

# PROYECTO DE CIENCIA CIUDADANA: VARIABILIDAD DE BLAZARES

Paula Talavera Capilla



VNIVERSITAT  
ID VALÈNCIA



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. La Asociación Valenciana de Astronomía . . . . .	2
1.2. AGN y blazares . . . . .	2
1.3. Curvas de luz . . . . .	4
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>3. Desarrollo</b>	<b>5</b>
<b>4. Resultados</b>	<b>6</b>
4.1. 4C 29+45 . . . . .	6
4.2. B3 0754+394 . . . . .	8
4.3. HE 1029-140 . . . . .	8
4.4. PG 1116+215 . . . . .	8
4.5. PG 0804+761 . . . . .	11
<b>5. Conclusiones</b>	<b>11</b>

# 1. Introducción

## 1.1. La Asociación Valenciana de Astronomía

La Asociación Valenciana de Astronomía (AVA), fundada en 1972 y colaboradora del Museo de las Ciencias de Valencia, es una asociación cultural sin ánimo de lucro dedicada al estudio, investigación y divulgación de la astronomía tanto para aficionados como para personas que poseen conocimientos de astronomía. Realiza sus observaciones en el Centro Astronómico del Alto Turia (CAAT), que es el observatorio astronómico que la AVA tiene en Aras de los Olmos, con fines de investigación, formación y divulgación. En el CAAT se desarrollan actividades de seguimiento de asteroides y cometas, medidas de separación entre estrellas dobles, fotometría de exoplanetas, etc. También se imparten clases prácticas de astronomía y jornadas de puertas abiertas. Es en dicho observatorio en el cual se han llevado a cabo las noches de observación de las que han resultado las imágenes astronómicas que han sido proporcionadas por los socios de la AVA para realizar este proyecto.

La asociación dispone de un local social en Valencia donde todos los meses se programan diversas actividades para los socios con eventos para todos los públicos. La Escuela Valenciana de Astronomía es la herramienta con la cual se llevan a cabo acciones formativas para aquellos que deseen adentrarse en el mundo de la astronomía con cursos y conferencias, observaciones públicas, visitas guiadas al observatorio, talleres y charlas, actividades para colegios e insitutos, etc. Asimismo, cada trimestre se publica un número de su revista (RIGEL) que se envía a los socios en formato digital.

## 1.2. AGN y blazares

Los núcleos activos de galaxias o galaxias activas (AGN, *Active Galactic Nuclei*), son galaxias con núcleos extraordinariamente luminosos alimentados por agujeros negros que contienen millones o miles de millones de veces más material que nuestro Sol, se trata de los objetos más energéticos del universo. El modelo más plausible sitúa un agujero supermasivo de  $\sim 10^8 M_{\odot}$  en el centro del núcleo activo. Estas galaxias emiten de forma significativa en todo el rango espectral, desde longitudes de onda de radio a rayos X e incluso gamma. El espectro óptico y ultravioleta de muchos de estos objetos muestra líneas de emisión anchas intensas propias de un gas moderadamente denso. La anchura de estas líneas se corresponde con los desplazamientos Doppler del gas emisor moviéndose a velocidades de  $\sim 10\,000$  km/s, mucho mayores que las estrellas de la galaxia, que tienen unas velocidades orbitales de unos pocos centenares de kilómetros por segundo. Además, muchos núcleos activos son variables, cambiando sustancialmente su luminosidad en meses, días o incluso horas. Las líneas de emisión también cambian de intensidad en días o semanas, lo que implica que tanto las líneas anchas como la emisión continua deben proceder de una región no mayor que unas cuantas semanas luz. Podemos observar en la figura 1 la comparación de varios espectros ópticos de AGNs con el de una galaxia *normal*, notando las líneas de emisión presentes en todos los espectros de núcleos activos, menos el BL Lac, sobre el que ahondaremos más tarde.

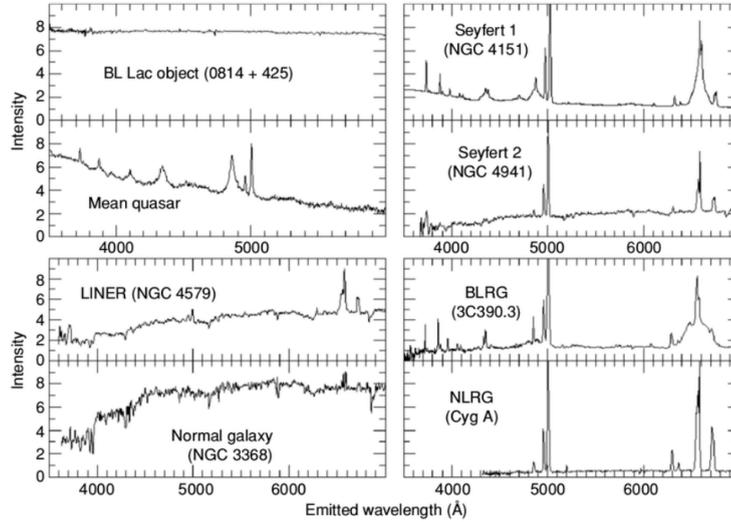


Figura 1: Espectros ópticos de AGNs y de una galaxia *normal*.

A medida que el gas queda atrapado por la gravedad del agujero negro, se forma un disco de acreción y comienza a descender en espiral al núcleo. Antes de que el gas cruce el horizonte de sucesos (límite exterior del agujero negro, más allá del cual nada escapa), el material genera una gran cantidad de radiación electromagnética. Para el AGN más luminoso, la luz visible supera la de todas las estrellas de una galaxia juntas, aunque el área de emisión de la luz es tan solo del tamaño de nuestro sistema solar.

Los radiotelescopios, telescopios ópticos y de rayos X han hallado chorros que salen disparados de los núcleos galácticos en direcciones opuestas. El material de estos chorros puede atravesar el espacio a más del 99 % de la velocidad de la luz, y algunos permanecen estrechamente colimados durante cientos de miles de años luz.

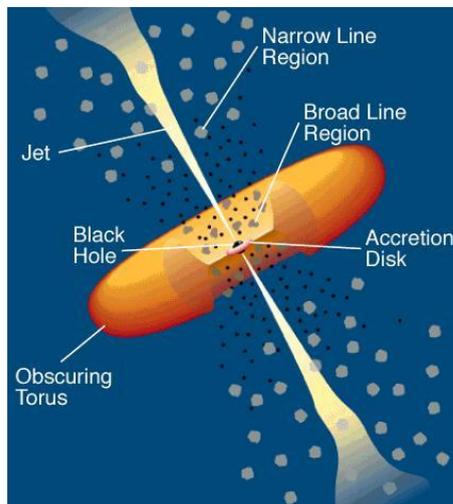


Figura 2: Esquema de la estructura de un AGN.

Actualmente los AGNs se refieren a un conjunto heterogéneo de objetos atendiendo a sus características observacionales, aunque en relación a su naturaleza y

estructura forman un conjunto homogéneo ya que todos responden al modelo mostrado en la figura 2. Así, depende del ángulo de inclinación el hecho de que los observemos de maneras muy diferentes.

Podemos clasificar los AGNs en galaxias Seyfert, cuásares, radiogalaxias, LINERs, etc. Entre estos diferentes tipos de galaxias activas encontramos los objetos violentamente variables en el óptico (OVVs), una subclase de los objetos cuasitelares (abreviados QSOs, cuásares con un color inusualmente azul), cuyas características son que su flujo puede variar significativamente en una escala de días, tienen una relativamente alta polarización en el óptico y son emisores potentes en radio. Otra clase de objetos son los BL Lacs (cuyo nombre viene de la fuente BL Lacertae). Se trata de AGNs con una gran variabilidad, como los OVVs, pero sin líneas de emisión o absorción intensas (su espectro es suave y carente de líneas espectroscópicas relevantes salvo la presencia de alguna débil línea de absorción, como ya hemos visto en la figura 1), y con su radiación óptica también altamente polarizada. Se hacen más pronunciados en el infrarrojo y óptico por lo que no suelen tener exceso de ultravioleta. En épocas de baja luminosidad, pueden observarse líneas de emisión que los hacen asemejarse a los OVVs. Actualmente se conocen más de 300 objetos BL Lac.

Al conjunto de OVVs y BL Lacs se los conoce como blazares. Todos ellos son radiofuentes y tienen una emisión en rayos gamma de alta energía (TeV) con gran variabilidad. Durante el desarrollo de esta práctica realizaremos un estudio de las curvas de luz de los blazares 4C 29+45, B3 0754+394, HE 1029-140, PG 1116+215 y PG 0804+761, cuyas imágenes son proporcionadas por la AVA. En la tabla 1 podemos ver una serie de características de los mismos.

Nombre	Tipo	Mpc	Rango de magnitudes	RA (J2000)	DEC (J2000)
4C 29+45	QSO	2510	12.8-18.5	11:59:31.9	+29:14:45
B3 0754+394	QSO	389	14.36-14.7	07:58:00.1	+39:20:29
HE 1029-140	QSO	351	13.6-14.4	10:31:54.4	-14:16:52
PG 1116+215	QSO	702	14.2-15.0	11:19:08.8	+21:19:18
PG 0804+761	QSO	402	13.7-14.7	08:10:58.5	+76:02:43

Tabla 1: Algunas características de los blazares a analizar, incluyendo la ascensión recta y la declinación en J2000. Como podemos ver, todos los objetos son QSOs (OVVs), es decir, en este caso no vamos a tratar con BL Lacs.

### 1.3. Curvas de luz

Una curva de luz es un gráfico que presenta el brillo de un objeto frente al tiempo. Las curvas de luz de algunos objetos son periódicas: estrellas binarias eclipsantes, otras estrellas variables, exoplanetas en tránsito frente a un astro... Pueden utilizarse para estimar el período de rotación del núcleo de un asteroide, una luna o un cometa, ya que la separación temporal de los picos en la curva de luz da una estimación del mismo. También hay curvas no periódicas, como la de una supernova, una estrella variable cataclísmica, un evento de microlente, etc. En este caso las curvas de luz

de los blazares nos pueden ayudar a obtener información sobre el agujero negro del AGN.

## 2. Objetivos

El objetivo principal que se busca durante la realización de estas prácticas es establecer una colaboración entre un alumnado poseedor de conocimientos de astrofísica y socios de la Asociación Valenciana de Astronomía que realizan actividades de observación para la misma. De este modo, miembros de la AVA realizarán la toma de imágenes astronómicas de varios blazares de los cuales podemos extraer las correspondientes curvas de luz para observar su variabilidad temporal. El alumnado servirá como personal de apoyo para el procesamiento de las imágenes que le son proporcionadas, debido a su previa formación en astrofísica observacional. En este caso mostramos el trabajo obtenido en la reducción de los cinco blazares descritos en la tabla 1.

## 3. Desarrollo

Para la realización de la fotometría y la obtención de las curvas de luz a partir de las imágenes de los blazares proporcionadas por la AVA empleamos el software IRAF. IRAF corresponde a las siglas *Image Reduction and Analysis Facility* y proporciona un amplio conjunto de herramientas para el análisis y el procesado de imágenes astronómicas. Fue desarrollado a mediados de los años 80 por la institución *National Optical Astronomy Observatories* (NOAO) en Tucson, Arizona. Se ha hecho popular entre la comunidad astronómica entre otras cosas por haber sido seleccionado como el sistema sobre el cual se basan los programas de reducción y análisis de datos del Telescopio Espacial (HST). Su arquitectura permite que se añadan paquetes externos con facilidad.

Antes de comenzar a obtener las magnitudes con las cuales graficamos la curva de luz es necesario reducir las imágenes CCD de los blazares que nos han sido proporcionadas. El proceso de reducción implica la eliminación de los efectos instrumentales que estén presentes en los datos, ya sean de espectroscopía o de imagen directa, y que es necesario llevarlo a cabo antes de poder realizar cualquier tipo de medida sobre nuestros datos. Los efectos de los que nos ocupamos son los siguientes:

- **Sesgo o nivel cero (*bias*):** el *bias* es un sesgo que se añade al valor digital de una imagen en la conversión de analógica a digital para evitar que la señal pueda tomar valores negativos en algún punto.
- **Corriente oscura (*dark*):** es una señal que puede producirse en los píxeles de la CCD incluso sin presencia de luz incidente y que procede de la energía térmica de la propia CCD.
- **Sensibilidad (*flat*):** la sensibilidad a la luz puede variar ligeramente para cada uno de los píxeles de una CCD. Esta variabilidad se debe a irregularidades

introducidas durante la fabricación. Para calibrar esta variación de sensibilidad de píxel a píxel, la CCD debe exponerse a una fuente de luz iluminada uniformemente.

Una vez reducidas toda la serie de imágenes de un blazar, lo único que resta es realizar la correspondiente fotometría de apertura eligiendo adecuadamente las aperturas de modo que recojan toda la luz de los astros necesarios, para luego obtener las correspondientes magnitudes instrumentales indicadoras del brillo del objeto en cuestión (y relativas al sistema empleado por IRAF). Para la obtención de la curva de luz emplearemos la técnica de la fotometría diferencial, ya que únicamente buscamos las variaciones de brillo del QSO en cuestión. Esta consiste en registrar la diferencia de brillo entre el objeto de interés y otra estrella del campo. No es necesario conocer la magnitud exacta de dicha estrella, ya que cualquier variación de magnitud debida a variaciones en la extinción atmosférica afectará a ambas estrellas por igual, por lo que la diferencia no cambiará. Para ello elegimos dos estrellas compañeras, realizamos la media entre sus dos magnitudes y se la restamos a la del blazar.

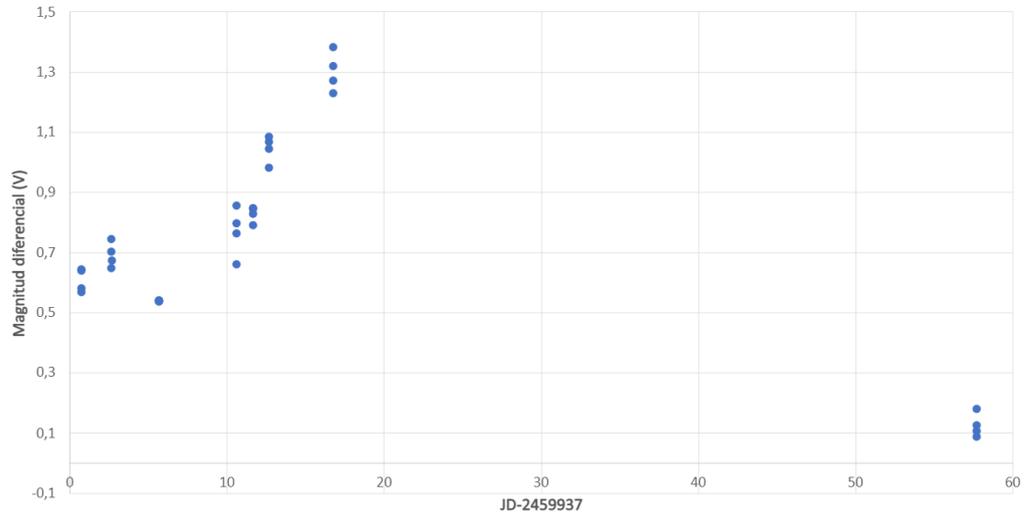
En nuestro caso, todas las imágenes tomadas de los blazares están en el filtro V (visual) del sistema de Johnson.

## 4. Resultados

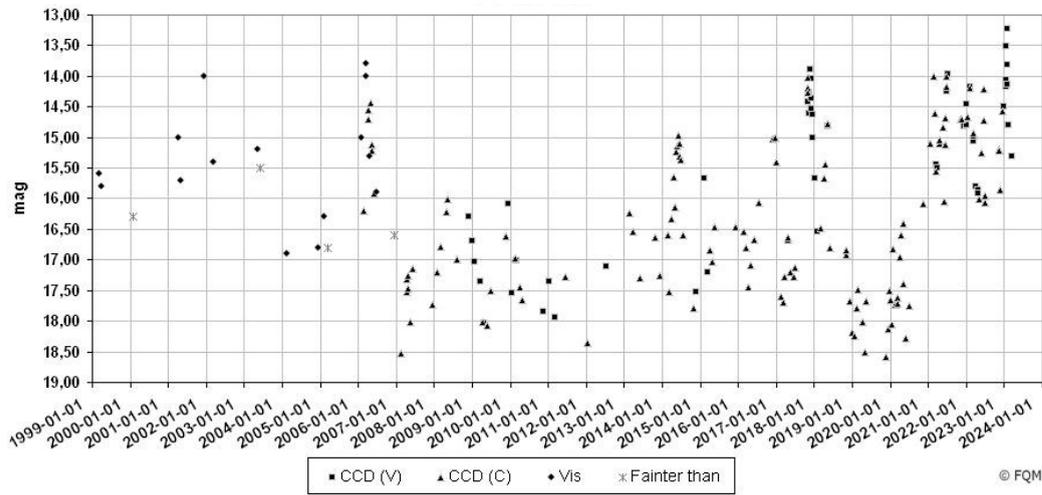
A continuación procederemos a mostrar los resultados de las curvas de luz para los blazares analizados y un breve comentario respecto a la variabilidad de la magnitud diferencial en el filtro V de los mismos. Cabe hacer notar que en la curva ofrecida por la referencia [6] la magnitud presentada no es la diferencial, y el intervalo temporal es de un año entre cada medida, al contrario que nuestra curva de luz, cuyas medidas se toman durante varios días. De este modo, nuestras medidas de la magnitud diferencial corresponderían a la zona de alrededor de 2023-01-01 en las curvas del FQM, ya que han sido tomadas a finales del año 2022 y principios del 2023.

### 4.1. 4C 29+45

En la figura 3 se muestra la comparación entre la curva de luz obtenida y la extraída de la referencia [6]. Como podemos observar en la curva de luz obtenida experimentalmente, el blazar reducido y analizado presenta una variación entre diversos valores siendo la máxima magnitud diferencial de 1.295 en un intervalo temporal de 56.96767 (día Juliano). Como veremos posteriormente en los análisis de las siguientes curvas de luz, se trata del blazar con mayor variabilidad. Comparando con la tabla del FQM, que también es un indicador de la variabilidad del blazar, efectivamente resulta ser el blazar más variable de los cinco, como hemos obtenido.

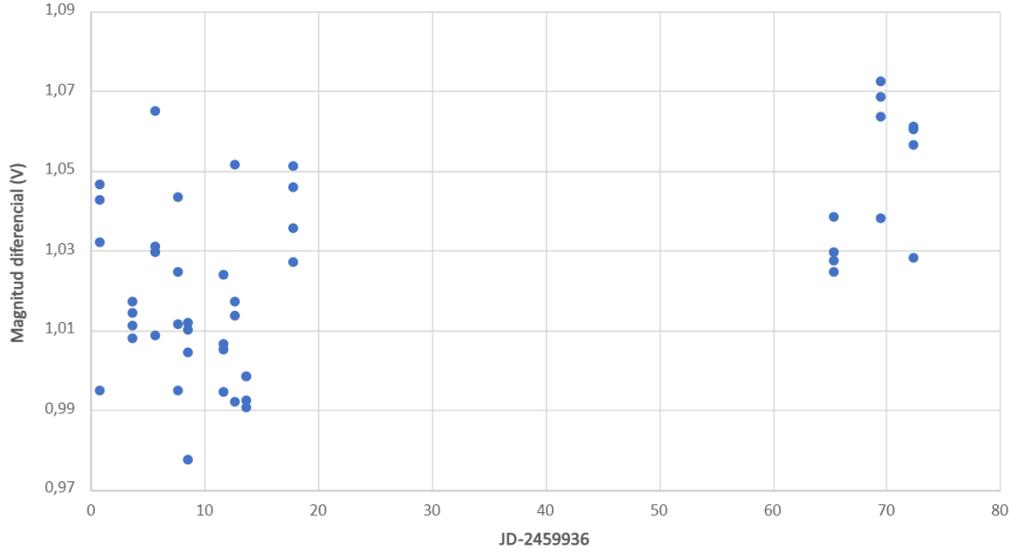


(a)

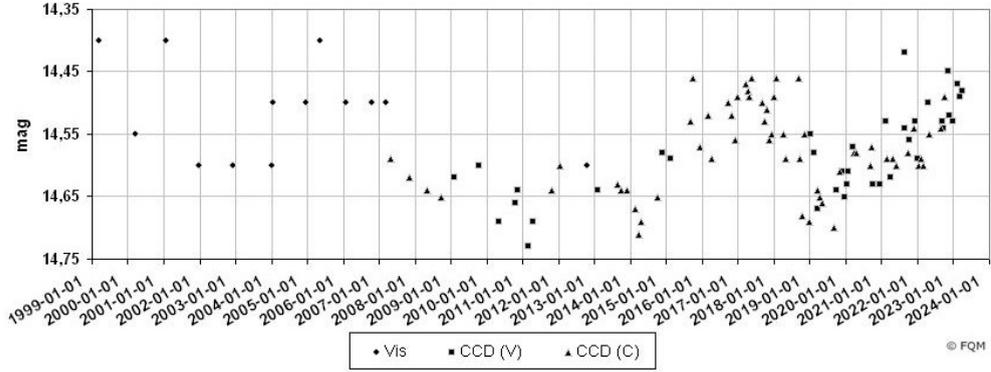


(b)

Figura 3: Blazar 4C 29+45. De arriba a abajo, curva de luz obtenida con IRAF y curva de luz ofrecida por el FQM. En esta última, los cuadrados corresponden a nuestro filtro.



(a)



(b)

Figura 4: Blazar B3 0754+394. De arriba a abajo, curva de luz obtenida con IRAF y ofrecida por el FQM.

## 4.2. B3 0754+394

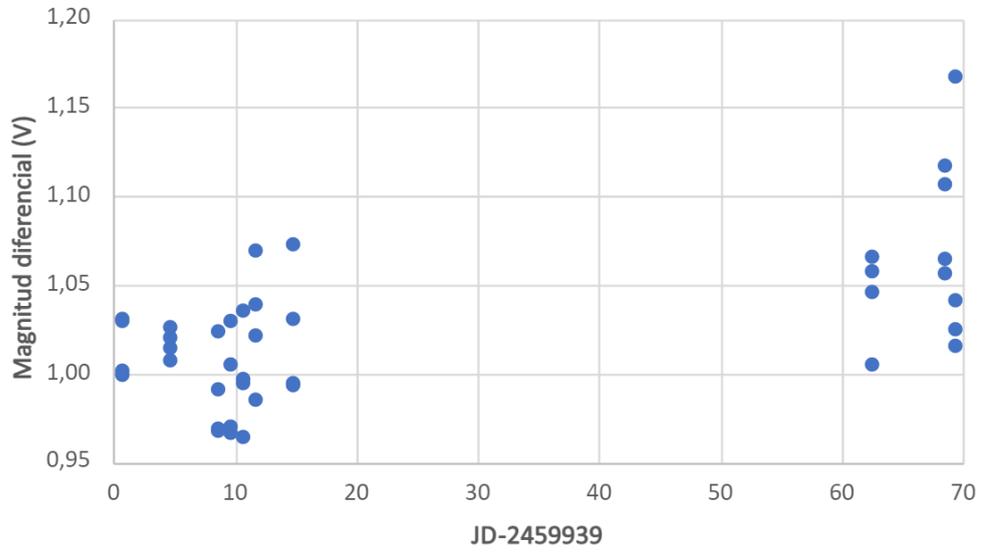
En este blazar, como vemos en la figura 4, la mayor variación en magnitud diferencial V es de 0.095 en un intervalo temporal de 71.67787 JD. En este caso el blazar presenta menos variación de la magnitud diferencial, y por tanto, del brillo.

## 4.3. HE 1029-140

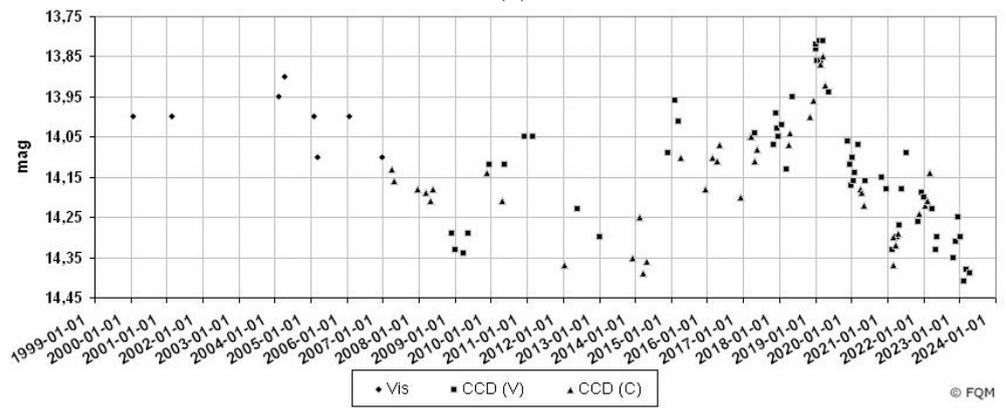
En este caso (figura 5), la magnitud diferencial varía en un total de 0.2035, ligeramente más que el blazar anterior. El tiempo total de medida es de 68.71871 JD.

## 4.4. PG 1116+215

Este blazar presenta una variación en la magnitud diferencial de 0.161 en un intervalo temporal de 71.68905, siendo su variación menor que la del anterior.

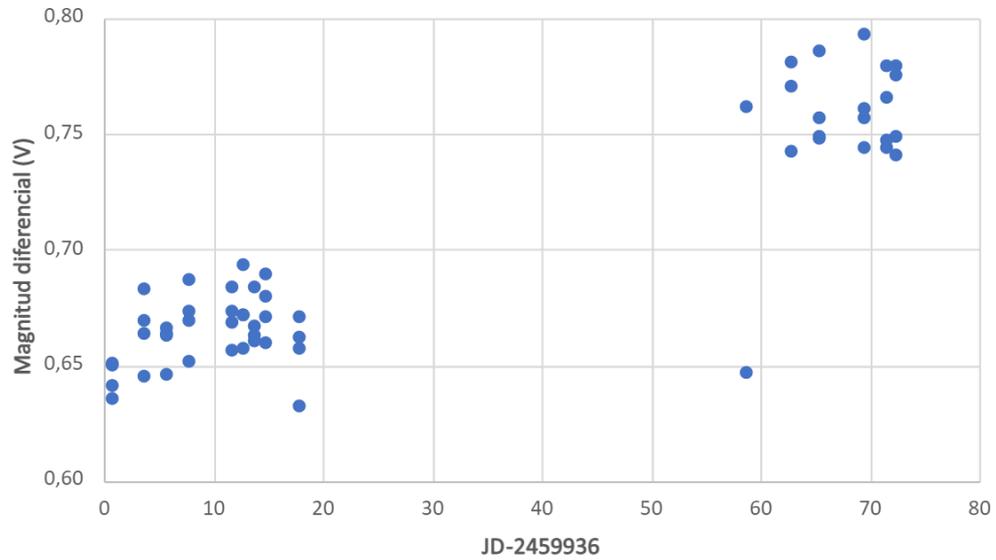


(a)

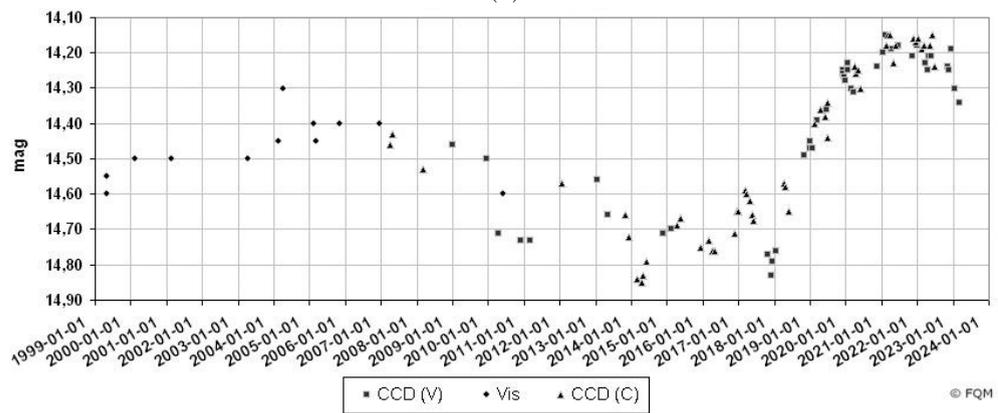


(b)

Figura 5: Blazar HE 1029-140. De arriba a abajo, curva de luz obtenida con IRAF y ofrecida por el FQM.

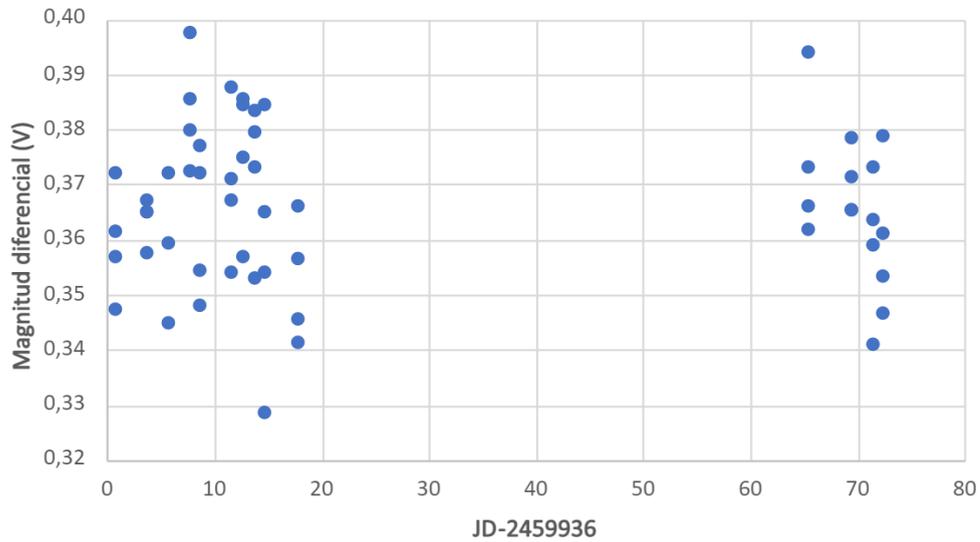


(a)

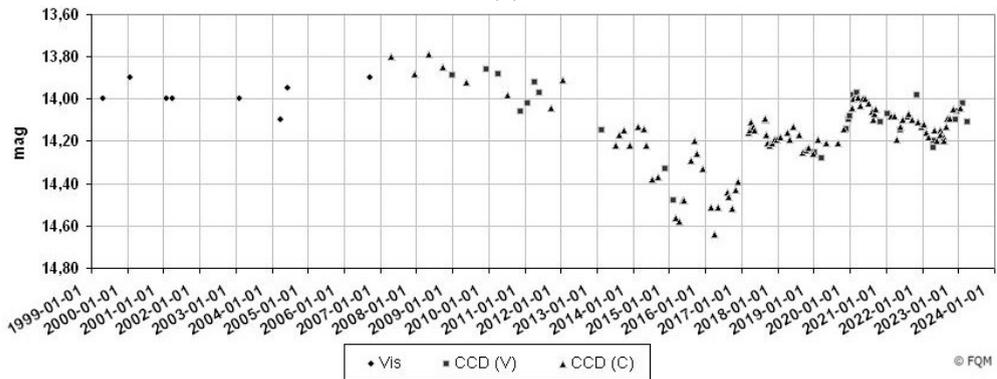


(b)

Figura 6: Blazar PG 1116+215. De arriba a abajo, curva de luz obtenida con IRAF y ofrecida por el FQM.



(a)



(b)

Figura 7: Blazar PG 0804+761. De arriba a abajo, curva de luz obtenida con IRAF y ofrecida por el FQM.

#### 4.5. PG 0804+761

En el caso de este último blazar la variación de brillo es la menor, con una magnitud diferencial de 0.069 en un intervalo temporal de 71.68764 JD.

### 5. Conclusiones

Como hemos podido observar en las curvas de luz de los blazares obtenidas mediante el software IRAF, podríamos decir que todos presentan variabilidad en su brillo, si bien algunos más que otros, como en el caso de 4C 29+45, cuyo brillo varía más que el resto. Respecto a este resultado podemos realizar varios comentarios. El primero de ellos es que la escala de variabilidad no puede ser mayor al tamaño en años luz del blazar, si bien no es una medida precisa del tamaño del mismo ya que nuestras observaciones no han sido tomadas durante un tiempo lo suficientemente largo (sino en un periodo de unos días) como para determinarlo con mayor exactitud.

Esto se debe a que los patrones de variabilidad pueden ser muy irregulares y pueden cambiar según el momento de la observación. Esta estimación del tamaño puede verse ilustrada en la figura 8.

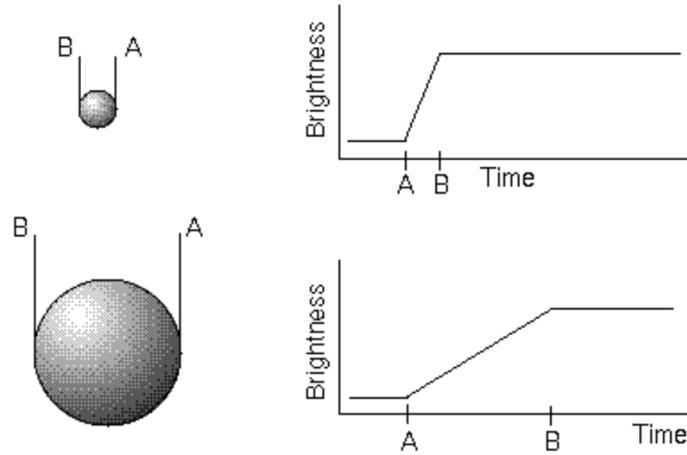


Figura 8: Relación entre la variabilidad del brillo del objeto y su tamaño máximo en años luz.

Por tanto, conociendo la luminosidad de uno de estos objetos se podría realizar una estimación del tamaño del agujero negro. El tamaño típico de una galaxia es de unos 100 000 años luz, mientras que el del agujero negro podría ser de 1 semana luz. Además, concluimos que objetos de alta variabilidad confirman la existencia de un agujero negro. El proceso más energético posible dadas dichas variaciones es el de acrecimiento al límite de Eddington, más energético incluso que la fusión nuclear. El límite o luminosidad de Eddington se trata de la luminosidad radiativa máxima que puede tener una estrella en equilibrio hidrostático. Si se supera esta luminosidad, la estrella deberá perder masa, impulsada por la presión de radiación. Por último, la masa del agujero negro central puede estimarse a partir de la luminosidad del AGN y el equilibrio entre la fuerza de la radiación sobre la materia y la fuerza gravitatoria sobre esta. La masa del agujero negro es típicamente de unas  $10^8 M_{\odot}$ .

## Referencias

- [1] J.A. Acosta y A.M. Pérez. *Reducción de datos astronómicos usando IRAF*. URL: [http://research.iac.es/galeria/jap/IRAF\\_notes/index.html#\\_Toc467774860](http://research.iac.es/galeria/jap/IRAF_notes/index.html#_Toc467774860).
- [2] Asociación Valenciana de Astronomía. *Aprende y disfruta del cielo con nosotros*. URL: <https://astroava.org/>.
- [3] J. Fabregat. *Apuntes de Astrofísica Observacional*. URL: [https://www.uv.es/fabregaj/apuntes\\_AOG.html](https://www.uv.es/fabregaj/apuntes_AOG.html).
- [4] J.M. Martí. *Apuntes de Astrofísica*. UV, 2021.
- [5] J. Masegosa. *Los objetos más luminosos del universo: las galaxias activas*. URL: <https://revista.iaa.csic.es/content/los-objetos-m%C3%A1s-luminosos-del-universo-las-galaxias-activas>.
- [6] Frankfurt Quasar Monitoring. *Finding charts*. URL: <http://quasar.square7.ch/fqm/fqm-home.html>.
- [7] NASA. *Blazars and Active Galaxies*. URL: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/science/blazars.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/science/blazars.html).
- [8] NASA. *Light Curves*. URL: <https://www.nasa.gov/kepler/education/lightcurves>.
- [9] WEBT. *WEBT target list*. URL: <https://www.oato.inaf.it/blazars/webt/glast-agile-support-program-gasp-source-list/>.