, desde el 01 de septiembre de 2008 hasta el 05 de febrero de 2018 y se buscó que los datos tuvieran una separación en episodios de una semana para cada blazar de la muestra seleccionada. Con ayuda del software Enrico se crearon archivos de configuración (con extensión `.conf`) para usar las *Fermi-tools*, estos archivos se crearon mediante el comando `enrico_config`. Por ejemplo, para el blazar OP313 se generó el archivo `OP313.conf` de la siguiente manera en la terminal:

```
$ enrico_config OP313.conf
```

Luego se ingresaron todos los datos para cada objeto: el nombre del AGN, la ascensión recta, declinación, la ruta completa hacia los archivos de eventos y el archivo de nave espacial, el rango de energías de interés, la ROI, corrimiento al rojo, la función de respuesta, entre otros. Todos estos datos se ingresaron al momento de crear el archivo de configuración. En el Apéndice B se muestra un fragmento del archivo `OP313.conf` que se generó.

Las Fermi-tools utilizan un modelo del cielo en formato `.xml`, de modo que el siguiente paso consistió en generar este modelo con el software Enrico. Para lograrlo se utilizó el siguiente comando:

```
$ enrico_xml OP313.conf
```

El comando `enrico_xml` utiliza la información del archivo de configuración y los datos del segundo catálogo de Fermi para crear el modelo del cielo en la región de interés del objeto.

Luego se realizó un ajuste general con la herramienta `enrico_sed`. Esta herramienta utilizará todas las Fermi-tools (`gtselect`, `gtmktime`, `gtltcube`, etc) una por una para generar los archivos necesarios (`.fits`) y finalmente compilar `gtlike` para calcular los parámetros que hacen que se maximice la función de ajuste que se utilizó mediante la siguiente instrucción:

```
$ enrico_sed OP313.conf
```

Nótese que la herramienta también necesita de la información del archivo de configuración. Los resultados se almacenaron en un archivo con extensión `".results"`. La curva de luz se generó utilizando la herramienta `enrico_lc` junto con el archivo de configuración. En el archivo de configuración se especificó que la separación entre cada punto de la curva de luz fuese de una semana de modo que se produjeran 492 puntos, y se utilizó:

```
$ enrico_lc OP313.conf
```

Al terminar de realizar los cálculos necesarios, se obtuvo la curva de luz para OP313, que se muestra en la figura 2.4.

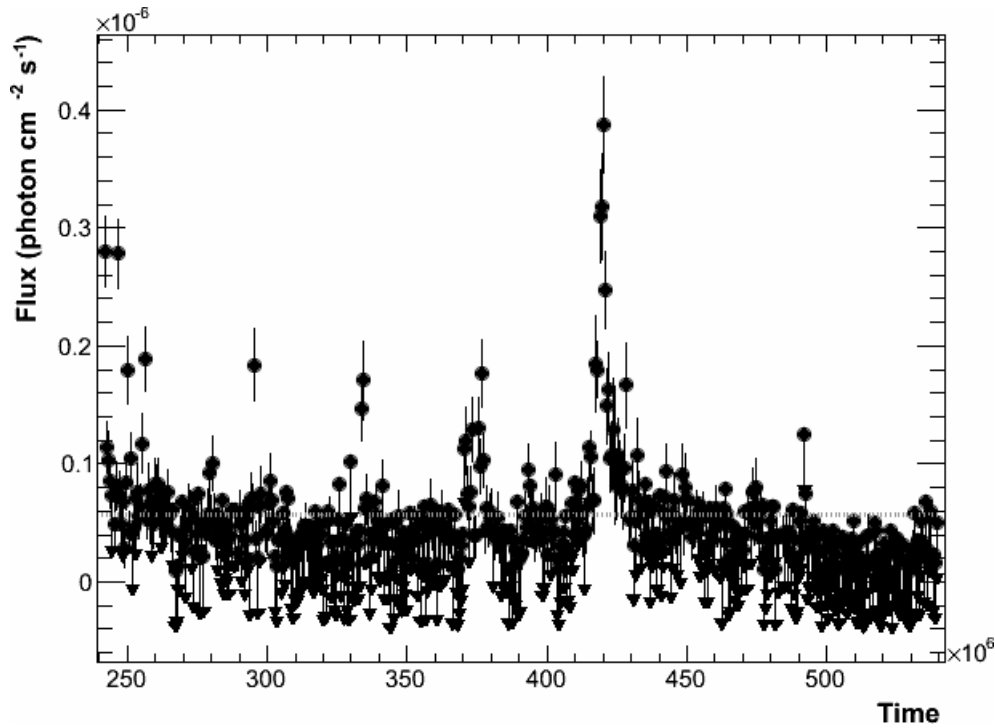


Figura 2.4: Curva de luz del blazar OP 313 para los primeros diez años de observación del Fermi-LAT (Créditos: USAC, Guatemala)

En el eje horizontal de la figura 2.4 se muestra el tiempo en MET (Mission Elapsed Time, el número de segundos transcurridos desde la fecha de referencia del 01 de enero de 2001) para el intervalo temporal de interés, mientras que el eje vertical representa el flujo en rayos gamma medido por el Fermi-LAT. Al llevar a cabo este procedimiento, la mayoría de los blazares de la tabla 2.1 fueron descartados debido a que los datos presentaron poca estadística, obteniéndose en su mayoría límites superiores en la curva de luz (ver Apéndice B para las curvas de luz de 1ES 0229+200 y TXS 2157+102), esto hizo imposible llevar a cabo el análisis espectral para varios de los candidatos seleccionados, la tabla 2.2 presenta la muestra de estudio definitiva para esta tesis.

El blazar 3C 279 se utilizó para validar el análisis y los ajustes obtenidos (es uno de los blazares más brillantes y es estudiado por diferentes autores), comparando los resultados con los obtenidos por Hayashida et al. (2015).

TXS 0506+056 se agregó a la lista debido a que nuevas observaciones del IceCube revelan que es el candidato más probable como fuente de emisión de neutrinos (IceCube-Collaboration et al., 2018). Finalmente, los blazares PG 1553+13 y Markarian 421 se seleccionaron por ser objetos muy conocidos (Abeysekara et al., 2017) y se utilizaron los ajustes de sus SEDs y sus

Tabla 2.2: Muestra final de blazares

Blazar	R. A	Dec.	Redshift
OP 313	197.619	32.3455	0.997
MG1 J021114+1051	32.8049	10.8597	0.200
TXS 0506+056	77.3582	5.69315	0.3365
Markarian 421	166.114	38.2088	0.031
PG 1553+113	238.929	11.1901	0.500
3C 279	193.98	-5.82	0.536

parámetros para compararlos con los de OP 313, TXS 0506+056 y MG1 J021114+1051.

2.3.3. Identificación de las ráfagas

Junto con las curvas de luz también se obtiene un archivo `ascii` que contiene los valores de tiempo (en MET) y los de flujo (en fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) para cada punto de la curva de luz. Este archivo fue la entrada para el algoritmo de bloques Bayesianos mostrado en el Apéndice A. El código selecciona sólo los valores de tiempo y flujo del archivo `ascii` para luego realizar la segmentación en bloques de los datos. Para OP313, los resultados se muestran en la figura 3.3

Se utilizaron dos criterios para seleccionar los intervalos temporales de las ráfagas de rayos gamma: (1) se consideró que un blazar se encontraba en una fase activa en aquellos tiempos en los cuales el flujo alcanzó un valor superior al flujo medio, \bar{f} más tres veces la desviación estandar, σ (Vercellone et al., 2004), y (2): los tiempos de inicio y final de los periodos de actividad se obtuvieron gracias al algoritmo de bloques Bayesianos. Estos dos criterios permitieron descartar todos aquellos periodos de variabilidad no significativa.

Al identificar los periodos de interés se utilizaron esos valores de tiempo para descargar nuevos archivos `.fits` del servidor de datos de Fermi y así realizar el ajuste espectral únicamente a la fase activa de los blazares. Para OP313, los intervalos de la fase activa de su curva de luz se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3: Fases activas del blazar OP 313

Ráfaga	Inicio (MET)	Final (MET)	Duración
1	242223439.465	247078454.907	2 meses
2	417610872.318	421252133.900	8 meses

2.3.4. Análisis espectral

Para obtener los SED se utilizó el procedimiento presentado en la sección 2.3.2, la diferencia radica en que los intervalos temporales utilizados fueron los de las fases activas solamente, y únicamente se realizó el ajuste general (con la herramienta `enrico_sed`).

Los dos modelos más utilizados para ajustar el espectro en rayos gamma de los blazares

son: (1) Ley de potencias (PL), cuya función se representa mediante

$$N(E) = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma}, \quad (2.7)$$

con un prefactor N_0 , un índice espectral Γ y una energía de referencia E_0 , y (2) Parábolas logarítmicas (LogP), que se expresa como

$$N(E) = N_0 \left(\frac{E}{E_b} \right)^{-\alpha - \beta \log(E/E_b)}, \quad (2.8)$$

con un índice espectral α , un factor de curvatura β y una energía de quiebre E_b . Ambos modelos sirven para representar el SED de AGNs en la banda de los rayos gamma, siendo el de Ley de potencias el más común, sin embargo, para fuentes brillantes se necesita considerar la curvatura para el ajuste espectral y por lo tanto se utiliza el de parábolas logarítmicas.

Se utilizó el parámetro $-2\Delta L = -2 \ln \left(\mathcal{L}_{\text{PL}} / \mathcal{L}_{\text{LogP}} \right)$ para decidir cuál de los dos ajustes describe de mejor manera los datos. Este parámetro representa la diferencia entre los logaritmos de la función de verosimilitud \mathcal{L} para el modelo LogP con respecto al modelo PL. Un valor grande de ΔL significa que el modelo PL es inadecuado, y que debe usarse el modelo LogP. Los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Análisis de resultados

“There are two possible outcomes: if the result confirms the hypothesis, then you’ve made a measurement. If the result is contrary to the hypothesis, then you’ve made a discovery.”

– Enrico Fermi

3.1. Resultados de los ajustes espectrales

Con el propósito de asegurar la veracidad de los resultados obtenidos para los AGNs de esta tesis se analizó al blazar 3C 279, el cual ha sido muy estudiado por presentar ráfagas muy intensas y por observarse en todas las longitudes de onda, su corrimiento al rojo es de $z = 0.536$ (Lynds et al., 1965) y en esta sección se muestra el ajuste obtenido para las fases activas de 3C 279.

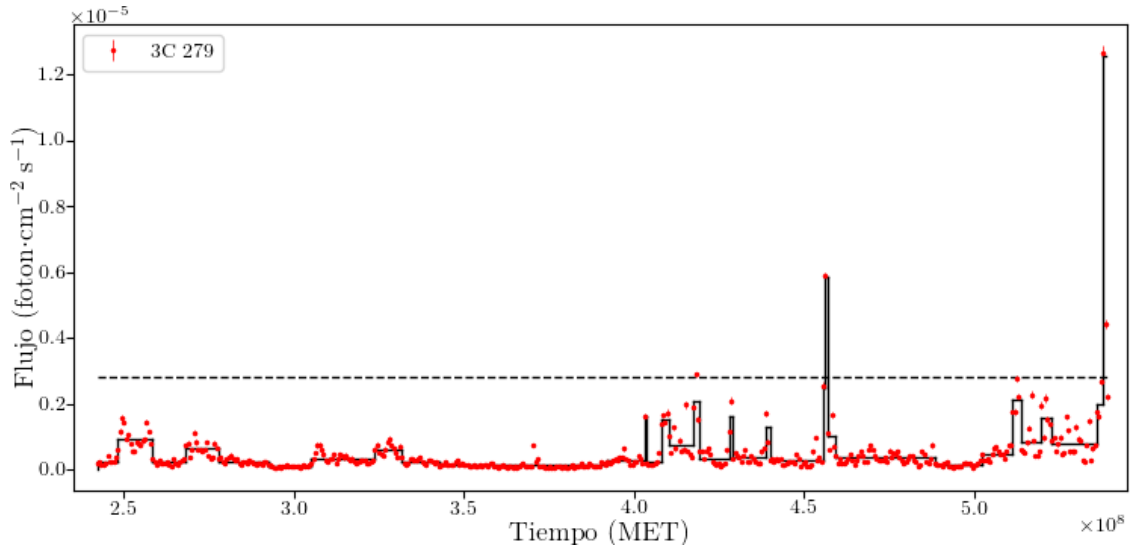


Figura 3.1: Curva de luz y bloques Bayesianos de 3C 279 para los primeros diez años de observación del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ para 3C 279.

La figura 3.1 muestra la curva de luz de 3C 279 para las fechas comprendidas entre el 01 de septiembre de 2008 y el 05 de febrero de 2018. El flujo medio obtenido para 3C 279 por el Fermi-LAT fue de $\bar{f} = 4.75 \times 10^{-7}$ ph·cm⁻²·s⁻¹, y su desviación estándar, $\sigma = 7.78 \times 10^{-7}$ ph·cm⁻²·s⁻¹.

La línea horizontal punteada de la figura 3.1 representa el parámetro $\bar{f} + 3\sigma = 2.81 \times 10^{-6}$ ph·cm⁻²s⁻¹.

Los periodos estudiados por Hayashida et al. (2015) están comprendidos entre diciembre de 2013 (MET $\sim 4.0 \times 10^8$ s) y mayo de 2014 (MET $\sim 4.3 \times 10^8$ s), que para las fechas de 2015 se trataba del periodo con mayor actividad del blazar y además coinciden con la segmentación en bloques Bayesianos obtenida. Sin embargo, un periodo de actividad mucho más intenso ocurrió aproximadamente en los meses de diciembre de 2017 y enero de 2018, alcanzando flujos de hasta 1.2×10^{-5} ph·cm⁻²s⁻¹. Se estudiaron cuatro periodos en total, los cuales son:

1. Entre las 9h con 36 minutos y las 14h con 24 minutos del 20 de diciembre de 2013 (llamado Periodo B en Hayashida et al. (2015)).
2. Entre 5h 02min y 11h 26 min del 03 de abril de 2014 (llamado Periodo D en Hayashida et al. (2015)). Tanto B y D se estudiaron porque forman parte de una fase activa de 3C 279, y han sido estudiados previamente por Hayashida et al. (2015).
3. La ráfaga que ocurrió en junio de 2015 (MET $\sim 4.55 \times 10^8$ s), superando los valores de flujo de la ráfaga que ocurrió en el 2014 (llamado 3C–F1).
4. El periodo en que 3C 279 alcanzó su flujo máximo medido por Fermi-LAT, aproximadamente en enero de 2018 (MET $\sim 5.4 \times 10^8$ s). Se le llamó periodo 3C–F2).

Los primeros dos periodos mencionados (B y D) forman parte de la validación, los resultados del ajuste se muestran en la tabla 3.1 junto con los demás periodos.

Tabla 3.1: Ajuste espectral en rayos gamma para 3C 279

Periodo (MET) (10 ⁸ segundos)	Ajuste ^a	α/Γ ^b	β	TS	$-2\Delta L$ ^c	Flujo (10 ⁻⁷ ph cm ⁻² s ⁻¹)
Periodo B	LogP	1.11 ± 0.27	0.21 ± 0.09	509	9.9	101 ± 16.9
(4.09224963 – 4.09242243)	PL	1.75 ± 0.08	...	499		135 ± 17.2
2013/12/20 9h36–14h24						
Hayashida B ^d	LogP	1.12 ± 0.31	0.19 ± 0.09	413	6.0	94.5 ± 18.1
2013/12/20 9h36–14h24	PL	1.71 ± 0.10	...	407		117.6 ± 19.6
Periodo D	LogP	2.03 ± 0.08	0.14 ± 0.05	1670	9.3	110 ± 6.63
(4.18194147 – 4.18217215)	PL	2.17 ± 0.05	...	1656		113 ± 6.65
2014/04/03 5h02–11h26						
Hayashida D	LogP	2.02 ± 0.08	0.10 ± 0.05	1840	5.3	115 ± 7.1
2014/04/03 5h02–11h26	PL	2.16 ± 0.06	...	1839		118 ± 7.1
3C–F1	LogP	2.01 ± 0.02	0.10 ± 0.01	24959	108	48 ± 0.74
(4.55716803 – 4.56926403)	PL	2.14 ± 0.01	...	24883		50 ± 0.74
2015/06/11 – 2015/06/25						
3C–F2	LogP	2.13 ± 0.02	0.09 ± 0.01	14029	43.90	92 ± 1.91
(5.37969604 – 5.38574404)	PL	2.23 ± 0.02	...	14019		96 ± 1.89
2018/01/18 – 2018/01/25						
2008 – 2018 sin EBL	LogP	2.25 ± 0.01	0.06 ± 0.00	171332		6.36 ± 0.04
(241920001 – 539481605)						

Notas

^a PL: modelo de ley de potencia, LogP: modelo de parábola logarítmica.

^b α : índice espectral para LogP, Γ : índice espectral para PL.

^c ΔL representa la diferencia entre el logaritmo de la verosimilitud del ajuste con respecto a una simple ley de potencia.

^d Resultados obtenidos por Hayashida et al. (2015)

Los parámetros espectrales calculados para las ráfagas de los periodos B y D están en concordancia con lo reportado por Hayashida et al. (2015). En la figura 3.2 se muestra la distribución espectral de energía para los periodos de 3C 279 de la tabla 3.1. Se observa que la forma espectral de los periodos es muy diferente a su espectro obtenido en el periodo completo de 2008 a 2018.

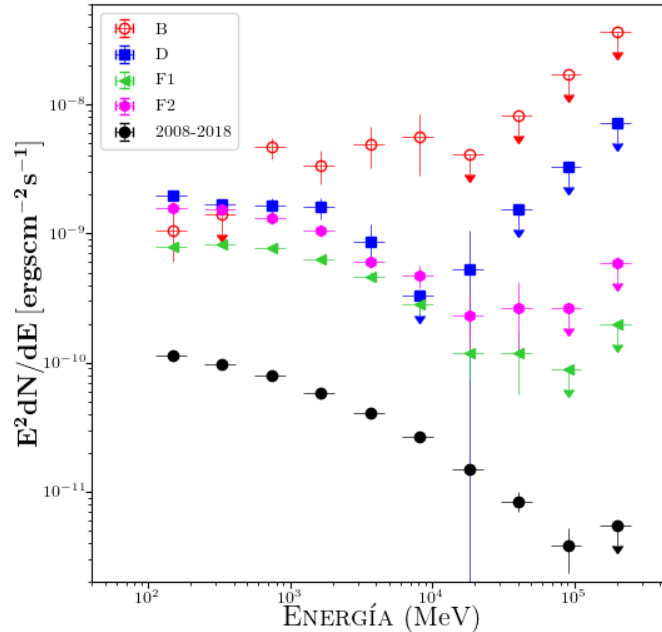


Figura 3.2: Distribución espectral de energía en rayos gamma para 3C 279 medida por Fermi-LAT para los periodos mostrados en la tabla 3.1.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los demás blazares estudiados en esta tesis. El periodo de observación completo para cada blazar es el mismo, entre el 01 de septiembre de 2008 (MET 241920001 s) y el 05 de febrero de 2018 (MET 539481605 s). Se calculó el valor del flujo medio \bar{f} para cada objeto y su desviación estándar σ y se utilizó el parámetro $\bar{f} + 3\sigma$ para discriminar fases activas (Vercellone et al., 2004).

3.1.1. OP 313

OP 313 es un blazar de tipo FSRQ con una clase espectral LSP, es un objeto muy distante con un corrimiento al rojo de $z = 0.997$, su curva de luz junto con el análisis de bloques Bayesianos se presenta en la figura 3.3. El flujo promedio calculado para OP 313 en el período de 2008 a 2018 fue de $\bar{f} = 5.37 \times 10^{-8} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y su desviación estándar de $\sigma = 4.09 \times 10^{-8} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esto produce que el criterio para discriminar fases activas $\bar{f} + 3\sigma$, tenga un valor de $1.76 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, este límite se representa como la línea horizontal punteada en la figura 3.3. Se eligieron solamente dos periodos de interés, los cuales son los siguientes:

- (a) El intervalo temporal comprendido entre el 04 de septiembre de 2008 (MET $\sim 2.42 \times 10^8\text{s}$), y el 30 de octubre de 2008 (MET $\sim 2.47 \times 10^8\text{s}$), se le llamó periodo OP-A.
- (b) La siguiente fase activa del blazar ocurrió entre el 12 de diciembre de 2013 (MET $\sim 4.08 \times 10^8\text{s}$) y el 07 de agosto de 2014 (MET $\sim 4.29 \times 10^8\text{s}$), se le llamó periodo OP-B.

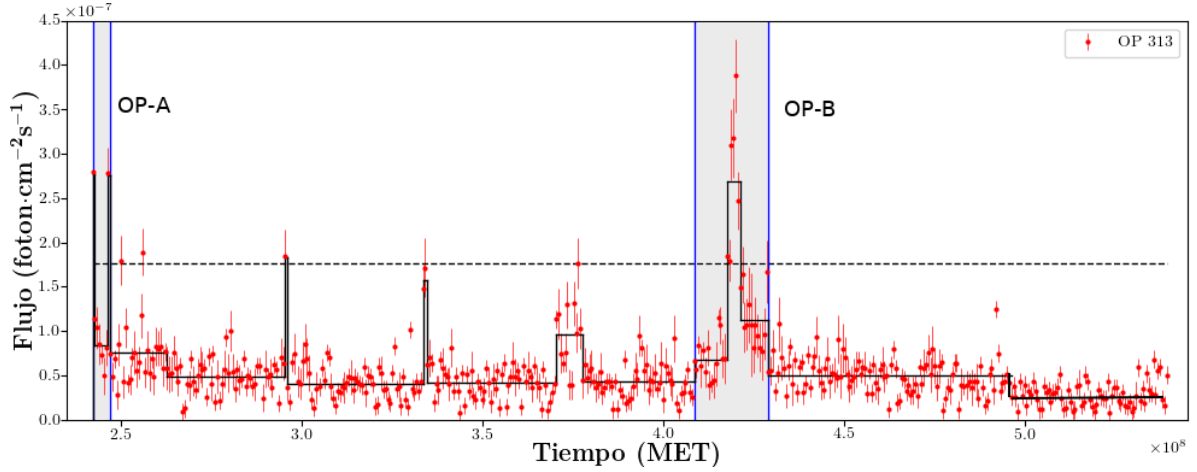


Figura 3.3: Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar OP 313 en el periodo de observación de 2008–2018 del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ y las líneas verticales de color azul representan los periodos estudiados para OP 313.

Los periodos seleccionados se muestran mediante las líneas verticales de color azul en la figura 3.3 y los resultados de los ajustes espectrales aplicando el análisis de máxima verosimilitud a los datos de OP 313 se muestran en la tabla 3.2. Se realizaron ajustes para dos situaciones distintas: considerando el corrimiento al rojo de la fuente y por lo tanto usando un modelo de EBL (Extragalactic Background Light), y sin considerar el corrimiento al rojo (no EBL). Esto se aplicó a los periodos OP–A, OP–B mencionados anteriormente y también para el periodo completo de observación. Se observa que no aparecen variaciones significativas para el ajuste PL ni para LogP para ambas situaciones.

Tabla 3.2: Ajuste espectral en rayos gamma para OP 313

Periodo (MET) (10^8 segundos)	Ajuste	α/Γ	β	TS	$-2\Delta L$	Flujo (10^{-7} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
OP–A sin EBL	LogP	2.13 ± 0.07	0.05 ± 0.04	722	0.03	1.50 ± 0.13
(2.42222401 – 2.47060801)	PL	2.19 ± 0.06	...	721	...	1.57 ± 0.12
OP–A con EBL	LogP	2.14 ± 0.07	0.04 ± 0.04	723	1.94	1.50 ± 0.13
2008/09/04 – 2008/10/30	PL	2.18 ± 0.06	...	722	0.70	1.57 ± 0.12
OP–B sin EBL	LogP	2.12 ± 0.05	0.06 ± 0.03	1880	7.73	1.41 ± 0.08
(4.08542403 – 4.29105603)	PL	2.20 ± 0.03	...	1878	...	1.51 ± 0.07
OP–B con EBL	LogP	2.12 ± 0.05	0.06 ± 0.03	1880	8.25	1.41 ± 0.08
2013/12/12 – 2014/08/07	PL	2.19 ± 0.03	...	1879	1.95	1.51 ± 0.07
Diez años sin EBL	LogP	2.19 ± 0.03	0.07 ± 0.01	6471	33.10	0.52 ± 0.02
(241920001 – 539481605)	PL	2.27 ± 0.02	...	6489	...	0.57 ± 0.02
Diez años con EBL	LogP	2.19 ± 0.03	0.06 ± 0.01	6474	34.44	0.52 ± 0.02
2008/09/01 – 2018/02/05	PL	2.26 ± 0.01	...	6495	11.10	0.57 ± 0.02

En la figura 3.4 se presenta la distribución espectral de energía (flujo normalizado contra energía en MeV) medida por el telescopio para los diferentes periodos: OP–A (puntos rojos), OP–B (puntos azules) y de 2008–2018 (puntos negros).

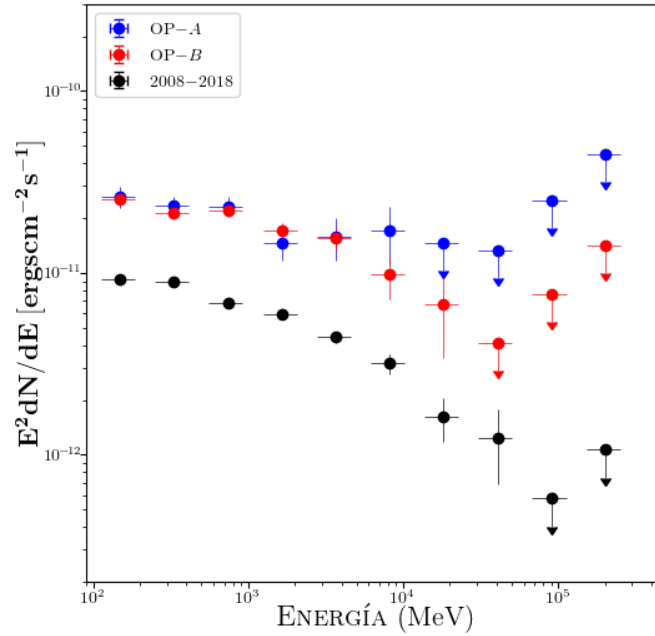


Figura 3.4: Distribución espectral de energía en rayos gamma para OP 313 medida por Fermi-LAT para los tres periodos mostrados en la tabla 3.2.

3.1.2. MG1 J021114+1051

MG1 J021114+1051 es un blazar de tipo BL Lac de clase espectral ISP, con un corrimiento al rojo de $z = 0.200$ (Meisner y Romani, 2010), en la figura 3.5 se muestra su curva de luz junto con la segmentación en bloques Bayesianos obtenida.

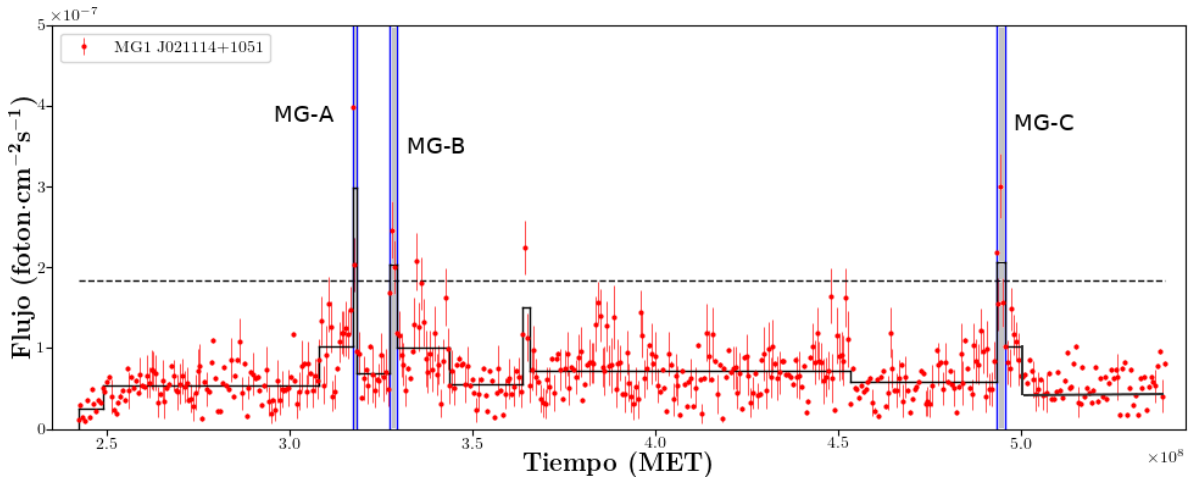


Figura 3.5: Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar MG1 J021114+1051 en el periodo de observación de 2008–2018 del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ y las líneas verticales de color azul representan los periodos estudiados para MG1 J021114+1051.

El valor de flujo medio y desviación estándar calculados para el caso de MG1 J021114+1051 son, respectivamente: $\bar{f} = 6.88 \times 10^{-8} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ y $\sigma = 3.83 \times 10^{-8} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. De este modo se obtiene un parámetro de $\bar{f} + 3\sigma = 1.83 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. La curva de luz de MG1

J021114+1051 muestra aumentos de actividad mejor definidos que para el caso de OP 313, sin embargo el análisis espectral se llevó a cabo solamente para los períodos que superaron de manera significativa un flujo de 1.83×10^{-7} ph·cm⁻²s⁻¹. Las ráfagas tomadas en cuenta para MG1 J021114+1051 comprenden las siguientes fechas:

- (a) Del 20 de enero de 2011 (MET $\sim 3.17 \times 10^8$ s) al 03 de febrero de 2011 (MET $\sim 3.18 \times 10^8$ s), periodo en el cual se registró la mayor actividad para este blazar, alcanzando valores de $\sim 4 \times 10^{-7}$ ph·cm⁻²s⁻¹ de flujo electromagnético. A este intervalo temporal se le llamó *MG-A*,
- (b) el otro periodo de actividad inició el 19 de mayo de 2011 (MET $\sim 3.27 \times 10^8$ s) y finalizó el 09 de junio de 2011 (MET $\sim 3.30 \times 10^8$ s), esta fase activa de MG1 J021114+1051 ocurrió tan sólo 3 meses después de la ráfaga anterior, y se etiquetó como *MG-B*,
- (c) la última ráfaga ocurrió entre el 18 de agosto de 2016 (MET $\sim 4.93 \times 10^8$ s) y el 15 de septiembre de 2016 (MET $\sim 4.95 \times 10^8$ s), que parece haber sido un periodo un poco más largo de actividad y que alcanzó valores muy elevados de flujo con respecto a la media calculada. A este periodo de actividad se le llamó *MG-C*.

Las líneas azules verticales de la figura 3.5 representan los periodos de actividad de MG1 J021114+1051 estudiados en esta tesis. En la tabla 3.3 se muestran los parámetros espectrales obtenidos al realizar el ajuste con los modelos de LogP y PL a los periodos: *MG-A*, *MG-B*, *MG-C* y para los primeros 10 años de observación del Fermi-LAT.

Tabla 3.3: Ajuste espectral en rayos gamma para MG1 J021114+1051

Periodo (MET) (10 ⁸ segundos)	Ajuste	α/Γ	β	TS	$-2\Delta L$	Flujo (10 ⁻⁷ ph cm ⁻² s ⁻¹)
MG-A sin EBL	LogP	1.84 ± 0.14	0.08 ± 0.06	316	1.91	1.90 ± 0.36
(3.17217602 – 3.18427202)	PL	1.95 ± 0.08	...	317	...	2.20 ± 0.32
MG-A con EBL	LogP	1.84 ± 0.14	0.07 ± 0.06	316	1.94	1.90 ± 0.36
2011/01/20 – 2011/02/03	PL2	1.97 ± 0.08	...	318	0.08	2.26 ± 0.32
MG-B sin EBL	LogP	1.83 ± 0.11	0.03 ± 0.04	404	0.74	1.73 ± 0.27
(3.27499202 – 3.29313602)	PL	1.89 ± 0.07	...	404	...	1.86 ± 0.24
MG-B con EBL	LogP	1.83 ± 0.11	0.03 ± 0.04	404	0.85	1.73 ± 0.27
2011/05/19 – 2011/06/09	PL	1.89 ± 0.07	...	404	0.21	1.86 ± 0.24
MG-C sin EBL	LogP	2.02 ± 0.08	0.02 ± 0.04	480	1.00	2.11 ± 0.25
(4.93214404 – 4.95633604)	PL	2.05 ± 0.07	...	481	...	2.17 ± 0.23
MG-C con EBL	LogP	2.03 ± 0.08	0.01 ± 0.04	480	0.40	2.12 ± 0.25
2016/08/18 – 2016/09 – 15	PL	2.04 ± 0.07	...	481		2.16 ± 0.23
Diez años sin EBL	LogP	2.06 ± 0.02	0.04 ± 0.01	7615	21.60	0.61 ± 0.02
(2.41920001 – 5.39481605)	PL	2.13 ± 0.02	...	7652		0.69 ± 0.02
Diez años con EBL	LogP	2.07 ± 0.02	0.04 ± 0.01	7617	22.0	0.61 ± 0.02
2008/09/01 – 2018/02/05	PL	2.13 ± 0.02	...	7653	1.88	0.67 ± 0.02

En la figura 3.6 se presenta la distribución espectral de energía para las tres fases activas de MG1 J021114+1051, junto con el SED obtenido para el periodo de 2008–2018. Los SED de los periodos *MG-A* y *MG-B* mostrados parecen tener una forma espectral distinta del SED para el periodo de los diez años, ocurre algo similar para el periodo *MG-C*.

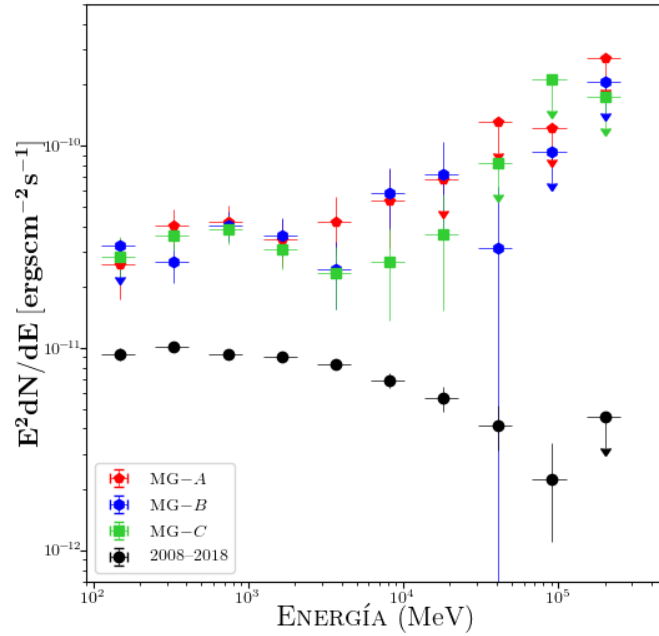


Figura 3.6: Distribución espectral de energía en rayos gamma para MG1 J021114+1051 medida por Fermi-LAT para los periodos mostrados en la tabla 3.3

3.1.3. PG 1553+113

PG 1553+113 es un blazar de la clase BL Lac y un tipo espectral HSP, su corrimiento al rojo tiene un valor de $z = 0.499$ (Abramowski et al., 2015). PG 1553 +113 se ha caracterizado por mostrar periodicidad en la emisión de sus ráfagas y esto parece confirmarse con los bloques Bayesianos formados en su curva de luz, mostrada en la figura 3.7.

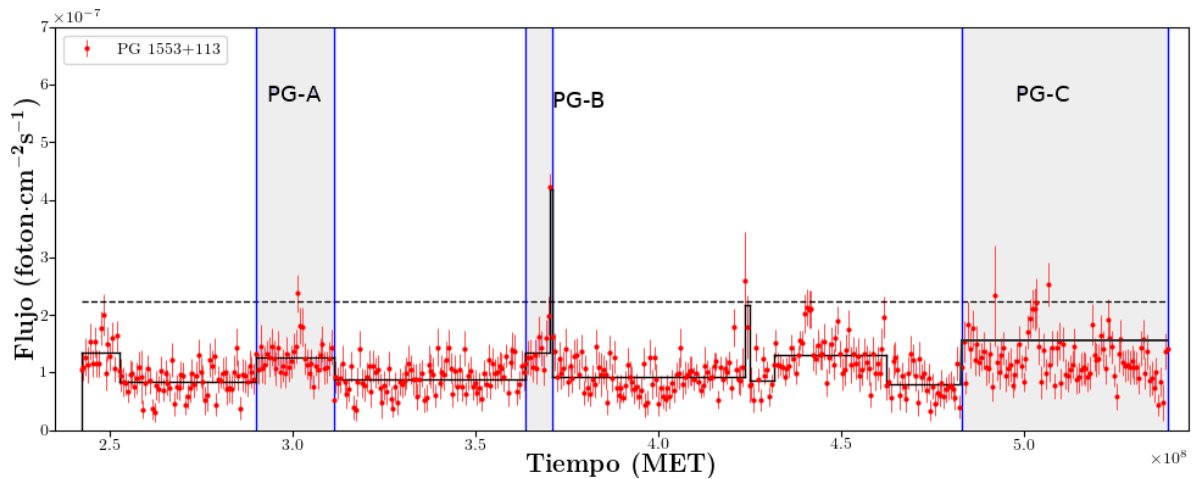


Figura 3.7: Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar PG 1553+113 en el periodo de observación de 2008–2018 del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ y las líneas verticales de color azul representan los periodos estudiados para PG 1553+113.

El valor promedio de los flujos medidos por Fermi-LAT en los primeros 10 años de observación fue de $\bar{f} = 1.07 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, con una desviación estándar $\sigma = 3.92 \times 10^{-8} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Esto produce que el criterio utilizado, $\bar{f} + 3\sigma$ sea igual a $2.24 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

En la figura 3.7 se observa que las ráfagas de PG 1553+113 no son muy intensas, hay pocos intervalos en los cuales el flujo supera el parámetro $\bar{f} + 3\sigma$. Se estudiaron los siguientes periodos:

- (a) Entre el 11 de marzo de 2010 (MET $\sim 2.90 \times 10^8$ s) y el 11 de noviembre de 2010 (MET $\sim 3.11 \times 10^8$ s). En este periodo, PG 1553+113 alcanzó valores de flujo de $2.25 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, superando levemente el criterio utilizado y se le llamó PG-A.
- (b) Entre el 12 de julio de 2012 (MET $\sim 3.63 \times 10^8$ s) y el 04 de octubre de 2012 (MET 3.71×10^8 s). que sin duda alguna es el periodo de mayor actividad que se ha registrado para este blazar ya que alcanzó valores de flujo de hasta $4.2 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Se etiquetó a este periodo como PG-B.
- (c) Del 21 de abril de 2016 (MET $\sim 4.82 \times 10^8$ s) al 01 de febrero de 2018 (MET $\sim 5.39 \times 10^8$ s). Este periodo alcanzó valores de flujo similares a los que presentó el periodo PG-A, pero el algoritmo de bloques Bayesianos devolvió una duración mayor. Fue etiquetado como PG-C.

Los parámetros calculados con el ajuste espectral para las fechas exactas de los intervalos de interés: PG-A, PG-B, PG-C y del 2008 al 2018 se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Ajuste espectral en rayos gamma para PG 1553+113

Periodo (MET) (10^8 segundos)	Ajuste	α/Γ	β	TS	$-2\Delta L$	Flujo ($10^{-8} \text{ ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
PG-A sin EBL	LogP	1.72 ± 0.04	0.03 ± 0.02	2609	4.50	8.40 ± 0.76
(2.90001601 – 3.11169601)	PL	1.76 ± 0.03	...	2613	...	9.33 ± 0.59
PG-A con EBL	LogP	1.72 ± 0.04	0.01 ± 0.02	2612	4.50	8.65 ± 0.71
2010/03/11 – 2010/11/11	PL	1.74 ± 0.03	...	2615	3.82	9.14 ± 0.58
PG-B sin EBL	LogP	1.57 ± 0.07	0.02 ± 0.03	1070	0.65	7.64 ± 1.11
(3.63787202 – 3.71044802)	PL	1.61 ± 0.05	...	1068	...	8.29 ± 0.86
PG-B con EBL	LogP	1.58 ± 0.06	0.00 ± 0.01	1073	3.88	7.99 ± 0.85
2012/07/12 – 2012/10/04	PL	1.58 ± 0.05	...	1073	3.88	8.03 ± 0.85
PG-C sin EBL	LogP	1.68 ± 0.03	0.01 ± 0.01	7114	1.61	7.95 ± 0.50
(4.82932804 – 5.39179204)	PL	1.71 ± 0.02	...	7122	...	8.40 ± 0.33
PG-C con EBL	LogP	1.68 ± 0.02	0.00 ± 0.00	7124	7.60	8.17 ± 0.33
2016/04/21 – 2018/02/01	PL	1.69 ± 0.02	...	7125	7.62	8.20 ± 0.33
Diez años sin EBL	LogP	1.59 ± 0.01	0.04 ± 0.01	33754	123.9	5.61 ± 0.16
(2.41920001 – 5.39481605)	PL	1.67 ± 0.01	...	33872	...	6.69 ± 0.12
Diez años con EBL	LogP	1.61 ± 0.01	0.02 ± 0.01	33894	91.85	5.97 ± 0.17
2008/09/01 – 2018/02/05	PL	1.65 ± 0.01	...	33926	...	6.50 ± 0.12

En la figura 3.8 se muestran los SEDs del blazar PG 1553+113 en los cuatro periodos: PG-A, PG-B, PG-C y los diez años de la misión Fermi. Este blazar parece tener las mismas características en todos los intervalos de interés, se observa que el flujo normalizado $E^2 dN/dE$ tiende a crecer en el rango de energías estudiado.

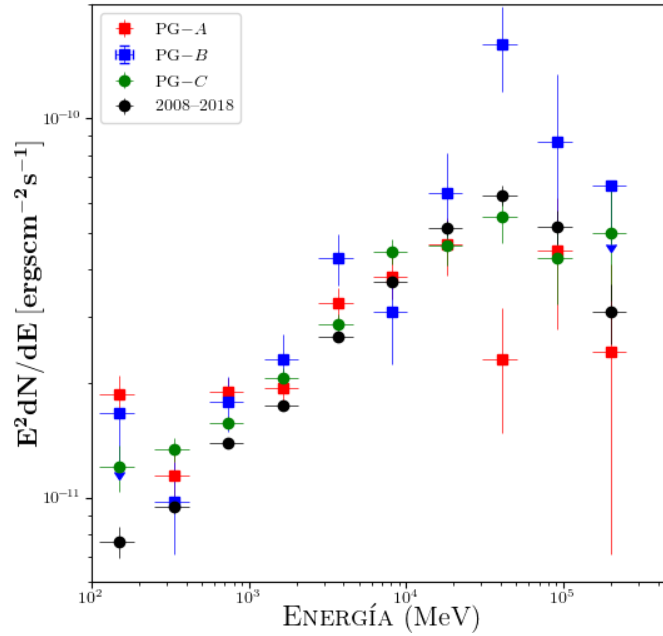


Figura 3.8: Distribución espectral de energía en rayos gamma para PG 1553+113 medida por Fermi-LAT para los cuatro periodos mostrados en la tabla 3.4.

3.1.4. Markarian 421

Markarian 421 se caracteriza por su alta variabilidad y es uno de los blazares más cercanos a la Vía Láctea, con un corrimiento al rojo de $z=0.031$ (Mao, 2011), fue el primer AGN que se observó en la banda de los TeV. Su curva de luz se muestra en la figura 3.9 y al aplicar el algoritmo de bloques Bayesianos se obtuvo una segmentación en 32 bloques.

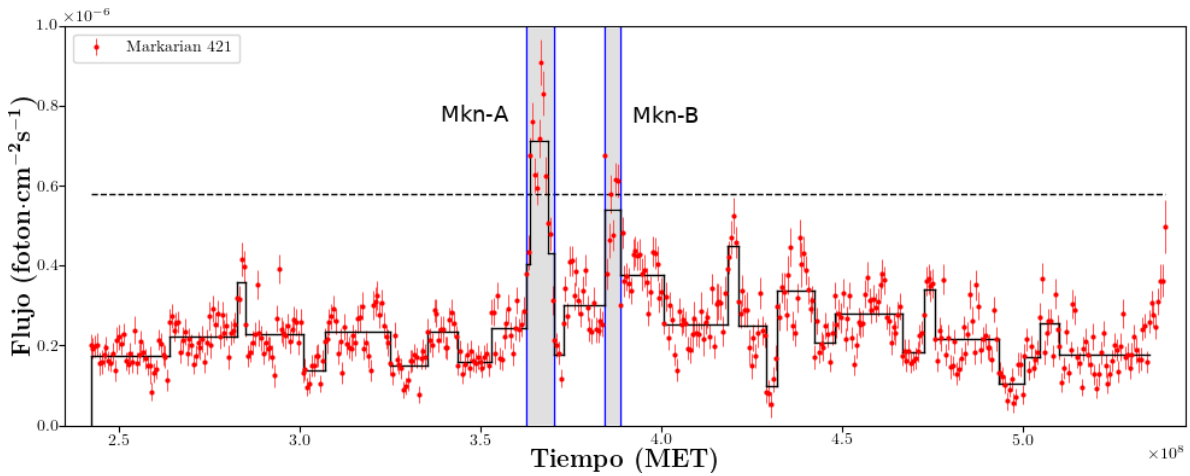


Figura 3.9: Curva de luz en rayos gamma y bloques Bayesianos del blazar Markarian 421 en el periodo de observación de 2008–2018 del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ y las líneas verticales de color azul representan los periodos estudiados para Markarian 421.

El flujo promedio obtenido para Markarian 421 en el periodo de 2008–2018 fue de $\bar{f} = 2.47 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, con una desviación estándar igual a $\sigma = 1.10 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, lo

que conduce a un criterio de discriminación igual a $\bar{f} + 3\sigma = 5.78 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, el cual se representa con la línea horizontal punteada de la figura 3.9.

Los periodos estudiados para Markarian 421 fueron solamente dos como puede observarse en la figura 3.9. Estos son:

- (a) Del 08 de marzo de 2012 (MET $\sim 3.52 \times 10^8 \text{ s}$) al 27 de septiembre de 2012 (MET $\sim 3.70 \times 10^8 \text{ s}$). Este periodo se etiquetó como Mkn-A.
- (b) Entre el 07 de marzo de 2013 (MET $\sim 3.84 \times 10^8 \text{ s}$) y el 25 de abril del 2013 (MET $\sim 3.88 \times 10^8 \text{ s}$), en donde se alcanzaron flujos cercanos a $\sim 7 \times 10^{-7} \text{ ph}\cdot\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. A este periodo se le llamó Mkn-B.

Tabla 3.5: Ajuste espectral en rayos gamma para Markarian 421

Periodo (MET) (10^8 segundos)	Ajuste	α/Γ	β	TS	$-2\Delta L$	Flujo ($10^{-7} \text{ ph cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
Mkn-A sin EBL	LogP	1.67 ± 0.04	0.01 ± 0.01	15820	4.53	3.23 ± 0.08
(3.52900802 – 3.70440002)	PL	1.75 ± 0.01	...	15815	...	3.31 ± 0.07
Mkn-A con EBL	LogP	1.68 ± 0.04	0.01 ± 0.01	15820	4.85	3.23 ± 0.08
2012/03/08 – 2012/09/27	PL2	1.76 ± 0.01	...	15812	< 0	3.31 ± 0.07
Mkn-B sin EBL	LogP	1.65 ± 0.07	0.02 ± 0.01	5181	3.82	4.21 ± 0.18
(3.84350402 – 3.88584002)	PL	1.79 ± 0.02	...	5174	...	4.36 ± 0.16
Mkn-B con EBL	LogP	1.65 ± 0.07	0.02 ± 0.01	5181	3.91	4.21 ± 0.18
2013/03/07 – 2013/04/25	PL2	1.79 ± 0.02	...	5174	0.18	4.37 ± 0.17
Diez años sin EBL	LogP	1.75 ± 0.01	0.01 ± 0.00	136677	..	1.99 ± 0.02
(2.41920001 – 5.39481605)	PL	1.77 ± 0.00	...	136726	14.41	2.02 ± 0.02
Diez años con EBL	LogP	1.75 ± 0.01	0.01 ± 0.00	136948	< 0	1.99 ± 0.02
2008/09/01 – 2018/02/05	PL	1.76 ± 0.00	...	136728	9.47	2.02 ± 0.02

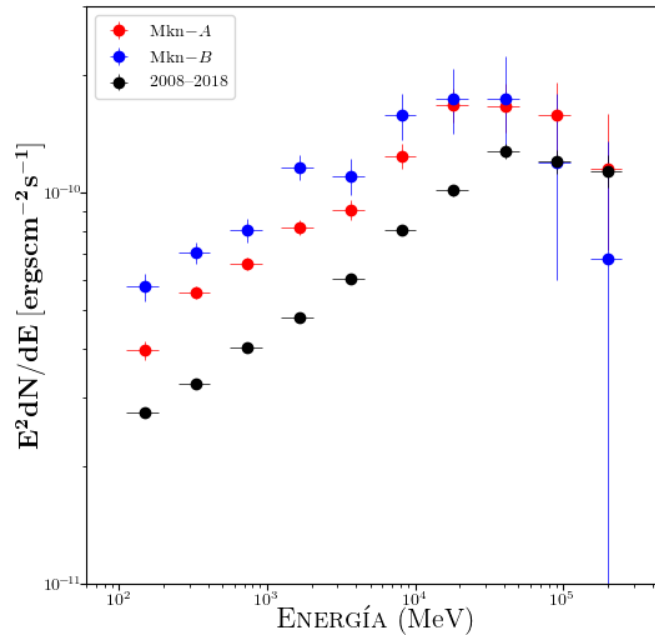


Figura 3.10: Distribución espectral de energía en rayos gamma del blazar Markarian 421 medida por Fermi-LAT para los tres periodos de la tabla 3.5.

Un resumen de los resultados obtenidos con el ajuste espectral para Markarian 421 en sus dos fases activas: Mkn-A y Mkn-B, se muestra en la tabla 3.5. Al igual que con los demás blazares, se realizó también el ajuste para los primeros diez años del Fermi-LAT y se hicieron en total cuatro ajustes por cada periodo de interés.

Los puntos de flujo normalizado de Markarian 421 para ambos periodos, Mkn-A y Mkn-B se muestran en la figura 3.10, además se presenta el SED para el periodo completo de observación. Si bien Mkn-A fue el periodo de mayor actividad, su espectro se encuentra ligeramente por debajo de los puntos calculados para Mkn-B y ambos parecen tener la misma forma espectral.

3.1.5. TXS 0506+056

TXS 0506+056 es un AGN descubierto en 1983 gracias a las observaciones en longitudes de onda de radio y después de 20 años fue catalogado como un blazar de tipo BL Lac (Halpern et al., 2003). TXS 0506+056 era un blazar poco estudiado hasta que en septiembre 22 de 2017, el IceCube detectó un evento de neutrinos de altas energías, cercanas a ~ 290 TeV cuyas coordenadas fueron R.A = 77.43° , Dec = 5.72° (IceCube-Collaboration et al., 2018) que, según la tabla 2.2 se encuentra en una clara coincidencia espacial con TXS 0506+056. Además, actualmente es el blazar más probable para la emisión de neutrinos extragalácticos, según los estudios de Padovani et al. (2018). La falta de conocimiento sobre su corrimiento al rojo dificultaba el estudio completo de este blazar, pero ahora se sabe que tiene un valor de $z = 0.3365$ (Paiano et al., 2018).

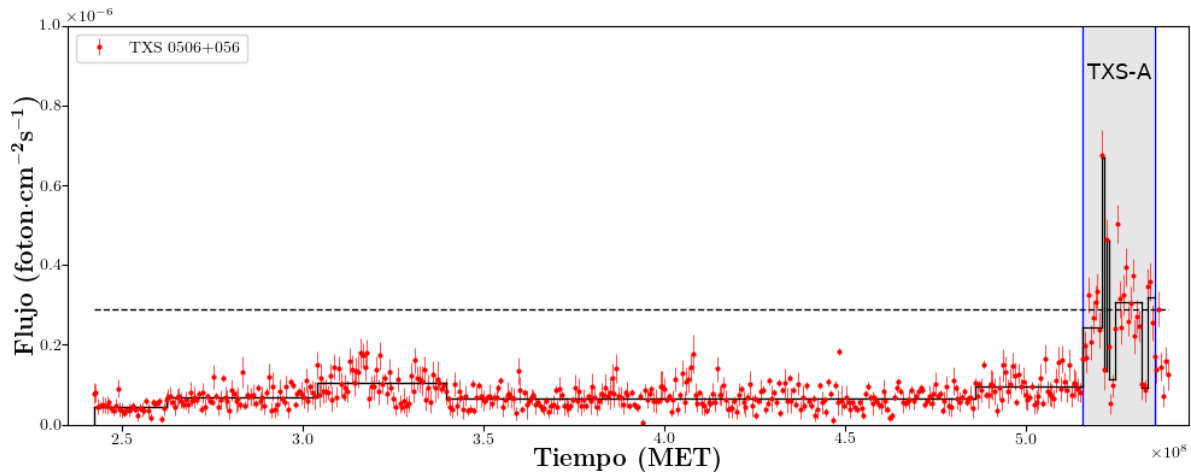


Figura 3.11: Curva de luz y bloques Bayesianos del blazar TXS 0506+056 en el periodo de observación de 2008–2018 del Fermi-LAT. La línea punteada representa el valor del flujo medio más tres veces la desviación estándar, $\bar{f} + 3\sigma$ y las líneas verticales de color azul representan los periodos estudiados para TXS 0506+056.

La curva de luz de TXS 0506+056 se muestra en la figura 3.11, en la que también se muestra la segmentación en bloques Bayesianos, representados con las líneas sólidas de color negro. Para TXS 0506+056, el flujo medio en los primeros 9.5 años de observación fue de $\bar{f} = 8.82 \times 10^{-8}$ ph·cm $^{-2}$ s $^{-1}$, y su desviación estándar fue de $\sigma = 6.65 \times 10^{-8}$ ph·cm $^{-2}$ s $^{-1}$, de modo que el criterio $\bar{f} + 3\sigma$ tiene un valor de 2.87×10^{-7} ph·cm $^{-2}$ s $^{-1}$. Este parámetro de discriminación se muestra con la línea horizontal negra punteada en la figura 3.11. Se estudiaron dos periodos para TXS 0506+056:

- (a) La ráfaga completa, cuya emisión se dio entre el 04 de mayo de 2017 (MET $\sim 5.15 \times 10^8$ s) y el 21 de diciembre de 2017 (MET $\sim 5.35 \times 10^8$ s). Se le llamó TXS-A.
- (b) Entre el 17 de agosto de 2017 (MET $\sim 5.24 \times 10^8$ s) y el 09 de noviembre de 2017 (MET $\sim 5.32 \times 10^8$ s). Este periodo se etiquetó como TXS-Spt.

Tabla 3.6: Ajuste espectral en rayos gamma para TXS 0506+056

Periodo (MET) (10^8 segundos)	Ajuste	α/Γ	β	TS	$-2\Delta L$	Flujo (10^{-7} ph cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
TXS-A sin EBL	LogP	1.59 ± 0.10	0.08 ± 0.02	4419	2.93	2.28 ± 0.14
(5.15592004 – 5.35550404)	PL	2.03 ± 0.02	...	4528	...	2.76 ± 0.12
TXS-A con EBL	LogP	1.59 ± 0.10	0.08 ± 0.02	4420	2.52	2.29 ± 0.14
2017/05/04 – 2017/12/21	PL	2.03 ± 0.02	...	4536	< 0	2.78 ± 0.12
Septiembre sin EBL	LogP	1.60 ± 0.14	0.09 ± 0.03	2227	13.65	2.84 ± 0.24
(5.24664004 – 5.31921604)	PL	2.05 ± 0.03	...	2284	...	3.36 ± 0.19
TXS-Spt con EBL	LogP	1.61 ± 0.14	0.08 ± 0.03	2227	13.71	2.84 ± 0.25
2017/08/17 – 2017/11/09	PL	2.05 ± 0.03	...	2287	0.88	3.36 ± 0.19
2008 – 2018 sin EBL	LogP	1.79 ± 0.06	0.04 ± 0.01	10860	26.17	0.71 ± 0.03
(241920001 – 539481605)	PL	2.06 ± 0.01	...	11013	...	0.83 ± 0.02
2008 – 2018 con EBL	LogP	1.81 ± 0.06	0.04 ± 0.01	10883	...	7.19 ± 0.03
2008/09/01 – 2018/02/05	PL	2.06 ± 0.01	...	12094	...	0.86 ± 0.02

Las fechas exactas de las ráfagas se muestran en la tabla 3.6, en la cual también se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ajustes espectrales que se realizaron. Los SEDs para los periodos mostrados en la tabla 3.6 se muestran en la figura 3.12, en la cual se observa que el espectro cambia ligeramente cuando el blazar se encuentra en una fase activa comparado con el espectro total.

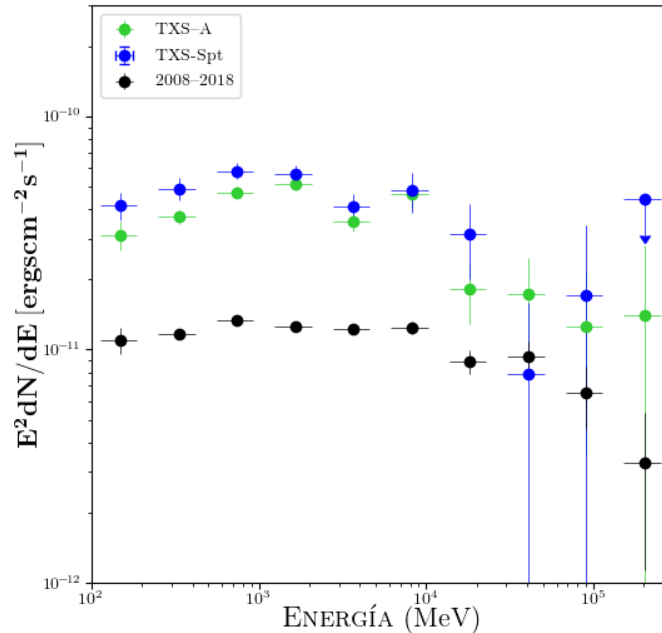
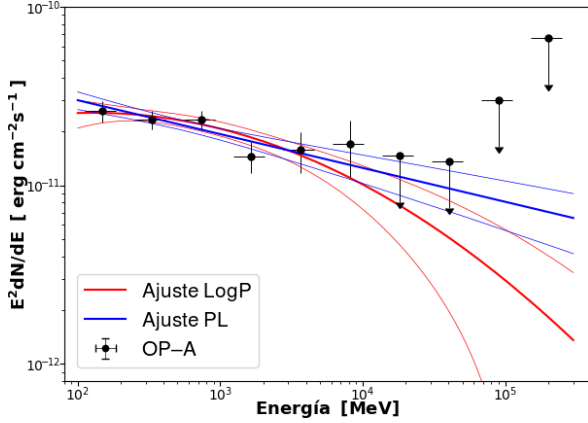


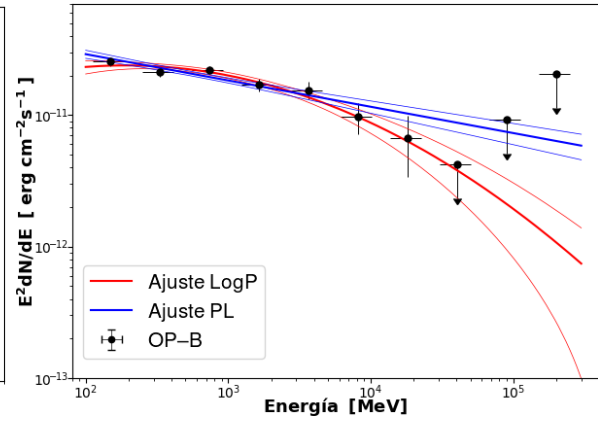
Figura 3.12: Distribución espectral de energía en rayos gamma de TXS 0506+056 medida por Fermi-LAT durante los periodos mostrados en la tabla 3.6.

3.2. Discusión

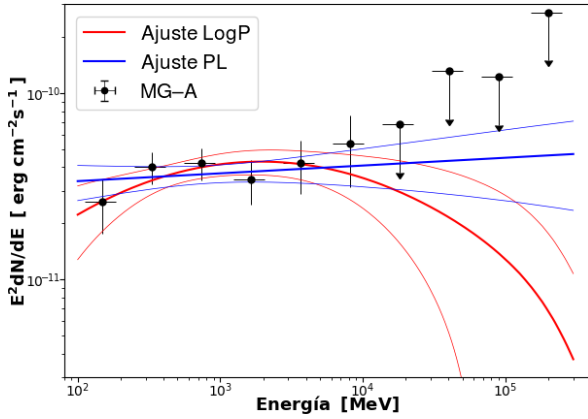
Los ajustes espectrales de las ráfagas de rayos gamma de OP 313, MG1 J021114+1051, PG 1553+113, Markarian 421 y TXS 0506+056 se muestran en la figura 3.13. La línea curva de color rojo representa el ajuste obtenido con el modelo LogP con su respectivo error, mientras que la línea azul representa el ajuste obtenido con el modelo PL.



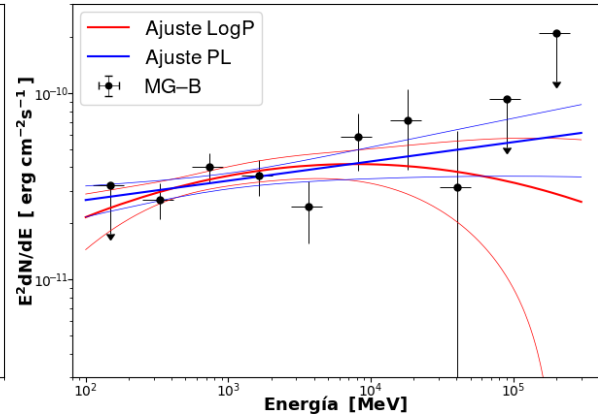
(a) Ajustes para OP-A



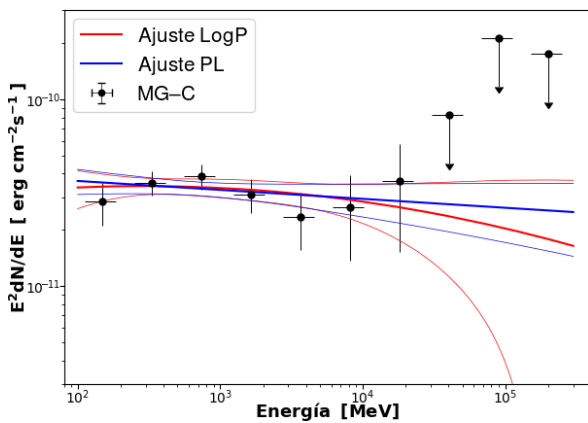
(b) Ajustes para OP-B



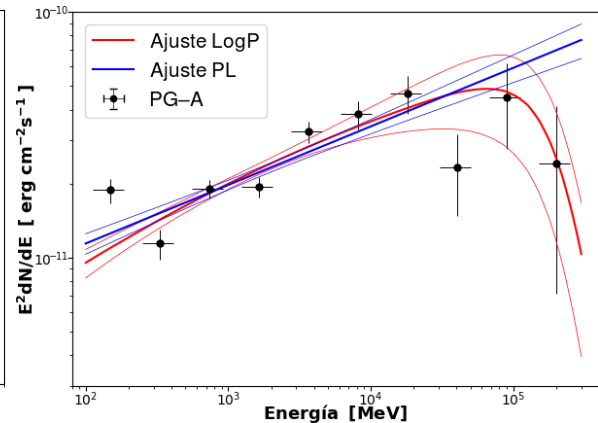
(c) Ajustes para MG-A



(d) Ajustes para MG-B



(e) Ajustes para MG-C



(f) Ajustes para PG-A

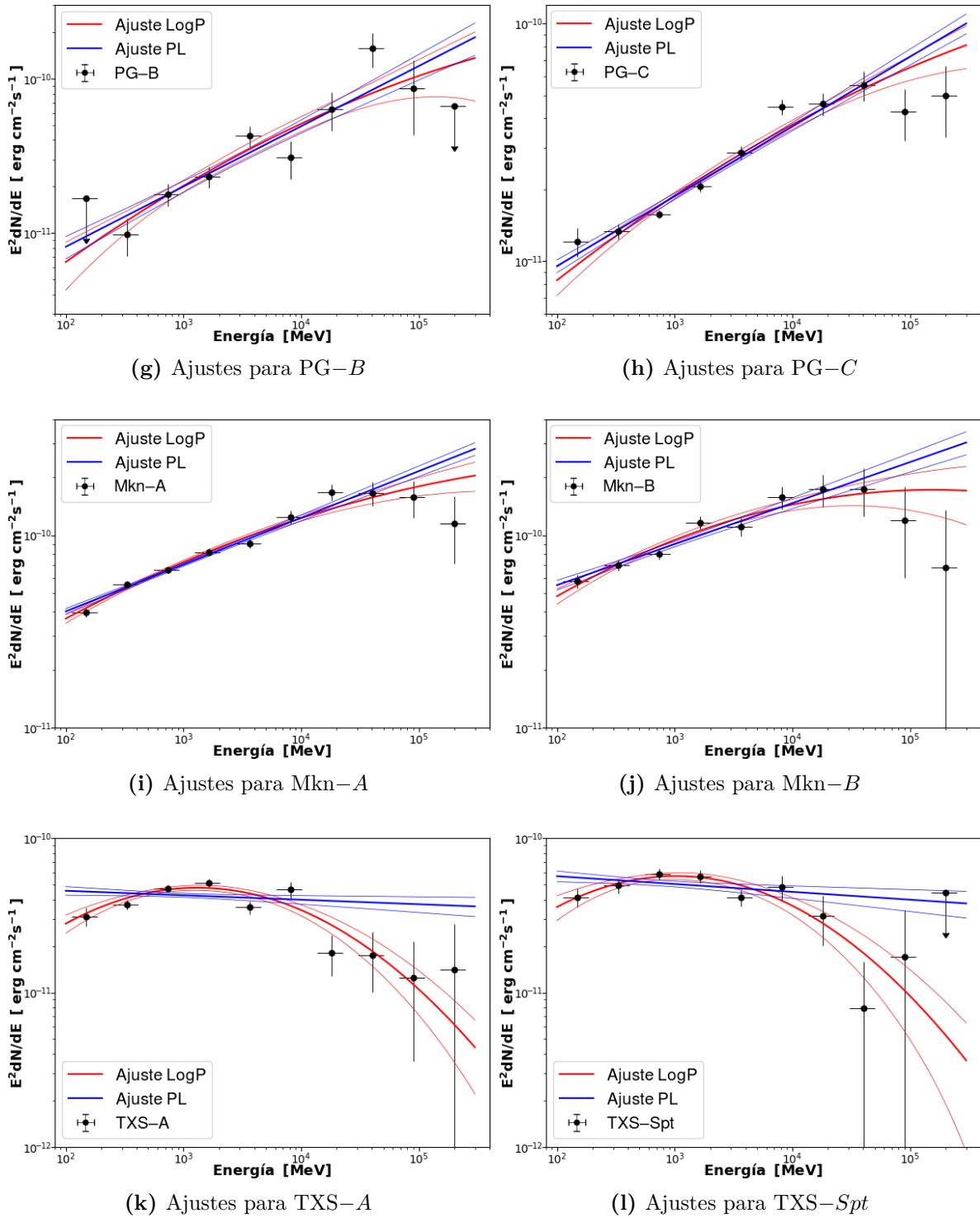


Figura 3.13: Ajustes espectrales para OP 313, MG1 J02114+1051, PG 1553+113, Markarian 421 y TXS 0506+056 en sus periodos de actividad

Los espectros mostrados en la figura 3.13 están comprendidos en un rango de energías de 0.1 GeV a 300 GeV, a estas energías la emisión de los blazares puede explicarse mediante el efecto Compton inverso causado por los mismos fotones emitidos en la radiación de sincrotrón a bajas energías, mecanismo llamado Synchrotron-Self Compton (SSC). Esto permite ajustar

la distribución espectral de energías asumiendo que siguen una ley de potencias. Los ajustes espectrales de los 5 blazares para el periodo 2008–2018, mostrados en la figura B.3 del Apéndice B, pueden describirse de manera satisfactoria utilizando el modelo de ajuste PL y LogP, sin embargo los resultados de la tablas 3.2–3.6 junto con la figura 3.13 revelan que el modelo PL presenta leves deficiencias para describir el espectro de las ráfagas de rayos gamma de estos objetos con respecto a LogP.

Los índices espectrales en los periodos de actividad de MG1 J021114+1051, mostrados en las figuras 3.13(c), 3.13(d) y 3.13(e) para el modelo PL rondan los valores de $\Gamma \sim 1.89$ que es inferior al índice obtenido para los diez años de observación. Además, los parámetros obtenidos para el periodo MG–C resultaron ser muy similares al periodo de 2008–2018. Los puntos de flujo calculados para MG1 J021114+1051 presentan límites superiores para energías mayores a 10^4 MeV, esto hace muy difícil inferir la calidad del ajuste realizado. Sucede lo mismo para los periodos OP–A y OP–B mostrados en las figuras 3.13(a) y 3.13(b), aunque para el rango de energías de $10^2 - 10^4$ MeV el modelo PL y LogP brindan resultados similares y el parámetro $-2\Delta L$ toma valores muy bajos, como en el periodo OP–A.

Los ajustes espectrales para el blazar PG 1553+113 en los periodos PG–A, PG–B y PG–C mostrados en las figuras 3.13(f), 3.13(g) y 3.13(h) describen de buena manera los datos observacionales en los tres periodos. Lo mismo sucede con los ajustes para los periodos Mkn–A y Mkn–B del blazar Markarian 421 mostrados en las figuras 3.13(i) 3.13(j). Los índices espectrales para Markarian 421 rondan entre los valores de $\alpha = 1.65$ para el modelo LogP y $\Gamma = 1.80$ para el modelo PL, estos parámetros no varían de manera significativa entre ambos periodos de actividad. Tanto para Markarian 421 como PG 1553+113, el modelo LogP y PL son muy eficientes, y no hay preferencia para utilizar uno sobre el otro, esto se refleja en los valores del parámetro $-2\Delta L$.

Debe mencionarse el caso de TXS 0506+056, su curva de luz revela que también hay una coincidencia temporal con la alerta de neutrinos IceCube-170922A y el estado activo de este blazar (IceCube-Collaboration et al., 2018). Es posible observar que el mayor registro de actividad para TXS 0506+056 aparece en los últimos años de observación del Fermi-LAT, a partir de mayo de 2017 (MET $\sim 5.10 \times 10^8$ s) y finalizando en diciembre del mismo año (MET $\sim 5.40 \times 10^8$ s), de modo que el 22 de septiembre 2017 está dentro del periodo de tiempo en el cual TXS 0506+056 se encontraba en una ráfaga y por lo tanto es de sumo interés estudiar sus propiedades espectrales.

En las figuras 3.13(k) y 3.13(l) se presentan los ajustes espectrales para TXS 0506+056. Los índices espectrales obtenidos para TXS 0506+056 en el periodo de 2008–2018 son $\alpha = 1.80 \pm 0.06$ para LogP y $\Gamma = 2.06 \pm 0.01$ para PL, mientras que en los periodos TXS–A y TXS–Spt se obtuvieron índices de $\alpha = 1.60 \pm 0.14$ para LogP y $\Gamma = 2.05 \pm 0.03$ para PL. El hecho que los parámetros calculados para TXS–A y TXS–Spt sean similares, indica que no ocurrieron procesos físicos diferentes en el periodo TXS–Spt con respecto a TXS–A, sin embargo, los índices de ambos periodos difieren con respecto al periodo completo.

El espectro para el periodo TXS–Sept dio como resultado una diferencia entre logaritmos igual a $-2\Delta L = 13.65$, lo que indica que el modelo LogP se ve favorecido para describir el SED de TXS 0506+056 en ese periodo de observación. Esto se puede observar en la figura 3.13(k) y 3.13(l), en la que el espectro presenta curvatura y por lo tanto se desvía de manera significativa de la forma de una ley de potencias.

En la figura 3.14 se muestra la distribución espectral de energía para las ráfagas más brillantes de cada blazar analizado. Se muestran los periodos: OP-A (puntos de color azul), MG-A (color rojo), PG-B (color negro), Mkn-A (color verde) y TXS-A (color magenta).

PG 1553+113 y Markarian 421 son los únicos blazares del tipo HSP de la muestra estudiada, esta característica se observa en las figura 3.14, en la cual el flujo normalizado en los periodos PG-B y Mkn-A tienden a crecer y parece que el pico ocurre en energías del orden de magnitud de $10^4 - 10^5$ MeV, mientras que los blazares OP 313, MG1 J021114+1051 y TXS 0506+056 muestran un comportamiento decadente en el rango de energías estudiadas.

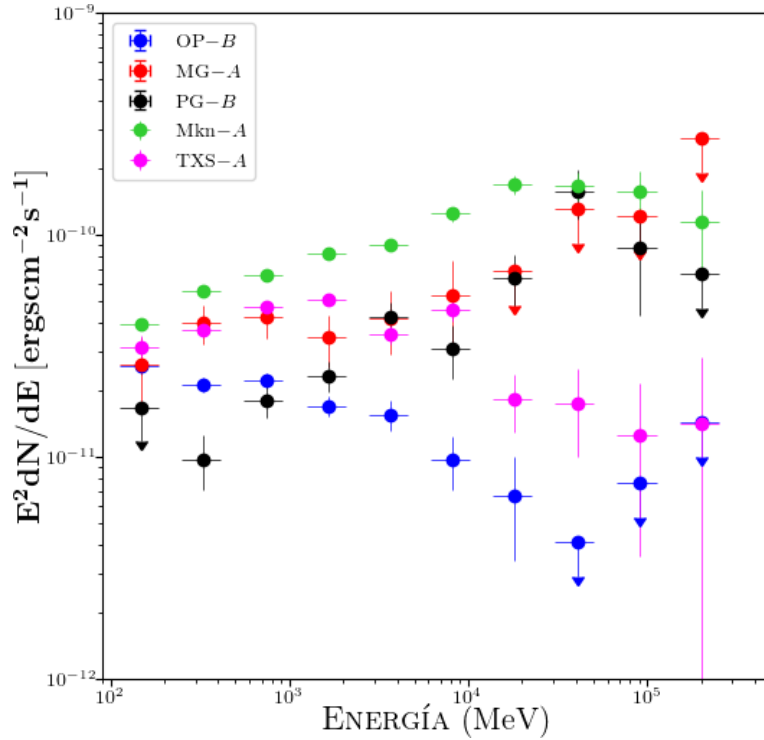


Figura 3.14: Distribución espectral de energía de las ráfagas más brillantes de los 5 blazares estudiados.

En el periodo de 2008 a 2018, TXS 0506+056 mostró sólo una fase activa que comenzó en abril de 2017 y terminó en diciembre del mismo año, esto difiere con los blazares OP 313 y MG1 J021114+1051, los cuales presentaron mayor número fases activas pero con menor duración (dos ráfagas para el caso de OP 313 y tres para MG1 J021114+1051 que superaron el criterio $\bar{f} + 3\sigma$). Sin embargo, en la figura 3.14 se observa que la forma espectral de las ráfagas OP-B y TXS-A son similares y que difieren sólo en el rango de energías en el que aparece el pico, pero esto puede explicarse considerando que OP 313 es un blazar de tipo LSP mientras TXS 0506+056 es del tipo ISP. El otro blazar de tipo ISP es MG1 J021114+1051, sin embargo, la presencia de límites superiores en los datos de MG1 J021114+1051 hacen difícil compararlos con los obtenidos para TXS 0506+056, esto también indica que la fase activa de TXS 0506+056 fue mucho más intensa y brillante que la reportada para MG1 J021114+1051.

Se puede observar en la figura 3.14 que el espectro de Markarian 421 y PG 1553+113 es muy diferente al de TXS 0506+056. Esto es importante porque si los procesos físicos en la fase

activa de TXS 0506+056 hubiesen sido diferentes al resto de los blazares, se esperaría que su espectro ISP cambiase totalmente y fuese similar al de Markarian 421 (HSP) por las energías involucradas. Sin embargo no se observa este comportamiento y el espectro de TXS 0506+056 sigue siendo de clase ISP. Además, en la figura 3.12 se observa que la forma del SED de TXS 0506+056 para sus fases activas difiere con el SED obtenido para el periodo completo, por lo que aún se deben estudiar las propiedades físicas de los blazares de tipo ISP para comprender de mejor manera los procesos que se llevan a cabo en estos objetos.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo a futuro

Conclusiones

A partir de la idea que los blazares podrían ser las fuentes emisoras de los neutrinos detectados por IceCube, en esta tesis se ha realizado un análisis temporal y espectral a una muestra de fuentes candidatas tomando como referencia los eventos de neutrinos reportados por Aartsen et al. (2016) y aquellos blazares del tercer catálogo de Fermi con una correlación espacial de $\pm 2^\circ$ con respecto a estos eventos. Los objetos en coincidencia espacial fueron 11 (tabla 2.1), pero la poca estadística presente en la curva de luz de la mayoría de estos objetos condujeron al estudio de sólo 6 blazares (tabla 2.2). Las curvas de luz se obtuvieron en el rango de energías de 0.1 GeV a los 300 GeV con los datos del Fermi-LAT en el periodo de 2008 a 2018.

Para el estudio temporal de las fuentes se utilizó el método de bloques Bayesianos, el cual es una técnica estadística muy conocida para analizar la variabilidad de un conjunto de datos mediante la segmentación en bloques, dando como resultado un arreglo similar a un histograma. En esta tesis se utilizó el algoritmo de bloques Bayesianos (implementado en lenguaje Python) de Scargle et al. (2013) para caracterizar la duración de las ráfagas de rayos gamma de la curva de luz de los blazares 3C 279, OP 313, MG1 J021114+1051, PG 1553+113, Markarian 421 y TXS 0506+056, de modo que se pudo inferir cuáles intervalos pertenecen a un mismo bloque y así seleccionar las fases activas de los objetos. El análisis demostró que los objetos estudiados son variables en su emisión, algunos blazares como PG 1553+113 lograron segmentarse con solamente 11 bloques, mientras que Markarian 421 y 3C 279 resultaron ser los más variables, segmentándose en 32 y 34 bloques respectivamente. Además, los resultados muestran que el blazar TXS 0506+056 presenta una curva de luz muy poco variable en los primeros 9 años de la misión Fermi, pues de septiembre de 2008 hasta abril de 2017 sólo se generaron 5 bloques, es hasta mayo de 2017 que inició una fase activa muy variable ya que entre mayo y noviembre de 2017 (seis meses), el algoritmo devolvió 9 bloques, casi el doble que para el resto de tiempo de observación. El resto de objetos muestran ráfagas que alcanzan valores elevados de flujo pero posteriormente permanecen en estados no activos durante varios años, como el caso de OP 313 y MG1 J021114+1051.

Por otro lado, se obtuvieron los parámetros espectrales para los modelos PL y LogP de las ráfagas de rayos gamma de los 6 objetos analizados y se observa que a excepción de los índices

obtenidos para TXS 0506+056, los valores de los índices espectrales en las fases activas no varían demasiado con respecto a los valores obtenidos para el periodo de 2008–2018. Además, se observa en la figura 3.13 que si bien las SEDs de los blazares estudiados puede ser descrita por una ley de potencias, el modelo de ajuste de parábolas logarítmicas presenta leves ventajas debido a la curvatura de la distribución espectral de energía en las ráfagas de rayos gamma, además el parámetro $-2\Delta L$ toma valores lejanos a 1, especialmente para la ráfaga del blazar TXS 0506+056 (figura 3.13(k)), lo que indica que el modelo LogP es más conveniente para describir el espectro. Sin embargo, para otros blazares como PG 1553+113 y Markarian 421 no hay una diferencia significativa entre ambos modelos (figuras 3.13(f)–3.13(j)). Para los blazares OP 313 y MG1 J021114+1051 se obtuvo poca estadística en sus SEDs, de modo que la calidad de los datos dificultan cualquier conclusión con respecto a los ajustes realizados. El hecho de que en todos los casos el SED cambia en una fase activa y el ajuste LogP lo describa de mejor manera sugiere que los procesos físicos en las ráfagas de rayos gamma de los objetos estudiados son los mismos, y ya que TXS 0506+056 es el primer blazar asociado a la emisión de neutrinos (Padovani et al., 2018), los resultados del análisis temporal muestran que la diferencia entre la fase activa de TXS 0506+056 y las de los demás objetos difiere solamente en su duración, de modo que la emisión de neutrinos podría estar relacionada con la duración de las ráfagas y no con su intensidad.

Cabe recalcar que 3C 279, Markarian 421 y PG 1553+113 no cumplen con el criterio de selección de los otros tres blazares, se analizaron solamente con el propósito de comparar los resultados de sus espectros con el de TXS 0506+056, en los cuales no se encontraron similitudes. La diferencia entre la clase espectral de los blazares se puede apreciar en la figura 3.14. PG 1553+113 y Markarian 421 son los blazares más brillantes de la muestra estudiada en esta tesis, son objetos BL Lac del tipo espectral HSP y su espectro difiere considerablemente del de OP 313 (un blazar de clase espectral LSP), MG1 J021114+1051 (clase espectral ISP) y TXS 0506+056 (clase espectral ISP). A pesar de las energías asociadas a Markarian 421, parece que no hay ninguna correlación con este blazar y los eventos de neutrinos detectados por IceCube, esto ha conducido a diferentes autores a modelar la emisión de los blazares de modo que los objetos de clase LSP e ISP (como TXS 0506+056) se vean favorecidos para la emisión de neutrinos, en lugar de los de clase HSP; ver Righi et al. (2018).

Trabajo a futuro

La caracterización de la distribución espectral de energía de los blazares es muy importante para comprender los mecanismos físicos responsables de la emisión en altas energías de estos objetos, por tanto, en investigaciones a futuro es recomendable estudiar un número más grande de blazares para obtener las propiedades espectrales de sus fases activas. Además, se debe estudiar con mayor detalle las propiedades de los blazares de la clase espectral ISP como TXS 0506+056 ya que es el único blazar asociado con un evento de neutrinos mientras se encontraba en una fase activa.

Debido a que los resultados parecen indicar que la emisión de neutrinos está relacionada con la duración de las ráfagas, es importante realizar un estudio temporal de las fases activas con mayor detalle, se debe estudiar la duración media de las ráfagas de rayos gamma de los blazares y analizar las diferencias o similitudes entre las pendientes de crecimiento y decrecimiento para caracterizar su morfología temporal. Es recomendable también acotar los parámetros físicos utilizados en los modelos propuestos para explicar los procesos involucrados en la emisión de las ráfagas de rayos gamma de los blazares.

Apéndice A

Algoritmos utilizados

A.1. Algoritmo de bloques Bayesianos

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
@author: alexis"
"""
import pandas as pd
import numpy as np
import pylab as plt

class BloquesBayesianos():
    '''Implementación de la función find_blocks.m de Scargle (2013)'''

    def __init__(self, data, data_mode=2):
        '''Inicialización del objeto Bloques Bayesianos.
        Entrada: data = dataframe con datos de tiempo y flujo
               data_mode = 2 = binned data'''
        self.data = data
        self.dataMode = data_mode
        self.npoints = len(self.data)

    def find_blocks(self, fp_rate = 0.005):
        '''Metodo para el analisis de la segmentacion mediante bloques
        Entrada: fp_rate - Probabilidad de que el cambio no sea real.
        Default: 0.005'''

        #Procesar los datos
        self.ProcessData()
        #Calcular el prior en los puntos de cambios
        self.CalcPrior(fp_rate=fp_rate)
        #Calcular el fitness y encontrar la funcion que los maximiza
        self.CalcFitness()
        #Recuperar los puntos de cambio
        self.RecoverCP()
        #Post procesar los datos
        self.ProcessBlocks()
```

```

print('=====')
print('Los datos de entrada se segmentan de manera optima usando
%i bloques' %(self.num_blocks -1))

def ProcessData(self):
    '''Procesamiento de los datos de entrada'''
    if self.dataMode == 2: #Binned Data
        self.time = np.array(self.data.TIME)
        if hasattr(self.data, 'FLUX'):
            self.nn_vec = self.data.FLUX
        else:
            raise AttributeError("No hay columna de Flujo en los datos
de entrada")
    else:
        print('Datos no validos: dataMode debe ser 2')
    #Ahora se tiene un vector de tiempo y un vector de flujos

    #Se calculan las diferencias entre cada elemento temporal
    dt = np.diff(self.time, n=1)

    #Verificar que los tiempos esten en orden creciente
    assert min(dt) = 0, "Los datos de tiempo no estan en orden creciente.
Verificar datos de entrada"

    #Calcular la emdiana de dt
    dt_median = np.median(dt)

    #Se establecen los tiempos de inicio y finalizaci3n
    if hasattr(self.data, 'tStart'):
        tStart = self.data.tStart
    else:
        #Tiempo de inicio por defecto
        tStart = self.time[0] - 0.5*dt_median
    if hasattr(self.data, 'tStop'):
        tStop = self.data.tStop
    else:
        #Tiempo de finalizaci3n por defecto
        tStop = self.time[-1] + 0.5*dt_median

    #Se calcula la longitud de los bloques para data mode = 2
    if self.dataMode == 2:
        tempTime = 0.5*(self.time[1:] + self.time[:-1])
        tempTime = np.append(tempTime, tStop)
        self.tt = np.insert(tempTime, 0, tStart)
        self.block_length = tStop - self.tt

    print('Datos procesados. Se inicia con los calculos Bayesianos ...')
```

```
def CalcPrior(self, fp_rate = 0.005):
    '''Calculo del change point prior (NCP prior)
    Entrada: fp_rate - Prob que el cambio no sea real.
    Por defecto: 0.005'''

    self.fp_rate = fp_rate
    self.ncp_prior = 4 - np.log(fp_rate/(0.0136*self.npoints**(0.478)))
    print('Usando un FP_RATE de %f es equivalente a un changepoint prior
    de %f' %(self.fp_rate, self.ncp_prior))

def CalcFitness(self):
    '''Calculo del "fitness" '''
    #Arrays para almacenar los datos en cada iteracion

    best = np.array([])
    last = np.array([], dtype=np.int64) #Tienen que ser enteros

    for j in range(self.npoints):
        if self.dataMode != 2:
            raise AttributeError('Data Mode no valido para el analisis')
        else:
            arg_log = self.block_length[0:j+1] - self.block_length[j+1]

            arg_log[arg_log == 0.] = np.inf

            nn_cum_vec = np.cumsum(self.nn_vec[j::-1])
            nn_cum_vec = nn_cum_vec[j::-1]

            #Se evalúa la función fitness
            fit_vec = nn_cum_vec * (np.log(nn_cum_vec) - np.log(arg_log))

            #Se substraee el ncp prior
            fit_vec -= self.ncp_prior
            fit_vec = np.concatenate((np.array([0]), best))+ fit_vec
            #Se almacenan los valores de los indices del punto que maximice
            la funcion fitness
            best = np.append(best, np.max(fit_vec))
            last = np.append(last, np.int64(np.argmax(fit_vec)))

    #Se almacenan los vectores best y last
    self.best = best
    self.last = last
    print('Funcion fitness de los bloques evaluada ...')

def RecoverCP(self):
    '''Encontrar los change points'''
    #Se crea una lista con los puntos de cambio
    change_points = []
    #El primer punto de cambio sera el indice del ultimo elemento del
    vector LAST
```

```

try:
    cpInd = self.last[-1]
except NameError:
    print('Se intenta compilar antes de calcular la funcion fitness')
    return None

while cpInd > 0:
    #Se almacenan los puntos de cambio
    change_points.append(cpInd)
    #Se salta hasta el siguiente punto de cambio
    cpInd = self.last[cpInd - 1]

#Se debe revertir el orden de los puntos de cambio
change_points = change_points[::-1]
#Se añade el primer elemento a la lista
change_points.insert(0,0)

#Se definen parametros internos
self.change_points = np.array(change_points)
self.num_cp = len(change_points)
self.num_blocks = len(change_points) + 1

print('Changepoints recuperados ...')

def ProcessBlocks(self):
    '''Toma los puntos de cambio calculados y procesa los datos para
    la salida'''
    try:
        assert self.num_cp == len(self.change_points)
    except NameError:
        print('Intento de procesar los datos antes de calcular los
        bloques: compilar RecoverCP')
        return False

    if self.change_points[-1] != self.npoints - 1:
        self.change_points = np.append(self.change_points,
        np.array([self.npoints - 1]))
    else:
        self.num_blocks -= 1

    self.rate_vec = np.zeros(self.num_blocks)
    self.num_vec = np.zeros(self.num_blocks)
    self.dt_vec = np.zeros(self.num_blocks)

    for id_block in range(self.num_blocks):
        ii_1 = self.change_points[id_block] #Inicio

        if id_block < self.num_blocks - 2 :
            ii_2 = self.change_points[id_block + 1]
        else:
            ii_2 = self.npoints - 1

```

```
#Asegurarse que ii_1 != ii_2:
if ii_1 == ii_2:
    break
if self.dataMode == 3:
    xx_this = self.nn_vec[ii_1:ii_2]
    wt_this = 1./(self.nn_vec_err[ii_1:ii_2]**2.)
    self.rate_vec[id_block]=np.sum(wt_this*xx_this)/np.sum(wt_this)
else:
    num_this = np.sum(self.nn_vec[ii_1:ii_2])
    delta_tt = self.time[ii_2] - self.time[ii_1]
    self.num_vec[id_block] = num_this
    rate_this = num_this/delta_tt
    self.rate_vec[id_block] = rate_this

print('Procesos terminados...')
```

A.2. Plot blocks

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
@author: alexis"
"""
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pylab

def read_binned_data(binned_data):
    fileIn = np.loadtxt(binned_data)
    times = fileIn[:,0]
    Flux = fileIn[:,2]
    fluxes = 100000000*Flux
    #construir el dataframe
    df = pd.DataFrame({'TIME' : times,
                      'FLUX' : fluxes })
    return df

def find_num(n,arrag, condi):
    a = arrag
    b = a[1:]
    num = n
    vec = np.array([])
    if condi == 'leq':
        for i in range(len(a)):
            if num = a[i]:
                vec = np.append(vec, i)
    elif condi == 'geat':
        for i in range(len(b)):
```

```

        if num b[i]:
            vec = np.append(vec, i)
    return vec

def print_blocks(cp_times, nn_vec, bins_use):
    rate_vec = np.array([])
    max_this = np.array([])
    cp_use = cp_times
    num_blocks = len(cp_use) - 2
    rate_vec = np.zeros(num_blocks)
    rate_old = 0

    for id_block in range(num_blocks):
        tt_1 = cp_use[id_block]
        tt_2 = cp_use[id_block + 1]
        ii_start = find_num(tt_1, bins_use, condi = 'leq')
        ii_start = int(ii_start[0])

        ii_end = find_num(tt_2, bins_use, condi = 'geat')
        if not ii_end.size:
            ii_end = len(bins_use)
        else:
            ii_end = int(ii_end[0])-1
        iu = np.arange(ii_start, ii_end+1)
        if len(iu) == 1:
            dt_use = bins_use[ii_start + 1] - bins_use[ii_start]
        else:
            if ii_end == len(bins_use):
                dt_use = bins_use[ii_end] - bins_use[ii_start-1]
            else:
                dt_use = bins_use[ii_end+1] - bins_use[ii_start]

        nn_use = np.sum(nn_vec[iu])

        rate_this = nn_use/dt_use
        rate_vec[id_block] = rate_this

        plt.plot((tt_1,tt_1), (rate_old,rate_this), 'k', linewidth=1)
        plt.plot((tt_1, tt_2),(rate_this, rate_this), 'k', linewidth=1)
        plt.pause(0.7)

        rate_old = rate_this

    plt.show()

    return rate_vec,

```

Apéndice B

Sub productos del análisis

B.1. Archivo de configuración para OP313

```
[Message]: Please provide the following required options [default] :
Output directory [/home/alexis/Blazares/OP313/LogParabola/First] :
Target Name : OP313
Right Ascension: 197.619
Declination: 32.3455
redshift, no effect if null [0] : 0
ebl model to used
0=Kneiske, 1=Primack05, 2=Kneiske_HighUV, 3=Stecker05, 4=Franceschini,
5=Finke, 6=Gilmore : 4
Options are : PowerLaw, PowerLaw2, LogParabola, PLExpCutoff, Generic
Generic is design to allow the user to fit with non-supported models
EBL absorption can be added for PowerLaw2, LogParabola, PLExpCutoff
Spectral Model [PowerLaw] : LogParabola
ROI Size [15] : 15
FT2 file [ ] : ~/Blazares/OP313/LogParabola/First/Space.fits
FT1 list of files [ ] : ~/Blazares/OP313/LogParabola/First/Photon.fits
tag [LAT_Analysis] :
Start time [239557418] : 242222401.004
End time [334165418] : 539179204.996
Emin [100] : 100
Emax [300000] : 300000
IRFs [CALDB] :
evclass [128] :
evtype [3] :
Corresponding IRFs = ('P8R2_SOURCE_V6', ['BACK', 'FRONT'])
Is this ok? [y] : y
Corresponding zmax = 90
```

B.2. Resultados descartados

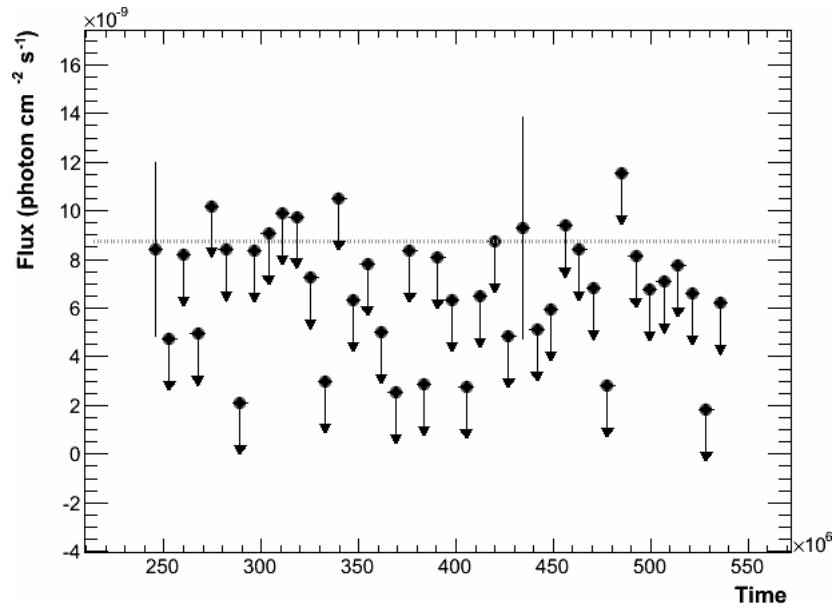


Figura B.1: Curva de luz para 1ES 0229+200

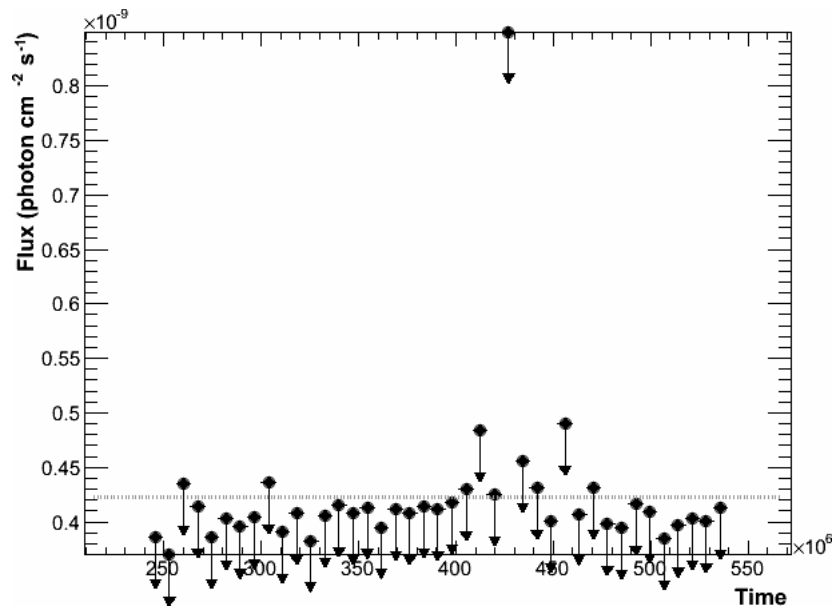
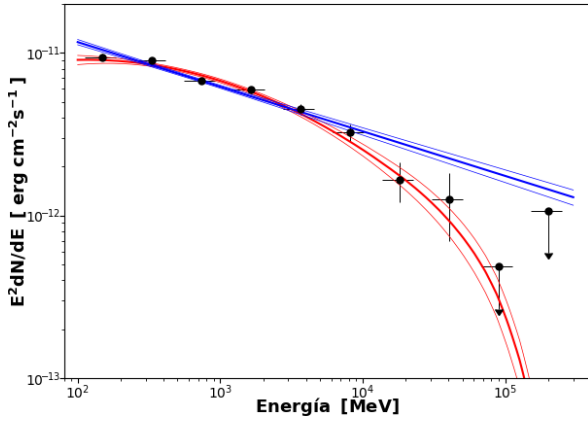
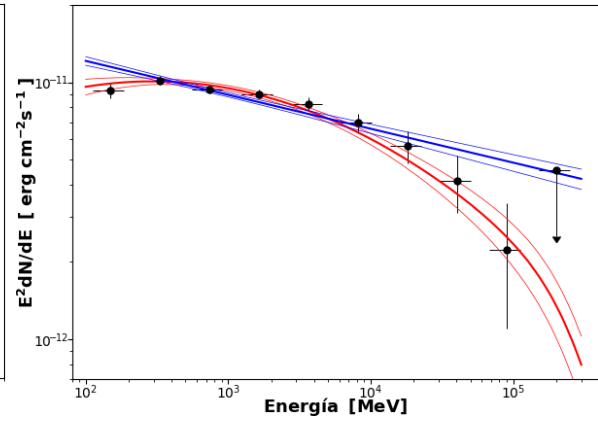


Figura B.2: Curva de luz para TXS 2157+102

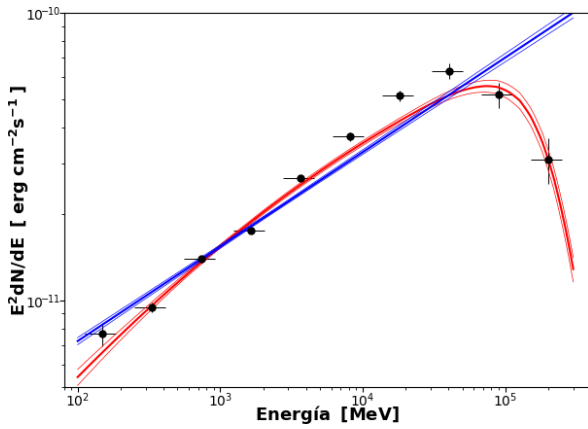
B.3. Ajustes de 2008-2018



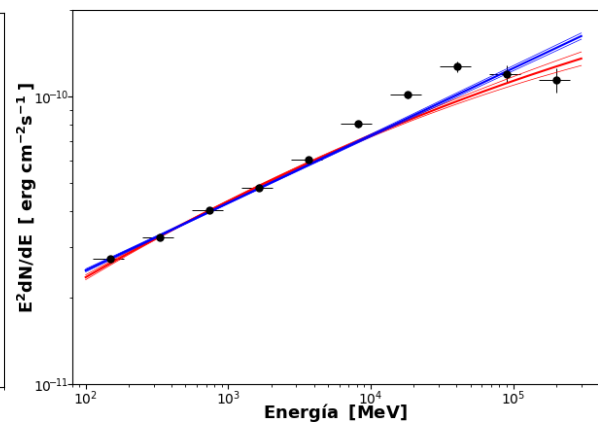
(a) Ajuste completo para OP 313



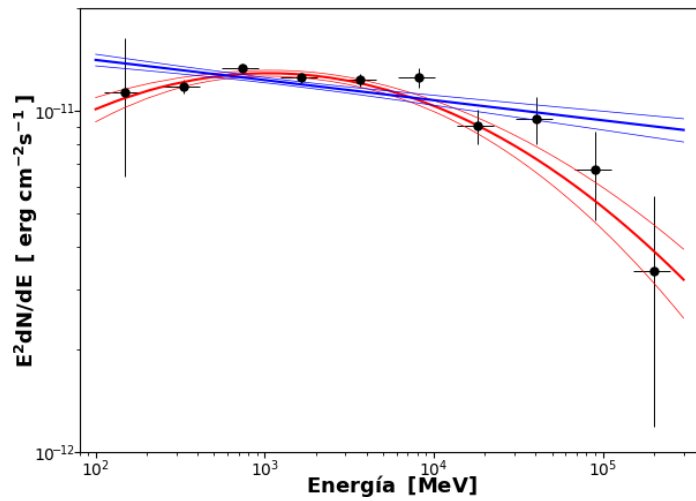
(b) Ajuste completo para MG1J021114+1051



(c) Ajuste completo para PG 1553+113



(d) Ajuste completo para Markarian 421



(e) Ajuste completo para TXS 0506+056

Figura B.3: Ajustes para los periodos completos de observación

Referencias

- Aartsen, M., Abraham, K., Ackermann, M., Adams, J., Aguilar, J., Ahlers, M., Ahrens, M., Altmann, D., Andeen, K., Anderson, T., et al. (2016). Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere using six years of IceCube data. *The Astrophysical Journal*, 833(1):3.
- Abeysekara, A., Albert, A., Alfaro, R., Alvarez, C., Álvarez, J., Arceo, R., Arteaga-Velázquez, J., Rojas, D. A., Solares, H. A., Barber, A., et al. (2017). Daily monitoring of tev gamma-ray emission from mrk 421, mrk 501, and the crab nebula with hawc. *The Astrophysical Journal*, 841(2):100.
- Abramowski, A., Aharonian, F., Benkhali, F. A., Akhperjanian, A., Angüner, E., Backes, M., Balenderan, S., Balzer, A., Barnacka, A., Becherini, Y., et al. (2015). The 2012 flare of pg 1553+ 113 seen with hess and fermi-lat. *The Astrophysical Journal*, 802(1):65.
- Aharonian, F. (2000). Tev gamma rays from bl lac objects due to synchrotron radiation of extremely high energy protons. *New Astronomy*, 5(7):377–395.
- Ajello, M., Gasparrini, D., Sánchez-Conde, M., Zaharijas, G., Gustafsson, M., Cohen-Tanugi, J., Dermer, C. D., Inoue, Y., Hartmann, D., Ackermann, M., Bechtol, K., Franckowiak, A., Reimer, A., Romani, R. W., y Strong, A. W. (2015). The origin of the extragalactic gamma-ray background and implications for dark matter annihilation. *The Astrophysical Journal Letters*, 800(2):L27.
- Atwood, W., Abdo, A. A., Ackermann, M., Althouse, W., Anderson, B., Axelsson, M., Baldini, L., Ballet, J., Band, D., Barbiellini, G., et al. (2009). The large area telescope on the Fermi gamma-ray space telescope mission. *The Astrophysical Journal*, 697(2):1071.
- Beckmann, V. y Shrader, C. (2013). *Active Galactic Nuclei*. John Wiley & Sons.
- Carroll, B. W. y Ostlie, D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Cambridge University Press.
- Fanaroff, B. y Riley, J. (1974). “The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 167(1):31P–36P.
- Fath, E. A. (1909). “The Spectra of Some Spiral Nebulae and Globular Star Clusters”. *Lick Observatory bulletin*, 5(149):71–77.
- Fisher, R. A. (1925). Theory of statistical estimation. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, volume 22, pages 700–725. Cambridge University Press.
- Glüsenkamp, T. (2016). Analysis of the cumulative neutrino flux from Fermi LAT blazar populations using 3 years of IceCube data. In *EPJ Web of Conferences*, volume 121, page 05006. EDP Sciences.

- Halpern, J., Eracleous, M., y Mattox, J. (2003). Redshifts of candidate gamma-ray blazars. *The Astronomical Journal*, 125(2):572.
- Hayashida, M., Nalewajko, K., Madejski, G., Sikora, M., Itoh, R., Ajello, M., Blandford, R., Buson, S., Chiang, J., Fukazawa, Y., et al. (2015). Rapid variability of blazar 3C 279 during flaring states in 2013-2014 with joint Fermi-LAT, NuSTAR, SWIFT, and ground-based multi-wavelength observations. *The Astrophysical Journal*, 807(1):79.
- IceCube-Collaboration et al. (2018). Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino icecube-170922a. *Science*, 361(6398):eaat1378.
- Kanbach, G., Bertsch, D., Favale, A., Fichtel, C., Hartman, R., Hofstadter, R., Hughes, E., Hunter, S., Hughlock, B., Kniffen, D., et al. (1989). The project egret (energetic gamma-ray experiment telescope) on nasa's gamma-ray observatory gro. *Space Science Reviews*, 49(1-2):69–84.
- Krawczynski, H. y Treister, E. (2013). Active galactic nuclei—the physics of individual sources and the cosmic history of formation and evolution. *Frontiers of Physics*, 8(6):609–629.
- Lynds, C., Stockton, A., y Livingston, W. (1965). New spectroscopic observations of quasi-stellar sources. *The Astrophysical Journal*, 142:1667.
- Mao, L. (2011). 2mass observation of bl lac objects ii. *New Astronomy*, 16(8):503–529.
- Meegan, C., Lichti, G., Bhat, P., Bissaldi, E., Briggs, M. S., Connaughton, V., Diehl, R., Fishman, G., Greiner, J., Hoover, A. S., et al. (2009). The fermi gamma-ray burst monitor. *The Astrophysical Journal*, 702(1):791.
- Meisner, A. M. y Romani, R. W. (2010). Imaging redshift estimates for bl lacertae objects. *The Astrophysical Journal*, 712(1):14.
- Netzer, H. (2013). *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*. Cambridge University Press.
- Padovani, P., Giommi, P., Resconi, E., Glauch, T., Arsioli, B., Sahakyan, N., y Huber, M. (2018). Dissecting the region around icecube-170922a: the blazar txs 0506+ 056 as the first cosmic neutrino source. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(1):192–203.
- Paiano, S., Falomo, R., Treves, A., y Scarpa, R. (2018). The redshift of the BL Lac object TXS 0506+ 056. *The Astrophysical Journal Letters*, 854(2):L32.
- Righi, C., Tavecchio, F., y Pacciani, L. (2018). A multiwavelength view of bl lacs neutrino candidates. *arXiv preprint arXiv:1807.04299*.
- Rybicki, G. B. y Lightman, A. P. (2008). *Radiative processes in astrophysics*. John Wiley & Sons.
- Sanchez, D. A. y Deil, C. (2013). Enrico: a Python package to simplify Fermi-LAT analysis. *ArXiv e-prints*.
- Scargle, J. D. (1998). Studies in astronomical time series analysis. v. bayesian blocks, a new method to analyze structure in photon counting data. *The Astrophysical Journal*, 504(1):405.
- Scargle, J. D., Norris, J. P., Jackson, B., y Chiang, J. (2013). Studies in astronomical time series analysis. VI. Bayesian block representations. *The Astrophysical Journal*, 764(2):167.
- Schmidt, M. (1963). 3C273: A Star-like Object with Large red-shift. *The Astrophysical Journal*.

- Schneider, P. (2007). *Extra Galactic Astronomy and Cosmology: An Introduction*. Springer Science & Business Media.
- Seyfert, C. K. (1943). “Nuclear Emission in Spiral Nebulae”. *The Astrophysical Journal*, 97:28–40.
- Urry, C. M. (1998). “Multiwavelength properties of blazars”. *Advances in Space Research*, 21(1-2):89–100.
- Urry, C. M. y Padovani, P. (1995). “Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei”. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 107(715):803–845.
- Vercellone, S., Soldi, S., Chen, A., y Tavani, M. (2004). On the duty-cycle of γ -ray blazars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 353(3):890–902.
- Wills, B. J., Netzer, H., y Wills, D. (1985). Broad emission features in QSOs and active galactic nuclei. II-New observations and theory of Fe II and HI emission. *The Astrophysical Journal*, 288:94–116.
- Woltjer, L. (1959). Emission Nuclei in Galaxies. *The Astrophysical Journal*, 130:38.