

Observaciones fotométricas ópticas de candidatas a galaxias en el survey VVV

F. Zarate¹, F. Duplancic², E. Gerville-Reache³, D. Galdeano², F. Podestá^{1,4}, E. Gonzalez^{1,4} & J.F. González⁵

¹ *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNSJ, Argentina*

² *Gabinete de Astronomía Extragaláctica, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, CONICET-UNSJ, Argentina*

³ *Department of Astronomy, Yale University, EE.UU.*

⁴ *Observatorio Astronómico Félix Aguilar, UNSJ, Argentina*

⁵ *Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio, CONICET-UNSJ, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 10 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / Se presentan resultados del estudio de una muestra de posibles candidatas a galaxia observadas en el relevamiento Vista Variables in the Via Láctea en la región sur del bulbo galáctico. Utilizando el Astrógrafo Doble de la Estación de Altura Carlos Ulrrico Cesco se obtuvieron las magnitudes en el óptico de 35 candidatas a galaxias de una muestra inicial de más de 14000 objetos seleccionados en el infrarrojo cercano. Para la obtención de las magnitudes estándares en el óptico se calibró una transformación entre las magnitudes instrumentales observadas con magnitudes calculadas en la banda G de 60 928 estrellas de GAIA en la región. Como conclusión de este trabajo resaltamos la factibilidad de utilizar el Astrógrafo Doble para obtener fotometría óptica de este tipo de galaxias. Esta información es muy relevante a la hora de poder planificar observaciones en otras facilidades como el telescopio Jorge Sahade que se encuentra emplazado en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO).

Abstract / A sample of galaxy candidates observed in the south region of the galactic bulge of Vista Variables in the Via Láctea survey is presented in this work. With the use of the Double Astrograph from the Estación de Altura Carlos Ulrrico Cesco the magnitudes in the visible light of 35 galaxy candidates were obtained. This galaxy candidates were selected from a catalogue with more than 14000 objects in the Near Infra-red part of the spectrum. For obtaining standard visual magnitudes a transformation from the instrumental observed magnitudes to the G standard magnitudes was calibrated with data of 60 928 GAIA stars. As a conclusion to this work we highlight the feasibility of using the Double Astrograph to obtain optical photometry of this type of galaxies. This information is very relevant when planning observations at other facilities such as the Jorge Sahade Telescope located at the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO).

Keywords / Galaxy: bulge — galaxies: photometry — dust, extinction

1. Introducción: Sobre las galaxias del relevamiento VVV

Una gran mayoría del gas, polvo y estrellas de la Vía Láctea se encuentran en el disco y bulbo galáctico. Las subestructuras de nuestra galaxia y sus componentes son un obstáculo para observar el Universo en longitudes de onda ópticas debido a la gran densidad estelar y alta extinción de la luz visual. Estudiar dicha región del cielo conocida como “Zona de Oscurecimiento Óptico” o ZOA, por sus siglas en inglés, resulta una tarea compleja. Ante esta situación, el relevamiento público de la ESO, VISTA Variables in the Vía Láctea (VVV; Minniti et al. (2010)) en el infrarrojo cercano (NIR) ha demostrado ser una valiosa herramienta para descubrir y catalogar objetos extragalácticos en la ZOA gracias a su alta resolución angular ($0.339''/\text{pix}$) y profundidad 3 magnitudes más débiles que 2MASS (Skrutskie et al., 2006) en la banda Ks.

Diversos autores como Amôres et al. (2012), Cold-

well et al. (2014), Baravalle et al. (2018), Galdeano et al. (2021) y Duplancic et al. (2024) definieron diferentes criterios fotométricos para la correcta identificación y diferenciación de objetos estelares de los extragalácticos en el relevamiento VVV. En el trabajo de Amôres et al. (2012) se realizó inspección visual de imágenes en falso color del mosaico *d003*, buscando identificar estructuras con morfología característica de fuentes extragalácticas. También, se analizaron diagramas color-color y distribuciones de tamaño basadas en el radio de Petrosian. En Coldwell et al. (2014) se realizó fotometría con SEXTRACTOR (Bertin & Arnouts, 1996) de candidatas a galaxias del cúmulo Suzaku J1759–3450 (mosaico *b216*) y se utilizó el índice de estelaridad *class_star* para diferenciar fuentes estelares de extragalácticas así como el parámetro $r_{1/2}$, el cual da el radio que encierra la mitad del flujo medido de una fuente. En el trabajo de Baravalle et al. (2018) se realizó fotometría de apertura con SEXTRACTOR y PSFEX (Bertin, 2011) en los mosaicos *d010* y *d115* y se buscó diferenciar objetos estelares de

extragalácticos usando los parámetros `class_star`, $r_{1/2}$, índice de concentración C y `spread_model`. También se utilizaron criterios para diferenciar fuentes extendidas de estelares en diagramas color-color y color-magnitud. Además, se inspeccionaron visualmente imágenes de las candidatas a galaxias. En el trabajo de Galdeano et al. (2021) se utilizaron técnicas y criterios similares a los descritos en los trabajos anteriores; además de un análisis de un mapa de densidad de las galaxias encontradas; hallando una sobredensidad de galaxias en el mosaico *b204*, posteriores estudios (Galdeano et al., 2022) confirmaron dicha sobredensidad como un cúmulo de galaxias.

Recientemente Duplancic et al. (2024) presentaron un catálogo con fotometría NIR en las bandas Z, Y, J, H, K_s (con longitudes medias de 0.88, 1.02, 1.25, 1.65, 2.15 μm , respectivamente) de más de 14000 candidatas a galaxias observadas con el relevamiento VVV. Este catálogo cubre la sección del bulbo galáctico comprendida entre $-10^\circ \leq l \leq 10^\circ$ y $-10^\circ \leq b \leq 5^\circ$. Los objetos se seleccionaron a partir de datos de catálogo extraídos desde VSA*, de los cuales se obtuvieron magnitudes de apertura y extinciones del mapa de Chen et al. (2013). Luego se descargaron imágenes en la banda K_s de estos objetos y se corrió SExtractor de manera de obtener parámetros específicos de separación estrella-galaxia. Así mismo se realizó inspección visual en imágenes falso color que resaltan el color rojo de las galaxias en contra del azul del las estrellas. De esta manera se terminó de descontaminar de objetos estelares el catálogo. Para mayor información sobre el catálogo se remite al lector al trabajo de Duplancic et al. (2024) (D24).

La finalidad del presente trabajo es generar una estrategia observacional adecuada para poder obtener fotometría en la región del óptico de una muestra de estos objetos. Para tal fin se llevó a cabo un proyecto piloto utilizando las facilidades de la estación de altura Carlos U. Cesco del observatorio Astronómico Félix Aguilar (OAFa).

2. Estrategia Observacional

Para las observaciones se utilizó el Astrógrafo Doble (AD), instrumento que actualmente cuenta con filtro en la banda V de Johnson-Cousins (JC) con una longitud de onda media de 0.54 μm y ancho equivalente de 0.08 μm . El AD consta de un diámetro de apertura de 0.5m y la combinación del telescopio y cámara proporciona un tamaño de campo de $\approx 25' \times 25'$ con una resolución angular de 0.732"/pix. El valor límite de magnitud observable del AD se estima en $V_{\text{lim}} = 18$.

Para la selección de los objetos con mayor probabilidad de ser observados en el óptico se escogió la región del bulbo galáctico cubierta por el catálogo de D24 que posee menor extinción en las bandas K_s y V según los mapas de Chen et al. (2013) y Schlafly & Finkbeiner (2011), respectivamente: $-10^\circ \leq b \leq -5^\circ$. En dicha región se encuentran 13863 objetos (90%) del catálogo de D24.

*<http://vsa.roe.ac.uk/>

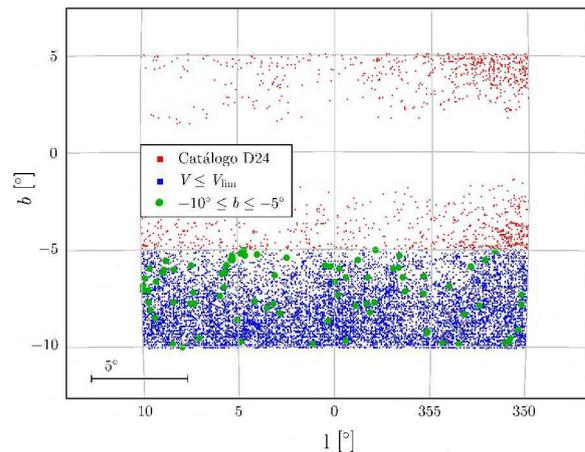


Fig. 1. Distribución espacial de los 93 objetos de D24 seleccionados como viables de observación.

De manera de estimar la magnitud V de estas fuentes se transformaron las magnitudes J, H y K_s de VVV otorgadas por el catálogo a magnitudes en las mismas bandas del relevamiento 2MASS utilizando las ecuaciones presentadas en González-Fernández et al. (2018). Posteriormente, para obtener una estima de la magnitud V se utilizaron las ecuaciones de transformación del sistema fotométrico de 2MASS al de JC presentadas en Bilir et al. (2008).

Una vez obtenida una estima de las magnitudes V de los 13863 objetos dentro de la zona de estudio se buscó aquellos que cumplieran $V < V_{\text{lim}}$ y se construyó una lista de objetos con mayor viabilidad para la observación fotométrica con este instrumento. Dicha lista se compone de 93 objetos, constituyendo el $\approx 0.671\%$ de la región explorada ($\approx 0.606\%$ del total del catálogo). En la Fig. 1 se muestra la posición de estos objetos en coordenadas galácticas.

Se inspeccionaron los 93 objetos con imágenes en falso color de VVV para desarrollar una estrategia observacional que permitiese optimizar el tiempo de telescopio. Se priorizaron los objetos del catálogo más brillantes, que tuvieran la menor contaminación de estrellas en el campo así como galaxias cercanas en proyección que pudieran ser capturadas en una misma imagen. Durante 6 noches de observación en el mes de julio de 2023, se tomaron imágenes de 27 campos del AD permitiendo la observación de 35 objetos de los 93 seleccionados inicialmente. El *seeing* medio durante las noches de observación fue de 2.5", mientras que dos noches presentaron leve nubosidad.

En la Fig. 2 se pueden comparar como se ven algunos objetos del catálogo de D24 observados para este trabajo con respecto a sus imágenes en falso color en las bandas de VVV.

3. Fotometría en el óptico de galaxias VVV

Se realizó fotometría de apertura con un diámetro de 11.712" (16 píxeles) sobre las imágenes de los 27 campos observados. Para tal fin se utilizó el paquete DAOPHOT de IRAF (Tody, 1986) con parámetros estándar. Para la

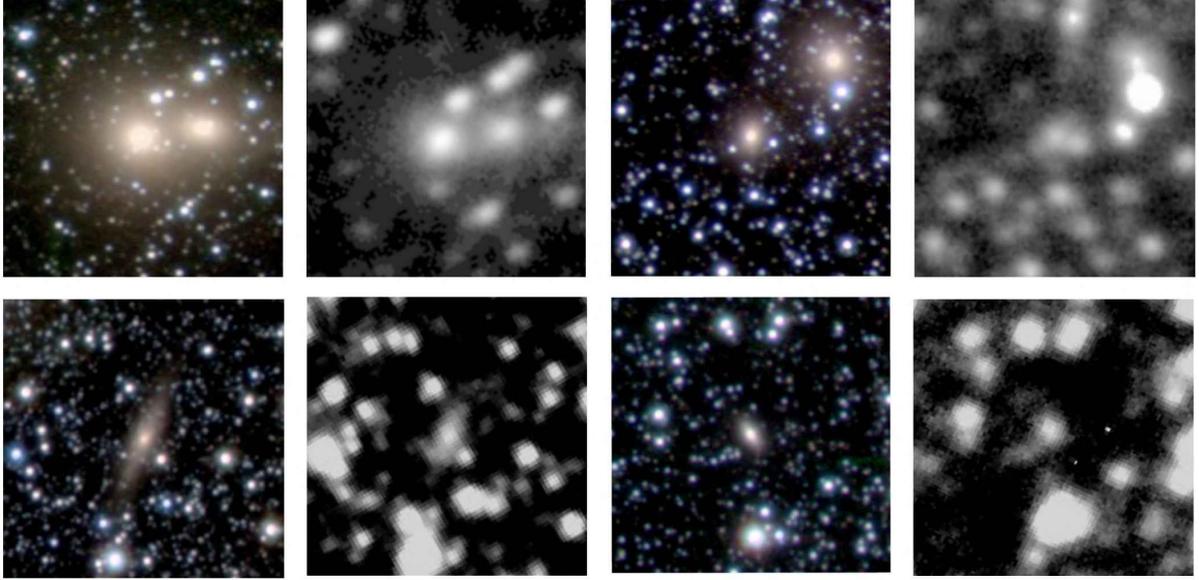


Fig. 2. Comparación entre algunos objetos del catálogo de D24 en imágenes VVV en el NIR en falso color vs. las obtenidas para este trabajo en el óptico en escala de grises. Es apreciable la diferencia en resolución espacial de VISTA ($0,339''/\text{pix}$) y el AD ($0,732''/\text{pix}$). Las imágenes tienen $1' \times 1'$.

determinación de magnitudes en el óptico de los objetos del catálogo se buscó construir y calibrar, con estrellas catalogadas de cada campo, una transformación entre las *magnitudes instrumentales* v , obtenidas de la fotometría de apertura con el AD, y magnitudes estándares G del sistema fotométrico RGB de Cardiel et al. (2021) (con una longitud de onda media de $0.53 \mu\text{m}$ y ancho equivalente de $0.09 \mu\text{m}$). La elección de este sistema fotométrico está fundamentada en que el rango espectral cubierto y la morfología de la curva de transmisión de la banda G es muy similar al de la banda V de JC con la que se tomaron las imágenes. De esta manera, una transformación entre magnitudes v y G debería ser consistente con una constante aditiva, descontando dependencias con el color que no pueden ser cuantificables por que las imágenes del AD se tomaron con único filtro. Además, en el sistema fotométrico RGB existen catalogadas una gran cantidad de estrellas en cada uno de los campos, permitiendo tener una mejor precisión en la calibración de la transformación. Para esto se recurrió al catálogo de Carrasco et al. (2023) que contiene la fotometría RGB de $\sim 2 \times 10^8$ fuentes de Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al., 2021).

En la Fig. 3 se muestra el diagrama construido para la calibración de la transformación $G - v$ considerando 60928 estrellas con $v < 18$ distribuidas en 17 de los 27 campos observados. Estos campos fueron seleccionados por ser los de mejor calidad de cielo, con la finalidad de evitar sesgos en la calibración. Puede observarse que la transformación se ubica a lo largo de una recta con pendiente casi nula para las fuentes brillantes con $v < 12$, indicando una diferencia de ≈ 1 magnitud entre las magnitudes instrumental v y estándar G . A medida que nos desplazamos a magnitudes más débiles, la dispersión de los puntos aumenta considerablemente. Los puntos verdes en esta figura representan las galaxias observadas de D24, las mismas presentan magnitudes instrumenta-

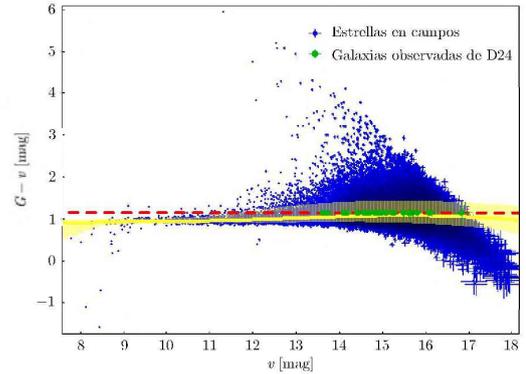


Fig. 3. Relación entre $G - v$ y v de 60928 estrellas (cuadros abiertos azules). Las galaxias observadas se muestran en círculos llenos verdes. Los errores en los puntos son los asociados a la fotometría. La línea roja de trazos corresponde a un ajuste lineal adoptado, mientras que la línea amarilla continua y el sombreado representan la media de la distribución y la dispersión gaussiana correspondiente a 1σ .

les en el rango $13 < v < 17$.

En base a estos resultados se consideró la siguiente ecuación de transformación

$$G = v - 0.00075 \times v + 1.19$$

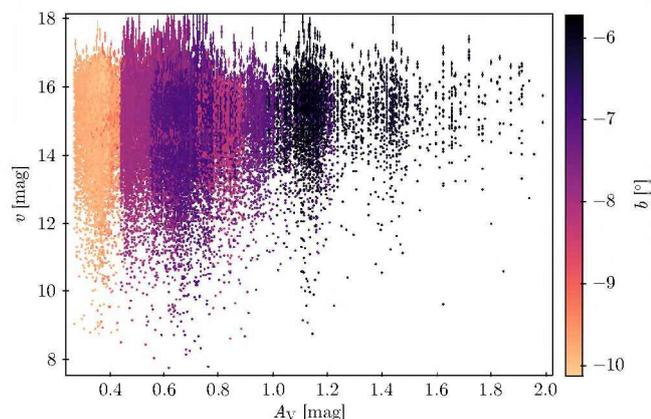
Este ajuste está representado por la línea de trazos roja en la Fig. 3. De esta manera se obtuvo una estima de la magnitud G de 35 objetos del catálogo de D24. La tabla 1 muestra 5 ejemplos de las magnitudes obtenidas para estas galaxias. Los errores asociados a la banda G son calculados a partir de los errores en la magnitud v .

3.1. El rol de la extinción galáctica

Es sabido que la extinción en longitudes de onda del visual en las latitudes galácticas analizadas en este tra-

Tabla 1. Fotometría de apertura realizada para candidatas a galaxias del catálogo de D24.

VVV ID	RA[°]	DEC[°]	G	G_{err}
515679688554	273.26774	-37.67551	14.911	0.012
515744996356	276.09729	-34.18186	15.582	0.019
515632792050	271.24481	-41.66352	15.868	0.016
515928986848	278.67882	-23.70622	16.261	0.016
515656835363	270.11203	-39.42281	15.325	0.015


Fig. 4. Magnitud instrumental v en función de la extinción A_V del mapa de Schlafly & Finkbeiner (2011). El código de colores indica la latitud galáctica de cada campo.

bajo puede afectar fuertemente la magnitud visual de las galaxias observadas. De manera de tener una primera aproximación de este efecto es que se estudiaron los mapas de extinción de Schlafly & Finkbeiner (2011) en los campos observados por el AD.

En la Fig. 4 se muestran la relación entre la magnitud instrumental v y las extinciones A_V para la región donde se ubican los 17 campos con los que construyó la relación entre v y G . El código de color de esta figura representa la latitud galáctica. Puede observarse que las altas extinciones vuelven más débiles los objetos observados y que los campos con mayor absorción son aquellos ubicados más cerca del centro galáctico. Luego concluimos que es muy importante considerar los valores de la extinción en el visual en trabajos a futuro.

4. Resumen y conclusiones

El presente trabajo presenta un proyecto piloto para obtener magnitudes en el rango visual de galaxias del catálogo de D24. Dichos objetos han sido detectados en la región del bulbo galáctico mapeado por el relevamiento VVV y poseen información fotométrica en el NIR.

Para tal fin se utilizó el AD de la estación de Altura Carlos U. Cesco del Oafa y considerando las características de dicho instrumento se seleccionó una lista de 93 objetos con mayor probabilidad de ser observados satisfactoriamente en longitudes de onda correspondientes al óptico. Se realizaron observaciones de 27 campos que incluyen 35 de las 93 galaxias y se obtuvo fotometría

de apertura en la banda G de dichos objetos en base a una calibración realizada con fotometría de 60928 estrellas de estos campos obtenidas a partir del catálogo de Carrasco et al. (2023).

Como trabajo a futuro, se espera poder utilizar información fotométrica en la región espectral correspondiente al óptico en conjunto con la disponible en el NIR para estimar el corrimiento al rojo fotométrico de galaxias del catálogo de D24. Obtener una cobertura lo más amplia posible de la distribución espectral de energía de una galaxia es fundamental para computar corrimientos al rojo fotométricos libres de sesgos en un amplio rango de distancias. Por otro lado Benítez et al. (2009) demostraron que obtener fotometría en más de 8 filtros anchos, preferentemente adyacentes, pueden mejorar significativamente el rendimiento de diversos algoritmos de estimación de corrimiento al rojo fotométrico con incertezas en el orden de $\delta z \approx 0.028(1+z)$. Estos autores también resaltan que incluir filtros en el NIR es crucial para mejorar el rendimiento cuando se tiene un bajo número de filtros.

Como conclusión de este trabajo resaltamos la factibilidad de utilizar el AD para obtener fotometría óptica de este tipo de galaxias. Esta información es muy relevante a la hora de poder planificar observaciones en otras facilidades como el telescopio Jorge Sahade (JS) que se encuentra emplazado en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) que posee detector con sistema de filtros JC y también SDSS (York et al., 2000). De este modo se puede llegar a obtener cerca de 10 filtros para el cómputo de los corrimientos al rojo fotométricos de las galaxias observadas en el presente trabajo.

Además, se extenderá a otras regiones del bulbo galáctico cubiertas por VVV la determinación de magnitudes con los métodos expuestos en este trabajo.

Referencias

- Amôres E.B., et al., 2012, *AJ*, 144, 127
 Baravalle L.D., et al., 2018, *AJ*, 155, 46
 Benítez N., et al., 2009, *ApJL*, 692, L5
 Bertin E., 2011, I.N. Evans, A. Accomazzi, D.J. Mink, A.H. Rots (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 442, 435
 Bertin E., Arnouts S., 1996, *A&AS*, 117, 393
 Bilir S., et al., 2008, *MNRAS*, 384, 1178
 Cardiel N., et al., 2021, *MNRAS*, 504, 3730
 Carrasco J.M., et al., 2023, *Remote Sensing*, 15, 1767
 Chen B.Q., et al., 2013, *A&A*, 550, A42
 Coldwell G., et al., 2014, *A&A*, 569, A49
 Duplancic F., et al., 2024, *A&A*, 682, A153
 Gaia Collaboration, et al., 2021, *A&A*, 649, A1
 Galdeano D., et al., 2021, *A&A*, 646, A146
 Galdeano D., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2210.16332
 González-Fernández C., et al., 2018, *MNRAS*, 474, 5459
 Minniti D., et al., 2010, *NewA*, 15, 433
 Schlafly E.F., Finkbeiner D.P., 2011, *ApJ*, 737, 103
 Skrutskie M.F., et al., 2006, *AJ*, 131, 1163
 Tody D., 1986, D.L. Crawford (Ed.), *Instrumentation in astronomy VI, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 627, 733
 York D.G., et al., 2000, *AJ*, 120, 1579